



ISSN 2786-846X
ISSN Online 2786-8478

Міністерство освіти і науки України
Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя

Серія "Наукові видання Ніжинської вищої школи"

№ 2, 2026

НАУКОВІ ЗАПИСКИ. БІОЛОГІЧНІ НАУКИ



ISSN Online 2786-8478
ISSN Print 2786-846X

Міністерство освіти і науки України

**Наукові
записки.
Біологічні
науки**

(Ніжинський державний університет
імені Миколи Гоголя)

№ 2



Ніжин – 2026

НАУКОВІ ЗАПИСКИ. БІОЛОГІЧНІ НАУКИ
(Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя)

«Наукові записки. Біологічні науки» засновані у 2023 р.

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації:
КВ № 25398-15338 р. від 20.01.2023.

Зареєстрований як суб'єкт у сфері друкованих медіа Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення (рішення від 11.04.2024 № 1180). **Ідентифікатор медіа** – R30-03790.

Внесено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») за спеціальністю 091 – Біологія та біохімія (Наказ МОН України № 582 від 24.04.2024 р. (додаток 2)).

Кластер (науковий профіль видання з 2026 р.):

Біологія, біотехнології, медицина та реабілітація

Спеціальність:

E1 Біологія та біохімія

Періодичність: 4 випуски на рік.

Мови публікацій: українська, англійська, польська.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Головний редактор: Кучменко Олена Борисівна, доктор біологічних наук, професор, завідувач кафедри біології Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя, м. Ніжин, Україна.

Відповідальний секретар: Гавій Валентина Миколаївна, кандидат біологічних наук, професор, доцент кафедри біології Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя, м. Ніжин, Україна.

ЧЛЕНИ РЕДКОЛЕГІЇ:

Вежольська Сільвія (Wierzcholska Sylwia), доктор філософії, доцент департаменту біології рослин, Інститут біології, факультет біології та наук про тварин, Університет природничих наук у Вроцлаві, м. Вроцлав, Польща.

Весельський Станіслав Павлович, доктор біологічних наук, старший науковий співробітник, науковий співробітник Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна.

Ганусевич Ірина Іванівна, доктор біологічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу патології метастазування Інституту експериментальної патології, онкології і радіобіології ім. Р. С. Кавецького НАН України, м. Київ, Україна.

Данченко Олена Олександрівна, доктор сільськогосподарських наук, професор, професор кафедри харчових технологій та готельно-ресторанної справи Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного, м. Запоріжжя, Україна.

Дунаєвська Оксана Феліксівна, доктор біологічних наук, професор, процесор кафедри екології Поліського національного університету, м. Житомир, Україна.

Іваніков Роман Вікторович, доктор біологічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу тропічних і субтропічних рослин Національного ботанічного саду імені М. М. Гришка НАН України, м. Київ, Україна.

Коцира Анна (Kociга Anna), доктор філософії, професор, керівник департаменту сільського господарства Інституту харчування людини та сільського господарства Університетського коледжу прикладних наук, м. Хелм, Польща.

Кур'ята Володимир Григорович, доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри біології Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського, м. Вінниця, Україна.

Мельник Андрій Володимирович, доктор медичних наук, професор, завідувач кафедри медичної та біологічної хімії Вінницького національного медичного університету ім. М. І. Пирогова, м. Вінниця, Україна.

Омельчук Олена Володимирівна, кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри фітнесу та адаптивного спорту Українського державного університету імені Михайла Драгоманова, м. Київ, Україна.

Процькув Ярослав (Proćków Jarosław), доктор габілітований, професор, керівник департаменту біології рослин, Інститут біології, факультет біології та наук про тварин, Університет природничих наук у Вроцлаві, м. Вроцлав, Польща.

Родріго-Іларрі Хав'єр (Rodrigo-Illarri Javier), доктор філософії, професор, керівник ідротехнічного та інженерно-екологічного відділу Політехнічного університету Валенсії (UPV), м. Валенсія, Іспанія.

Соколович Маріяна (Sokolovic Marijana), доктор філософії, старший науковий співробітник, керівник лабораторії аналізу кормів Центру птахівництва Хорватського ветеринарного інституту, м. Загреб, Хорватія.

Стастик Олег Остапович, доктор біологічних наук, старший науковий співробітник, член-кореспондент НАН України, завідувач відділу фізіології та екології фотосинтезу, заступник директора з наукової роботи Інституту фізіології рослин і генетики НАН України, м. Київ, Україна.

Тулкан Камелія (Tulcan Camelia), доктор габілітований, професор, професор факультету інженерії та прикладних технологій Університету наук про життя «Король Михайло I», м. Тімішоара, Румунія.

НЗ4 Наукові записки. Біологічні науки (Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя): науковий збірник. – Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2026. – № 2. – 132 с.

Рекомендовано Вченою радою Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя.
Протокол № 11 від 30.04.2026 р.



Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2137 від 29.03.05 р.
Адреса: вул. Воздвиженська, 3А, м. Ніжин, Чернігівська обл., Україна, 16600.
Тел.: (04631) 7-19-72 E-mail: vidavn.ndu@ukr.net
Верстка та макетування – О. В. Борщ
Дизайн обкладинки – В. М. Косяк

Підписано до друку 29.05.2026 р.
Гарнітура Arial
Замовлення №

Формат 60x84/8
Обл.-вид.арк. 10,45
Ум. друк. арк. 15,34

Папір офсетний
Тираж 100 пр.

ISSN Online 2786-8478
ISSN Print 2786-846X

Ministry of Education and Science of Ukraine

Research Notes. biology research

(Nizhyn Mykola Gogol
State University)

ISSUE 2



Nizhyn – 2026

RESEARCH NOTES. BIOLOGY RESEARCH
(Nizhyn Mykola Gogol State University)

«Research Notes. Biology Research» was established in 2023.

Certificate of State Registration of the Print Media:

Series KV No. 25398-15338 R, issued on January 20, 2023.

Registered as a subject in the field of print media by the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting (Decision No. 1180 of April 11, 2024). **Media Identifier** – R30-03790.

Included in the List of Scientific Professional Publications of Ukraine (Category "B") in the specialty 091 – Biology and Biochemistry (Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine No. 582 of April 24, 2024 (Appendix 2)).

Cluster (Scientific Profile of the Publication since 2026):

Biology, Biotechnology, Medicine, and Rehabilitation

Speciality:

E1 Biology and Biochemistry

Frequency: 4 issues per year.

Languages: Ukrainian, English, Polish.

EDITORIAL TEAM:

Editor-in-Chief: Kuchmenko Olena, Doctor of Biological Science, Professor, Head of the Department of Biology, Nizhyn Mykola Gogol State University, Nizhyn, Ukraine.

Executive Secretary: Havii Valentyna, Candidate of Biological Science, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Biology, Nizhyn Mykola Gogol State University, Nizhyn, Ukraine.

EDITORIAL BOARD MEMBERS:

Danchenko Olena, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor at the Department of Food Technology, Hotel, and Restaurant Business, Dmytro Motomyi Tavrria State Agrotechnological University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Dunaievska Oksana, Doctor of Biological Science, Professor, Professor at the Department of Ecology, Polissia National University, Zhytomyr, Ukraine.

Ganusevych Iryna, Doctor of Biological Science, Senior Research Fellow, Head of the Department of Pathophysiology of Metastasis, R.E. Kavetsky Institute of Experimental Pathology, Oncology and Radiobiology of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

Ivannikov Roman, Doctor of Biological Science, Senior Research Fellow, Head of the Department of Tropical and Subtropical Plants, M. M. Gryshko National Botanic Garden of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

Kocira Anna, PhD, Professor, Head of the Department of Agriculture, Institute of Human Nutrition and Agriculture, The University College of Applied Sciences, Chełm, Poland.

Kuryata Volodymyr, Doctor of Biological Science, Professor, Professor at the Department of Biology, Vinnytsia Mykhailo Kotsiubynskyi State Pedagogical University, Vinnytsia, Ukraine.

Melnyk Andrii, Doctor of Biological Science, Professor, Head of the Department of Medical and Biological Chemistry, National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsya, Ukraine.

Omelchuk Olena, Candidate of Pedagogical Science, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Fitness and Adaptive Sport, Dragomanov Ukrainian State University, Kyiv, Ukraine.

Proćków Jarosław, Dr hab., prof. UPWr., Head of the Department of Plant Biology, Institute of Biology, Faculty of Biology and Animal Science, Wrocław University of Environmental and Life Sciences, Wrocław, Poland.

Rodrigo-Illari Javier, PhD, Professor, Head of the Department of Hydraulic Engineering and Environment, Polytechnic University of Valencia (UPV), Valencia, Spain.

Sokolovic Marijana, PhD, DVM, Senior Research Fellow, Head of the Feed Analysis Laboratory of Poultry Centre of Croatian Veterinary Institute, Zagreb, Croatia.

Stasyk Oleh, Doctor of Biological Science, Senior Research Fellow, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Head of the Department of Physiology and Ecology of Photosynthesis, Deputy Director for Research, Institute of Plant Physiology and Genetics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

Tulcan Camelia, Dr. hab., Professor, Faculty of Engineering and Applied Technologies, University of Life Sciences "King Michael I" from Timisoara, Timisoara, Romania.

Veselskiy Stanislav, Doctor of Biological Science, Senior Research Fellow, Military Institute, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine.

Wierzcholska Sylwia, PhD, Assistant Professor, Department of Plant Biology, Institute of Biology, Faculty of Biology and Animal Science, Wrocław University of Environmental and Life Sciences, Wrocław, Poland.

Research Notes. Biology Research (Nizhyn Mykola Gogol State University): The academic journal. – Nizhyn: NMGSU, 2026. – № 2. – 132 p.

Recommended for publication by the Academic Council of Nizhyn Mykola Gogol State University
Record № 11 dated April 30, 2026.



Certificate of the Publishing Subject ДК № 2137 Dated March 29, 2005.

Publisher's address: n, 3A Vozdvizhenska Str., Nizhyn, Chernihiv oblast, Ukraine, 16600.

Tel.: (04631) 7–19–72 E-mail: vidavn@ndu.edu.ua

Page making – O. Borshch

Cover design – V. M. Kosiak

Signed to print 29.05.2026 p.

Typeface Arial

Order №

Format 60x84/8

Publisher's signature 10,45

Press sheet 15,34

Offset paper

Print run 100 np

ЗМІСТ

ФІЗІОЛОГІЯ РОСЛИН

- Богдан О. В.** Вплив передпосівної обробки насіння кукурудзи метаболічно активними речовинами на вміст фотосинтетичних пігментів 7
- Ващенко Р. А., Паливода Ю. М.** Вплив метаболічно активних сполук на фізіолого-біохімічні показники сільськогосподарських рослин 16
- Ворона В. І., Гавій В. М.** Фізіологічні показники ячменю ярого за передпосівної обробки насіння метаболічно активними речовинами 25
- Донець Н. В., Приплавко С. О.** Вплив метаболічно активних речовин на накопичення маси сирогої і сухої речовини у сіянцях *Ginkgo biloba* L. 35
- Nasibov Hikmet Nasi, Hasanzada Aykhan Vidadi, Quluzada Zeka Nazir** Enhancing potato (*Solanum tuberosum* L., cv Chanlibel) callus induction and regeneration using iron and copper oxide nanoparticles 42
- Rashidova Fatima, Mammadov Ziyaddin** Primary Phytochemical Analysis of *Prangos acaulis* (Lindl.) Bornm. and Comparative Analysis with *Prangos ferulacea* (L.) Lindl. 48
- Сокол О. В., Джуренко Н. І., Паламарчук О. П.** Накопичення фотосинтетичних пігментів у листовій пластинці рослин видів роду *Arctium* L. протягом вегетації 60

БІОХІМІЯ

- Гуменюк Г. Б., Дух Р. М.** Індeksi якості води за фізико-хімічними, біологічними та біохімічними показниками в системі сталого розвитку 66
- Осипчук Р. П., Кучменко О. Б., Мельничук О. В.** Застосування методу ІЧ-спектроскопії для оцінки біохімічного складу листя винограду, квіток робінії, насіння базиліка та зерен пшениці 80
- Якимчук Д. С.** Вітамін D як модулятор гіперпродукції гепсидину та його роль у формуванні функціонального залізодефіциту у вагітних жінок 93

НОРМАЛЬНА І ПАТОЛОГІЧНА АНАТОМІЯ ТА
ФІЗІОЛОГІЯ ЛЮДИНИ І ТВАРИН

- Гончаренко В. В., Соколенко С. В.** Значення статевого фактора в реалізації нейтрофільно-лімфоцитарного індексу та інших показників лейкоцитарної формули в умовах стресових факторів сучасності 102
- Мохонь Л. І.** Сучасні уявлення про роль оксидативного стресу в патогенезі акне 114
- Мхітарян Л. С., Музиченко П. Ф., Плахотін В. Я.** Роль окисних модифікацій в патогенезі артеріальної гіпертензії 126

CONTENTS

PLANT PHYSIOLOGY

Bogdan O. The effect of pre-sowing treatment of corn with metabolically active substances on the content of photosynthetic pigments	7
Vashchenko R., Palyvoda Yu. Influence of metabolically active compounds on the physiological and biochemical indicators of agricultural plants	16
Vorona V., Havii V. Physiological indicators of spring barley under pre-sowing seed treatment with metabolically active substances	25
Donets N., Pryplavko S. Change in the weight of raw and dry matter of <i>Ginkgo biloba</i> L. seedlings under the influence of metabolically active substances used for pre-sowing seed treatment	35
Nasibov Hikmet Nasi, Hasanzada Aykhan Vidadi, Quluzada Zeka Nazir Enhancing potato (<i>Solanum tuberosum</i> L., cv Chanlibel) callus induction and regeneration using iron and copper oxide nanoparticles	42
Rashidova Fatima, Mammadov Ziyaddin Primary Phytochemical Analysis of <i>Prangos acaulis</i> (Lindl.) Bornm. and Comparative Analysis with <i>Prangos ferulacea</i> (L.) Lindl.	48
Sokol O., Dzhurenko N., Palamarchuk O. Accumulation of photosynthetic pigments in the leaf blades of plants of the genus <i>Arctium</i> L. during vegetation	60

BIOCHEMISTRY

Humeniuk H., Dukh R. Water quality indices based on physicochemical, biological and biochemical indicators in the system of sustainable development	66
Osypchuk R., Kuchmenko O., Melnychuk O. Application of the infrared spectroscopy method for assessing the biochemical composition of grape leaves, robinia flowers, basil seeds, and wheat grains	80
Yakymchuk D. Vitamin D as a modulator of hepcidin hyperproduction and its role in the formation of functional iron deficiency in pregnant women	93

NORMAL AND PATHOLOGICAL ANATOMY, PHYSIOLOGY OF HUMANS AND ANIMALS

Honcharenko V., Sokolenko S. The significance of the sex factor in the implementation of the neutrophil-to-lymphocyte ratio and other indicators of the leukocytes formula in the conditions of stress factors of the presents	102
Mohon L. Modern concepts of the role of oxidative stress in the pathogenesis of acne	114
Mkhitaryan L., Muzychenko P., Plakhotin V. The role of oxidative modifications in the pathogenesis of hypertension	126

УДК 633.15:631.811:581.132
DOI 10.31654/2786-8478-2026-BN-2-7-15

Богдан О. В.

аспірант кафедри біології
Ніжинського державного університету
імені Миколи Гоголя
oleksandrbogdan840@gmail.com
orcid.org/0009-0008-1797-9522

**ВПЛИВ ПЕРЕДПОСІВНОЇ ОБРОБКИ НАСІННЯ КУКУРУДЗИ
МЕТАБОЛІЧНО АКТИВНИМИ РЕЧОВИНАМИ НА ВМІСТ
ФОТОСИНТЕТИЧНИХ ПІГМЕНТІВ**

У статті досліджено вплив передпосівної обробки насіння цукрової кукурудзи метаболічно активними речовинами на вміст фотосинтетичних пігментів. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення продуктивності культури шляхом застосування ефективних біостимуляторів, здатних оптимізувати фізіолого-біохімічні процеси рослин. Польові дослідження проведено на базі навчально-дослідної агробіостанції Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя із використанням насіння кукурудзи сорту Спокуса, обробленого комбінаціями таких метаболічно активних сполук, як вітамін E, убіхінон-10, метіонін, параоксибензойна кислота, $MgSO_4$.

Встановлено, що всі досліджувані варіанти обробки сприяли підвищенню вмісту хлорофілу порівняно з контролем. Найвищі значення показників зафіксовано у варіанті з додаванням $MgSO_4$, який забезпечував найбільш виражений ефект, що підтверджується підвищенням значень показників.

Порівняння з препаратом Вимпел показало, що окремі комбінації метаболічно активних речовин не поступаються або перевищують його ефективність за здатністю стимулювати накопичення фотосинтетичних пігментів. Отримані результати узгоджуються з даними щодо позитивного впливу цих комбінацій на морфометричні показники та біомасу рослин.

Отримані результати свідчать, що передпосівна обробка насіння кукурудзи метаболічно активними речовинами є ефективним заходом підвищення інтенсивності фотосинтетичних процесів, що проявляється у збільшенні вмісту хлорофілу на всіх етапах розвитку рослин. Найбільш виражений і стабільний ефект забезпечує комплексна дія сполук із включенням $MgSO_4$, що вказує на доцільність синергетичного поєднання біологічно активних компонентів.

Загалом, застосування таких обробок сприяє формуванню більш активного фотосинтетичного апарату рослин і може розглядатися як перспективний елемент технології вирощування кукурудзи, спрямований на підвищення фізіологічної стійкості та потенційної продуктивності культури.

Ключові слова: цукрова кукурудза, фотосинтетичні пігменти, хлорофіл, метаболічно активні речовини, вітамін E, метіонін, убіхінон-10, параоксибензойна кислота, $MgSO_4$.

Вступ. Цукрова кукурудза (*Zea mays convar. saccharata*) є важливою овочевою культурою, що відзначається високими смаковими якість та значною харчовою цінністю. Формування її продуктивності значною мірою залежить від інтенсивності фізіолого-біохімічних процесів, зокрема фотосинтезу, який визначається вмістом і співвідношенням фотосинтетичних пігментів. Хлорофіли та каротиноїди відіграють ключову роль у поглинанні світлової енергії, забезпеченні фотохімічних реакцій і формуванні біомаси рослин, тому їх вміст є важливим показником функціонального стану фотосинтетичного апарату [1, 2].

На ранніх етапах онтогенезу рослини кукурудзи є особливо чутливими до дії абіотичних факторів середовища, що може обмежувати реалізацію їх продуктивного потенціалу. У зв'язку з цим актуальним є застосування агротехнічних заходів, спрямованих на стимуляцію ростових процесів і підвищення адаптивних можливостей рослин. Одним із таких ефективних прийомів є передпосівна обробка насіння біологічно та метаболічно активними речовинами, які здатні впливати на обмін речовин, активність ферментних систем і процеси фотосинтезу [2, 3].

Сучасні дослідження свідчать про позитивний вплив різних груп біологічно активних сполук – регуляторів росту, амінокислот, мікроелементів і антиоксидантів – на формування фотосинтетичного апарату рослин. Зокрема, такі сполуки, як вітамін Е, убіхінон-10, метіонін, параоксибензойна кислота (ПОБК) та сульфат магнію ($MgSO_4$), беруть участь у процесах антиоксидантного захисту, стабілізації клітинних мембран, синтезі хлорофілу та регуляції метаболізму. Магній, як центральний атом молекули хлорофілу, відіграє визначальну роль у формуванні пігментного комплексу, тоді як інші компоненти сприяють підвищенню стійкості фотосинтетичного апарату до стресових умов [4].

Водночас у науковій літературі недостатньо висвітлено питання комплексного впливу комбінацій метаболічно активних речовин на вміст фотосинтетичних пігментів саме у цукровій кукурудзі. Більшість досліджень зосереджена на морфометричних показниках або виконана на інших культурах, що зумовлює необхідність поглибленого вивчення фізіолого-біохімічних аспектів дії таких препаратів.

Метою даного дослідження було встановити вплив передпосівної обробки насіння кукурудзи комбінаціями метаболічно активних речовин на вміст фотосинтетичних пігментів та визначити найбільш ефективні їх поєднання для оптимізації функціонування фотосинтетичного апарату рослин.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження проведено протягом 2024-2025 років на території навчально-дослідної агробіостанції Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя (Чернігівська обл., Україна). Об'єктом дослідження були рослини цукрової кукурудзи сорту Спокуса, які вивчали на різних етапах онтогенезу.

Перед висівом насіння піддавали передпосівній обробці водними розчинами метаболічно активних речовин. До складу досліджуваних сполук входили: вітамін Е, убіхінон-10, метіонін, параоксибензойна кислота (ПОБК) та сульфат магнію ($MgSO_4$). Речовини застосовували у складі таких комбінацій:

1. Вітамін Е + убіхінон-10.
2. Вітамін Е + метіонін + ПОБК.
3. Вітамін Е + метіонін + ПОБК + $MgSO_4$.

Контрольним варіантом слугувало насіння, оброблене дистильованою водою. Для порівняльної оцінки ефективності досліджуваних комбінацій використовували препарат Вимпел-2.

Передпосівну обробку насіння здійснювали методом замочування у відповідних розчинах протягом 2 годин при температурі 20 ± 2 °С. Для варіанта із застосуванням препарату Вимпел-2 робочий розчин готували відповідно до інструкції: 10 мл препарату розчиняли у 0,5 л води, після чого насіння витримували у розчині протягом 2 годин. Після обробки насіння висівали безпосередньо у ґрунт на дослідних ділянках [5, 6, 7].

Усі варіанти досліду вирощували за однакових агротехнічних умов без додаткового внесення мінеральних добрив та зрошення, що дозволяло оцінити вплив саме фактору передпосівної обробки.

Оцінку стану фотосинтетичного апарату рослин здійснювали у фазах 3-5 листків, викидання волоті, молочної та повної стиглості. Основним показником був вміст хлорофілу в тканинах листків. Вміст фотосинтетичних пігментів у листках кукурудзи визначали спектрофотометричним методом. Оптичну густину вимірювали при довжинах хвиль 665, 654 і 649 нм. Як екстрагент застосовували 96% етиловий спирт. Кількісне визначення здійснювали за наступною методикою: наважку рослинної сировини масою 0,1 г (точна наважка) перенесли у ступку. Матеріал ретельно розтирали з додаванням невеликої кількості карбонату магнію, кварцового піску та 5 мл 96% етилового спирту до утворення однорідної екстракційної маси. Отриману суміш фільтрували для відокремлення твердого залишку, після чого об'єм фільтрату доводили до 30 мл тим самим екстрагентом. Як розчин порівняння використовували 96% етанол.

Концентрацію хлорофілів *a* та *b* розраховували за наступними формулами:

$$C_{\text{хл.а}} = 13.70 A_{665} - 5.76 A_{649}$$

$$C_{\text{хл.б}} = 25.80 A_{649} - 7.60 A_{665},$$

де A_{649} – оптична густина розчину за довжини хвилі 649 нм; A_{665} – оптична густина розчину за довжини хвилі 665 нм.

Загальний вміст хлорофілів *a* та *b* ($C_{\text{хл.а}} + C_{\text{хл.б}}$) визначали за формулою:

$$C_{\text{хл.а}} + C_{\text{хл.б}} = 25,1 A_{654}$$

де, $C_{\text{хл.а}} + C_{\text{хл.б}}$ – концентрація хлорофілів *a* та *b*; A_{654} — оптична густина розчину за довжини хвилі 654 нм.

Кількісний вміст хлорофілів *a* та *b* (*X*, мг/г) розраховували за формулою:

$$V_{\text{ек}} = \frac{C_{\text{хл}}}{1000} \cdot m_{\text{нав}}$$

де, $V_{\text{ек}}$ – об'єм спиртової витяжки, мл; $C_{\text{хл}}$ – концентрація хлорофілу у спиртовій витяжці, мг/г; $m_{\text{нав}}$ – маса наважки сировини, г [8]. Повторність досліджень – восьмикратна.

Отримані експериментальні дані обробляли із використанням методів математичної статистики з визначенням достовірності відмінностей між варіантами на рівні $p < 0,05$ [9, 10].

Результати досліджень та їх обговорення. З метою оцінки впливу передпосівної обробки насіння метаболічно активними речовинами на інтенсивність фотосинтетичних процесів у рослин цукрової кукурудзи сорту Спокуса було визначено вміст хлорофілу в тканинах листків на різних етапах онтогенезу. Отримані результати представлені на діаграмах і дозволяють простежити динаміку змін пігментного складу залежно від застосованих комбінацій.

У фазі 3-5 листків встановлено, що всі варіанти передпосівної обробки сприяли підвищенню вмісту хлорофілу порівняно з контролем (0,88 мг/г). Найвищий показник відзначено у варіанті №3 (1,63 мг/г), що перевищує контроль майже на 85%. Варіанти №2 (1,31 мг/г) та із застосуванням препарату Вимпел (1,32 мг/г) також демонстрували значне зростання вмісту пігменту. Найменший ефект серед дослідних варіантів спостерігався у варіанті №1 (1,11 мг/г), проте і він перевищував контрольні значення (рис. 1).

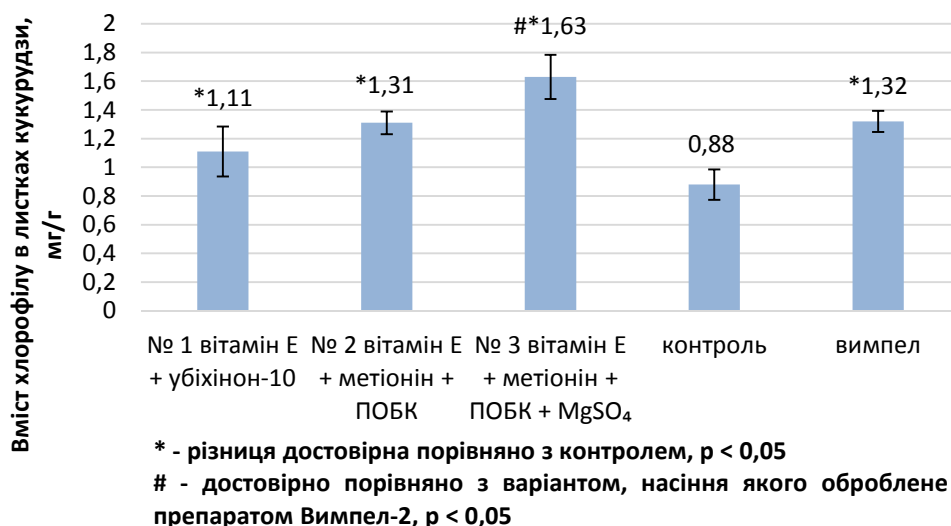


Рис. 1. Вплив передпосівної обробки насіння кукурудзи метаболічно активними речовинами на вміст фотосинтетичних пігментів у фазі 3-5 листків

У фазі викидання волоті зберігалася аналогічна тенденція. У контрольному варіанті цей показник становив 2,13 мг/г, тоді як у всіх дослідних варіантах відмічено його істотне підвищення – до 2,58-3,61 мг/г. Найвищі значення зафіксовано у варіанті №3 (3,61 мг/г), що перевищує контроль майже на 70% і свідчить про найбільш ефективний вплив даної комбінації на формування та функціонування фотосинтетичного апарату рослин. Варіант із препаратом Вимпел (3,38 мг/г) також показав високі результати, однак поступався варіанту з використанням комбінації з додаванням MgSO₄ (рис. 2).

Варіант №2 також демонстрував помітне зростання вмісту хлорофілу (2,82 мг/г), що на понад 30% більше порівняно з контролем, однак поступався варіанту №3. Найменше підвищення серед дослідних варіантів відзначено у варіанті №1 (2,58 мг/г), хоча й у цьому випадку спостерігалася позитивна динаміка щодо накопичення пігменту.

Варіант із застосуванням препарату Вимпел характеризувався високими показниками (3,38 мг/г), що значно перевищували контрольні значення (приблизно на 58%), проте дещо поступалися найефективнішій комбінації з додаванням MgSO₄. Це може свідчити про важливу роль магнію у процесах біосинтезу хлорофілу, оскільки він входить до складу його молекули та активує ряд ферментів, пов'язаних із фотосинтетичною діяльністю.

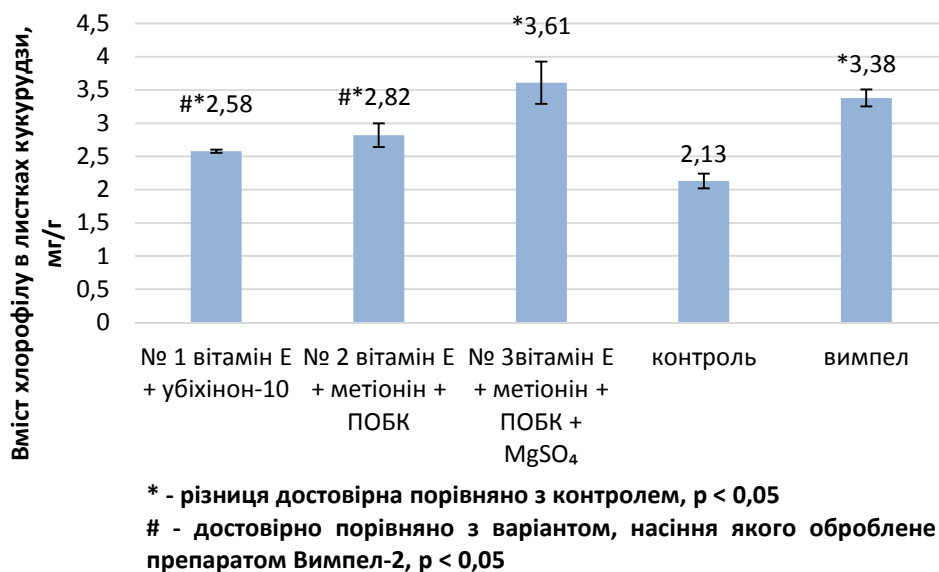


Рис. 2. Вплив передпосівної обробки насіння кукурудзи метаболічно активними речовинами на вміст фотосинтетичних пігментів у фазі викидання волоті

У фазі молочної стиглості вміст хлорофілу у контрольному варіанті становив 1,92 мг/г, тоді як у дослідних варіантах спостерігалось його підвищення до 2,18–2,64 мг/г. Найвищий показник було зафіксовано у варіанті №3 (2,64 мг/г), що підтверджує стабільну та тривалу дію даної комбінації метаболічно активних речовин протягом усього періоду вегетації (рис. 3).

Варіант № 2 також демонстрував помітне збільшення вмісту хлорофілу (2,22 мг/г) порівняно з контролем, однак поступався варіанту № 3 за інтенсивністю накопичення пігменту. Варіант із застосуванням препарату Вимпел (2,46 мг/г) займав проміжне положення між варіантами № 2 та № 3, що свідчить про його достатньо високу, але менш виражену ефективність порівняно з найбільш активною комбінацією.

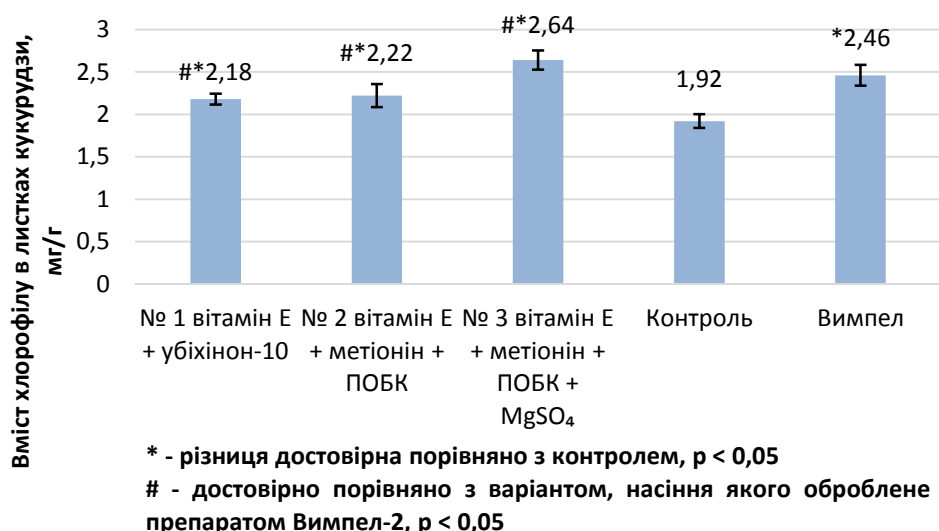


Рис. 3. Вплив передпосівної обробки насіння кукурудзи метаболічно активними речовинами на вміст фотосинтетичних пігментів у фазі воскової стиглості

На завершальному етапі розвитку рослин (фаза повної стиглості) також чітко простежувалася перевага варіанта №3, у якому вміст хлорофілу становив 0,87 мг/г.

Це перевищувало контрольний показник (0,43 мг/г) більш ніж на 49%, що свідчить про тривале збереження позитивного ефекту передпосівної обробки насіння комплексом метаболічно активних речовин (рис 4).

Варіант №2 забезпечував помірне підвищення вмісту хлорофілу до 0,61 мг/г, а застосування препарату Вимпел давало близький результат (0,63 мг/г), що вказує на їх приблизно однакову ефективність на пізніх етапах онтогенезу. Варіант №1 мав найнижчі значення серед дослідних варіантів (0,46 мг/г) і практично не відрізнявся від контролю, що свідчить про слабший вплив даної комбінації на підтримання фотосинтетичної активності в період завершення вегетації.

Отримані результати свідчать про те, що найбільш ефективною є комбінація метаболічно активних речовин у складі вітамін Е + метіонін + ПОБК + $MgSO_4$ (варіант №3), яка забезпечує стабільно високий рівень накопичення хлорофілу на всіх етапах розвитку рослин.

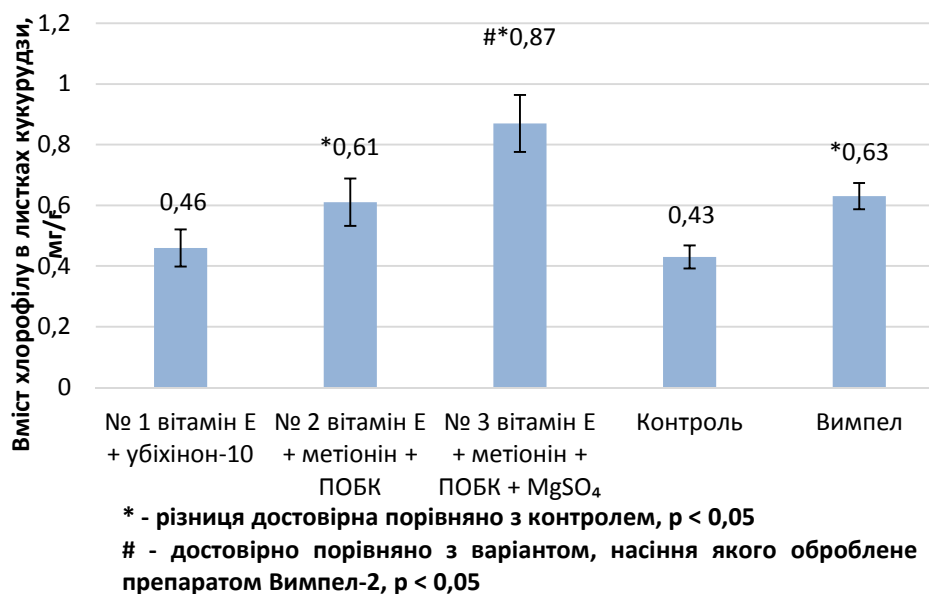


Рис. 4. Вплив передпосівної обробки насіння кукурудзи метаболічно активними речовинами на вміст фотосинтетичних пігментів у фазі повної стиглості

Такий ефект можна пояснити синергічною дією компонентів досліджуваних комплексів. Зокрема, магній є центральним елементом молекули хлорофілу, що безпосередньо впливає на його синтез, тоді як вітамін Е виконує антиоксидантну функцію, захищаючи хлоропласти від окисного стресу. Метіонін бере участь у синтезі білків і регуляторних сполук, а параоксibenзойна кислота стимулює ріст і розвиток рослин, що опосередковано впливає на формування фотосинтетичного апарату. Порівняння з препаратом Вимпел показало, що досліджувані комбінації, особливо варіант №3, не лише не поступаються, але й перевищують його ефективність за здатністю підвищувати вміст фотосинтетичних пігментів [1-3].

Таким чином, передпосівна обробка насіння кукурудзи метаболічно активними речовинами, зокрема у комплексі з $MgSO_4$, є ефективним агротехнічним прийомом, що сприяє підвищенню вмісту хлорофілу та інтенсифікації фотосинтетичних процесів, що, у свою чергу, створює передумови для зростання продуктивності культури.

Висновки. Отримані результати свідчать, що передпосівна обробка насіння кукурудзи метаболічно активними речовинами є ефективним заходом підвищення інтенсивності фотосинтетичних процесів, що проявляється у збільшенні вмісту хлорофілу на всіх етапах розвитку рослин. Найбільш виражений і стабільний ефект

забезпечує комплексна дія сполук із включенням $MgSO_4$, що вказує на доцільність синергетичного поєднання біологічно активних компонентів.

Загалом, застосування таких обробок сприяє формуванню більш активного фотосинтетичного апарату рослин і може розглядатися як перспективний елемент технології вирощування кукурудзи, спрямований на підвищення фізіологічної стійкості та потенційної продуктивності культури.

Список використаних джерел

1. Макрушин М. М., Макрушина Є. М., Петерсон Н. В., Мельников М. М. Фізіологія рослин : підручник / за ред. М. М. Макрушина. Вінниця : Нова Книга, 2006. 416 с.
2. Mastropetros S. G., Darras A. I., Matsi T. Effect of Pre-Sowing Seed Stimulation on Maize Seedling Vigour // *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. Vol. 24, No. 10. Article 9248. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms252212480>
3. Лихочвор В. В., Петриченко В. Ф. Рослинництво. Сучасні інтенсивні технології вирощування основних польових культур : навч. посібник / В. В. Лихочвор, В. Ф. Петриченко. Львів : Українські технології, 2006. 730 с.
4. Лісовицький В. В., Кучменко О. Б. Вплив метаболічно-активних речовин на окремі фізіолого-біохімічні показники росту і розвитку огірків сорту Ніжинський // *Наукові записки НаУКМА. Біологія та екологія*, 2020. Т. 3. С. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.18523/2617-4529.2020.3.35-42>
5. Кучменко О. Б. Біохімія вітамінів / О. Б. Кучменко. Київ : Університет «Україна», 2012. 528 с.
6. Міщенко С. І., Шерстюк В. І., Завгородній В. А., Копилова І. О. Технологія вирощування кукурудзи з використанням стимуляторів росту // *Науковий вісник НУБіП України*, 2017. Вип. 278. С. 112–118.
7. Ласло О. О., Мельничук А. В. Ефективність застосування регулятора Вимпел-2 та комплексного мікродобрива у посівах сої // *Scientific Progress & Innovations*. 2021. № 4. С. 24–29. DOI: <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.04.02>
8. Vicas S. I., Laslo V., Pantea S. and Bandict G. E. Chlorophyll and carotenoids pigments from Mistletoe (*Viscum album*) leaves using different solvents. *Fascicula Biologie*. 2010. Vol. 2017. 7 2. P. 213–218.
9. Єщенко В. О., Копитко П. Г., Опришко В. П., Костогриз П. В. Основи наукових досліджень в агрономії / В. О. Єщенко, П. Г. Копитко, В. П. Опришко, П. В. Костогриз. Київ : Дія, 2005. 288 с.
10. Томашевський О. В., Рисіков В. П. Комп'ютерні технології статистичної обробки даних : навчальний посібник/ за ред. О. В. Томашевського. Запоріжжя: Запорізький національний технічний університет, 2015. 175 с.

References

1. Makrushyn, M. M., Makrushyna, Ye. M., Peterson, N. V., & Melnykov, M. M. (2006). *Fiziolohiia roslyn [Plant physiology]* (M. M. Makrushyn, Ed.). Nova Knyha.
2. Mastropetros, S. G., Darras, A. I., & Matsi, T. (2023). Effect of pre-sowing seed stimulation on maize seedling vigour [Effect of pre-sowing seed stimulation on maize seedling vigour]. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(10), Article 9248. [in English]. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms252212480>
3. Lykhochvor, V. V., & Petrychenko, V. F. (2006). *Roslynnytstvo. Suchasni intensyvni tekhnolohii vyroshchuvannya osnovnykh poliovykh kultur [Crop production. Modern intensive technologies for growing major field crops]*. Lviv (Ukraine): Ukrainski Tekhnolohii. [in Ukrainian].
4. Lisovytskyi, V. V., & Kuchmenko, O. B. (2020). Vplyv metabolichno-aktyvnykh rechovyn na okremi fiziologo-biohimichni pokaznyky rostu i rozvytku ohirkiv sortu Nizhynskyi [Effect of metabolically active substances on physiological and biochemical parameters of Nizhyn cucumber growth]. *Naukovi Zapisky NaUKMA. Biolohiia ta Ekolohiia*, 3, 35–42. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.18523/2617-4529.2020.3.35-42>
5. Kuchmenko, O. B. (2012). *Biokhimiia vitaminiv [Biochemistry of vitamins]*. Kyiv (Ukraine): Universytet "Ukraina". [in Ukrainian].

6. Mishchenko, S. I., Sherstyuk, V. I., Zavgorodniy, V. A., & Kopylova, I. O. (2017). Tekhnolohiia vyroshchuvannia kukurudzy z vykorystanniam stymulatoriv rostu [Technology of maize with growth stimulants application]. *Naukovyi Visnyk NUBiP Ukrainy*, 278, 112–118. [in Ukrainian].
7. Laslo, O. O., & Melnychuk, A. V. (2021). Efektyvnist zastosuvannia rehuliatora Vympel-2 ta kompleksnoho mikrodobryva u posivakh soi [Effectiveness of Vympel-2 and complex micronutrient fertilizer in soybean crops]. *Scientific Progress & Innovations*, 4, 24–29. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.04.02>
8. Vicas S. I., Laslo V., Pantea S. and Bandict G. E. Chlorophyll and carotenoids pigments from Mistletoe (*Viscum album*) leaves using different solvents. *Fascicula Biologie*. 2010. Vol. 2017. 7 2. P. 213–218. [in English].
9. Yeshchenko, V. O., Kopytko, P. H., Opryshko, V. P., & Kostohryz, P. V. (2005). *Osnovy naukovykh doslidzhen v ahronomii* [Fundamentals of scientific research in agronomy]. Kyiv (Ukraine): Diia. [in Ukrainian].
10. Tomashievskiy O. V., Rysikov V. P. *Kompiuterni tekhnolohii statystychnoi obrobky danykh: navchalnyi posibnyk/ za red. O. V. Tomashievskoho. Zaporizhzhia Zaporizkyi natsionalnyi tekhnichniy universytet*, 2015. 175 s. [in Ukrainian].

Bogdan O.

Postgraduate Student, Department of Biology
Nizhyn Mykola Gogol State University
oleksandrbogdan840@gmail.com
orcid.org/0009-0008-1797-9522

**THE EFFECT OF PRE-SOWING TREATMENT OF CORN
WITH METABOLICALLY ACTIVE SUBSTANCES ON THE CONTENT
OF PHOTOSYNTHETIC PIGMENTS**

The article investigates the effect of pre-sowing treatment of sweet corn seeds with metabolically active substances on the content of photosynthetic pigments. The relevance of the work is due to the need to increase crop productivity by using effective biostimulants capable of optimizing physiological and biochemical processes of plants. Field studies were conducted on the basis of the educational and research agrobiostation of the Mykola Gogol Nizhyn State University using corn seeds of the Spokusa variety treated with combinations of metabolically active compounds such as vitamin E, ubiquinone-10, methionine, paraoxybenzoic acid, MgSO₄.

It was found that all the studied treatment options contributed to an increase in the chlorophyll content compared to the control. The highest values of the indicators were recorded in the option with the addition of MgSO₄, which provided the most pronounced effect, which is confirmed by the increase in the values of the indicators.

Comparison with the drug Vympel showed that certain combinations of metabolically active substances are not inferior or exceed its effectiveness in terms of the ability to stimulate the accumulation of photosynthetic pigments. The results obtained are consistent with the data on the positive effect of these combinations on morphometric indicators and plant biomass.

The results obtained indicate that pre-sowing treatment of corn seeds with metabolically active substances is an effective measure to increase the intensity of photosynthetic processes, which is manifested in an increase in the content of chlorophyll at all stages of plant development. The most pronounced and stable effect is provided by the complex action of compounds with the inclusion of MgSO₄, which indicates the feasibility of a synergistic combination of biologically active components.

In general, the use of such treatments contributes to the formation of a more active photosynthetic apparatus of plants and can be considered as a promising element of corn cultivation technology, aimed at increasing the physiological stability and potential productivity of the crop.

Keywords: sweet corn, photosynthetic pigments, chlorophyll, metabolically active substances, vitamin E, methionine, ubiquinone-10, paraoxybenzoic acid, MgSO₄.

*Стаття до редакції надійшла 07.04.2026 року
Рецензія на статтю надійшла 17.04.2026 року*

УДК 581.1:633.11:632.112

DOI 10.31654/2786-8478-2026-BN-2-16-24

Ващенко Р. А.

аспірант

Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя

vashchenkor00@gmail.com

orcid.org/0009-0004-3894-4549

Паливода Ю. М.

доктор філософії,

викладач кафедри біології

Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя

yulia.palivoda@gmail.com

orcid.org/0000-0001-6544-3441

ВПЛИВ МЕТАБОЛІЧНО АКТИВНИХ СПОЛУК НА ФІЗІОЛОГО-БІОХІМІЧНІ ПОКАЗНИКИ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ РОСЛИН

Забезпечення високої урожайності та біологічної продуктивності сільськогосподарських культур продовжує бути ключовим завданням сучасного рослинництва. Одним із перспективних шляхів вдосконалення агротехнологій є використання метаболічно активних речовин у процесах вирощування сільськогосподарської продукції. Вони здатні значно активізувати фізіологічні та біохімічні процеси в рослинах, підвищувати їхню стійкість до стресових умов і сприяти забезпеченню високих показників врожайності. Особливу важливість має дослідження ефективності застосування метаболічно активних речовин негормональної природи, що включають амінокислоти, вітаміни, сполуки, подібні до вітамінів, органічні кислоти та макроелементи, які беруть участь у ключових процесах метаболізму. Зазначені сполуки здійснюють важливі регуляторні та структурні функції, прямо впливаючи на інтенсивність фотосинтетичних процесів, активність ферментних систем, синтез білків, нуклеїнових кислот та вторинних метаболітів. Амінокислоти виконують не лише роль структурних компонентів білків, але також виступають як сигнальні молекули, що контролюють адаптивні реакції рослинних організмів. Вітаміни й сполуки з вітаміноподібними властивостями активно залучені до функціонування антиоксидантної системи, сприяючи захисту клітин від ушкоджень, спричинених оксидативним стресом. Органічні кислоти беруть участь у регуляції кислотно-лужного балансу, входять до метаболічних шляхів циклу трикарбонових кислот і забезпечують ефективну мобілізацію поживних елементів. Макроелементи відіграють ключову роль як невід'ємні складові біомолекул, визначаючи перебіг основних енергетичних та пластичних процесів у клітині.

Питання щодо вивчення впливу метаболічно активних сполук на фізіолого-біохімічні показники сільськогосподарських рослин мають вагомe значення для наукового підґрунтя та розробки новітніх підходів до передпосівної обробки насіння і позакореневого живлення рослин, що, своєю чергою, дозволить збільшити продуктивність агроecosистем і забезпечити стабільність врожайів.

Ключові слова: метаболічно активні речовини, обробка насіння, амінокислоти, вітаміни, органічні кислоти, макроелементи.

В умовах сьогодення сільськогосподарське виробництво проходить непростий етап, спрямований на досягнення оптимального балансу між підтримкою стабільно високої врожайності культур і зменшенням негативного впливу на агроecosистеми.

Традиційні схеми, які базуються переважно на інтенсивному застосуванні мінеральних добрив і хімічних засобів захисту рослин, поступово досягають своїх меж, як з економічної, так і з екологічної точки зору. У цьому контексті все більшої популярності набуває використання метаболічно активних речовин негормональної природи. Ці сполуки можуть вкрай ефективно і цілеспрямовано сприяти регулюванню фізіолого-біохімічних процесів у рослинах, навіть при застосуванні їх у низьких концентраціях.

Сучасні дослідження доводять, що окрім традиційних фітогормонів, значну роль у регуляторних і метаболічних процесах відіграють такі речовини, як амінокислоти, вітаміни, вітаміноподібні речовини, органічні кислоти та макро- та мікроелементи [1, 2]. Незважаючи на їхню потенційну ефективність, особливо у системах позакореневого живлення рослин або при передпосівній обробці насіння, їхнє практичне застосування на сьогодні реалізується досить обмежено. Наукове ж обґрунтування комплексного використання цих сполук часто має нестійкий або невпорядкований характер, що створює певні виклики для впровадження нових підходів у сучасному агровиробництві [3].

Однією з провідних культур світового рослинництва є пшениця. Її посівні площі переважають у більшості країн, а її ключова роль у забезпеченні продовольчої безпеки людства пояснюється тим, що зерно цієї культури є основною сировиною для виробництва харчових продуктів. Завдяки високій поживній цінності, широкому спектру застосування та здатності адаптуватися до різних екологічних умов, пшениця отримала статус стратегічної культури у багатьох країнах. Вона становить значну частину національних продовольчих запасів і відіграє важливу роль у стабільності аграрного сектора економіки [4].

В Україні пшениця відіграє надзвичайно важливу роль, займаючи значну частку посівних площ і будучи однією з ключових стратегічних культур, що забезпечують продовольчу безпеку країни [5, 6]. Сучасні умови господарювання, кліматичні зміни та зростаючий попит на продовольство вимагають підвищення продуктивності пшениці та удосконалення методів її вирощування [5]. Особливі виклики постають через зміни клімату, такі як зростання температур під час вегетаційного періоду та зміна режимів вологості, що вкрай актуально для посушливих регіонів. Для досягнення стабільних і високих урожаїв необхідно постійно вдосконалювати технології агровиробництва [6].

У цьому контексті використання метаболічно активних речовин виглядає особливо перспективним і актуальним як невід'ємна складова сучасних підходів до вирощування зернових культур. Їх значення важко переоцінити, особливо в умовах зростаючої частоти абіотичних стресів, які дедалі рідше оминають українські степові та лісостепові регіони. Зважаючи на динамічні кліматичні зміни та збільшення числа екстремальних природних явищ, метаболічно активні речовини можуть слугувати дієвим інструментом для підтримання стабільності агроєкосистем і підвищення врожайності сільськогосподарських культур у несприятливих умовах [1].

Для розуміння механізмів впливу метаболічно активних речовин і обґрунтування їхньої доцільності у технологіях вирощування зернових культур важливо детально проаналізувати дію окремих груп цих сполук на ключові фізіологічні процеси на різних етапах онтогенезу рослин.

Польова схожість насіння виступає одним із важливих показників, що впливають на майбутню продуктивність сільськогосподарських культур. У сучасному рослинництві дедалі більше уваги приділяється застосуванню метаболічно активних речовин, які сприяють стимуляції проростання насіння та підвищують його здатність протистояти несприятливим умовам навколишнього середовища.

Амінокислоти належать до однієї із найбільш ґрунтовно досліджених груп метаболічно активних сполук у застосуванні для передпосівної обробки насіння. Обробка насіння γ -аміномасляною кислотою стимулює процес проростання, активуючи сигнальні шляхи, які регулюють генерацію пероксиду водню, який в оптимальних концентраціях виконує функцію позитивного сигналу, що ініціює проростання [7]. У

дослідженні [8] встановлено, що передпосівна обробка насіння пшениці 5-амінолевуліновою кислотою значно підвищує схожість насіння та стійкість пшениці до високих температур та нестачі вологи. Це забезпечує високий відсоток схожості насіння порівняно з контролем. У дослідженні [9] було встановлено, що використання стрес-протекторних сполук, зокрема амінокислоти проліну, сприяє значному покращенню фізіологічного стану рослин солодкого перцю за умов сольового стресу. Це позитивно позначається на ростових процесах на початкових етапах їх розвитку. Хоча основна увага в роботі приділяється вегетуючим рослинам, виявлені механізми, такі як зниження проникності мембран для електролітів, зменшення рівня малонового діальдегіду й активних форм кисню, а також підвищення активності антиоксидантних ферментів, є важливими і для процесів проростання насіння в умовах стресу. У дослідженні [10] було визначено, що позакоренева обробка рослин L-метіоніном за умов водного дефіциту позитивно впливала на ключові показники росту гарбуза. Зокрема, відзначалися збільшення сирі та сухої маси пагонів, а також зростання довжини як пагонів, так і коренів. Аналіз отриманих даних дозволив науковцям зробити висновок про здатність метіоніну стимулювати процеси росту. Це виявляється особливо важливим для ранніх фаз розвитку рослин, адже застосування цієї речовини сприяє підвищенню енергії проростання насіння та покращенню їх схожості навіть за умов стресових факторів навколишнього середовища [11]. У дослідженні [12] встановлено, що передпосівна обробка насіння сої амінокислотами, такими як аспарагінова кислота, глутамінова кислота, лейцин, пролін, лізин і валін, позитивно позначається на метаболічній активності проростків. Цей вплив виражається у значному посиленні системи антиоксидантного захисту рослин, а саме у підвищенні активності ключових ферментів – аскорбатпероксидази та глутатіонредуктази, які виконують важливу роль у нейтралізації активних форм кисню в листках сої. Це дозволяє значно знизити рівень оксидативного стресу на ранніх етапах розвитку рослин. Дослідники особливо наголошують на універсальності застосування амінокислот, які можуть використовуватись не лише для передпосівної обробки насіння, але й для позакореневого підживлення. Такі заходи виявилися ефективним механізмом регуляції росту та підвищення стійкості культури до стресових умов.

У дослідженні [13] встановили, що екзогенне застосування поліамінів, таких як спермін і путресцин, сприяє значному підвищенню посухостійкості пшениці. Незважаючи на те, що головна увага приділялася впливу цих речовин на вегетуючі рослини, важливо зазначити, що поліаміни також виконують надзвичайно важливі функції на початкових етапах розвитку рослин – зокрема, у процесі проростання насіння. Їхня роль полягає у регуляції поділу клітин, стимулюванні синтезу нуклеїнових кислот і забезпеченні захисту клітинних мембран від пошкодження, яке може бути спричинене оксидативним стресом. Виходячи з цього, передпосівна обробка насіння за допомогою поліамінів розглядається як перспективний і ефективний метод для підвищення енергії проростання насіння пшениці, а також забезпечення її високої польової схожості навіть за умов обмеженого зволоження.

Ключову роль у метаболічних процесах, що інтенсивно активуються під час проростання насіння, відіграють вітаміни та вітаміноподібні сполуки. В рамках наукового дослідження [14] було встановлено, що вітаміни, особливо вітаміни групи В, вітамін С та Е, виконують функцію як біостимулятори росту рослин. Це зумовлено їхньою участю в якості кофакторів ферментативних реакцій, регуляторними властивостями у функціонуванні сигнальних шляхів та захистом клітин від оксидативного стресу. Вітаміни групи В, такі як тіамін, піридоксин і ніацин, стимулюють роботу ключових ферментів дихального ланцюга, що забезпечує енергію для мобілізації запасних речовин ендосперму. У працях [1, 11] підкреслюється, що екзогенне застосування α -токоферолу істотно підвищує схожість насіння пшениці, сприяє розвитку кореневої системи і стимулює ріст пагонів в умовах посухи. Група американських вчених вивчала вплив передпосівної обробки насіння аскорбіновою кислотою (вітамін

С) на ріст та розвиток вігни (*Vigna unguiculata* L.) [15]. Встановлено, що обробка насіння розчином аскорбінової кислоти суттєво покращила енергію проростання, польову схожість, а також довжину та масу пагонів і коренів порівняно з контролем. Автори роблять висновок, що аскорбінова кислота діє як ефективний біостимулятор, який можна рекомендувати для покращення посівних якостей насіння та раннього росту рослин.

Поряд із вітамінами, органічні кислоти також відіграють важливу роль у регуляції метаболічних процесів в тканинах рослин. Досліджуючи вплив різних органічних кислот, таких як лимонна, яблучна, бурштинова та оцтова, на процес проростання насіння та початковий ріст проростків кількох видів рослин [16], групою вчених встановлено, що низькі концентрації цих кислот сприяли підвищенню енергії проростання і подовженню кореневої системи, тоді як високі концентрації проявили інгібуючий вплив. Найсильніший позитивний ефект мали бурштинова та лимонна кислоти, які сприяли активації α -амілази та підвищенню вмісту розчинних цукрів у проростках. Дослідники припустили, що стимулюючий ефект низьких концентрацій зумовлений посиленням дихального метаболізму та активізацією циклу Кребса. Досліджуючи вплив саліцилової кислоти на фізіологічні властивості сільськогосподарських культур вчені дійшли до висновку [17], що передпосівна обробка насіння саліциловою кислотою сприяє покращенню проростання і росту рослин в умовах стресу. Це відбувається завдяки активації антиоксидантних ферментів, таких як супероксиддисмутаза, каталаза і пероксидаза, які знижують рівень активних форм кисню та накопичення малонового діальдегіду. Саліцилова кислота також стимулює накопичення осмопротекторів, зокрема проліну та розчинних цукрів, що покращує водний баланс і стабільність мембранних структур рослин. Додатково, використання саліцилової кислоти підвищує кількість фотосинтетичних пігментів та ефективність фотосинтезу. Вона допомагає підтримувати іонний гомеостаз і модулює гормональний баланс: посилює синтез гіберелінів і знижує концентрацію абсцизової кислоти. Усі ці ефекти в сукупності значно покращують стресостійкість рослин, підвищують їх врожайність та якість продукції. В результаті порівняльного дослідження [18] впливу передпосівної обробки насіння ярої та озимої пшениці параоксibenзойною та саліциловою кислотою встановлено, що параоксibenзойна кислота підвищувала морозостійкість озимої пшениці та стійкість ярої пшениці до короткотривалої посухи. На відміну від параоксibenзойної кислоти, саліцилова кислота знижувала ці показники, навіть за умов підвищеної активності антиоксидантних ферментів. Тож, параоксibenзойна кислота є ефективнішим засобом для посилення стійкості пшениці до абіотичних стресів, таких як посуха та мороз, у порівнянні із саліциловою кислотою. При цьому позитивний ефект від її використання не завжди пов'язаний зі збільшенням активності антиоксидантних ферментів.

Окрім згаданих раніше органічних сполук, макроелементи відіграють надзвичайно важливу роль у складі метаболічно активних речовин. Макроелементи, такі як азот, фосфор, калій, кальцій, магній і сірка, виступають ключовими компонентами важливих біомолекул, зокрема білків, нуклеїнових кислот, хлорофілу та АТФ, забезпечуючи клітинам енергетичну підтримку, структурну цілісність та регуляторні функції [19]. Оптимальний рівень цих елементів визначає інтенсивність клітинного поділу, розвиток кореневої системи, активність фотосинтезу та загальну продуктивність рослин. Обробка насіння розчинами макроелементів перед посівом є результативним агротехнічним заходом, що забезпечує рослинам доступне живлення на ранніх стадіях розвитку, коли коренева система ще не сформувалась повністю. В дослідженні [20] показано, що використання макроелементів у складі сольових розчинів для передпосівної обробки насіння стимулює активізацію ранніх метаболічних процесів, включаючи підвищення ферментативної активності, посилення антиоксидантного захисту та стабілізацію клітинних мембран. Завдяки цьому досягається швидше і більш рівномірне проростання насіння, зростає життєздатність проростків і

поліпшується їх адаптаційний потенціал. Дослідження [21] підтверджує, що азотне живлення відіграє ключову роль у підвищенні врожайності озимої пшениці, а також у збільшенні вмісту білка в зерні. В дослідженні [22] продемонстровано, що перед-посівна обробка насіння пшениці солями калію та магнію є перспективним методом оптимізації посівних властивостей і стимулювання початкового розвитку рослин. Зокрема, замочування насіння у розчині KNO_3 призвело до значного підвищення енергії проростання та збільшення довжини проростків. Використання K_2SO_4 сприяло найбільшому подовженню коренів та наростанню сухої маси проростків, що має важливе значення для формування здорової кореневої системи. В дослідженні [23] було встановлено, що замочування насіння у розчині $MgSO_4$ позитивно впливає на низку фізіологічних показників. Така обробка сприяла підвищенню концентрації фотосинтетичних пігментів і білків, що, своєю чергою, покращує процеси фотосинтезу та загальне функціонування рослин у ранній фазі розвитку. Таким чином, застосування відповідних сольових розчинів може стати дієвим інструментом підвищення продуктивності зернових культур.

Висновки. Аналіз сучасних наукових досліджень засвідчує, що метаболічно активні речовини негормонального походження, до яких належать амінокислоти, вітаміни, вітаміноподібні речовини, органічні кислоти та макроелементи, є ефективними та екологічно безпечними засобами регуляції фізіолого-біохімічних процесів у сільськогосподарських рослин. Водночас їх ефективність демонструє значну варіабельність, яка зумовлена складною взаємодією різних факторів, зокрема біологічними особливостями культури, концентрацією активної сполуки, методом внесення та стадією розвитку рослин. Незважаючи на вагомий науковий доробок у дослідженні механізмів дії таких речовин, питання створення та адаптації біопрепаратів на їх основі для конкретних сільськогосподарських культур у різних ґрунтово-кліматичних умовах потребує подальшого ґрунтового вивчення. Отримані результати формують теоретичну базу і мають практичне значення для впровадження екологічно безпечних технологій, спрямованих на підвищення врожайності, покращення якості продукції та зміцнення стійкості сільськогосподарських культур до стресових факторів, що набуває особливої важливості в умовах глобальних кліматичних змін.

Список використаних джерел

1. Havii, V., Palyvoda, Y., Kuchmenko, O., Stamirowska-Krzaczek, E., Tomaszewska, M. & Kocira, A. Biochemical Mechanisms of Drought Resistance in Soft Wheat Under Modeling of Water Deficiency and Effects of Seed Treatment with Metabolically Active Substances. *Agricultural Engineering*, 2025. 29(1), 2025. 15-31. DOI: <https://doi.org/10.2478/agriceng-2025-0002>.
2. Bhatla S. C., Ranjan P., Singh N., Gogna M. Pure biochemicals and nanomaterials as next generation biostimulants for sustainable agriculture under abiotic stress – recent advances and future scope. *Plant Signaling & Behavior*. 2023. Vol. 18, no. 1. P. 2290336. DOI: <https://doi.org/10.1080/15592324.2023.2290336>
3. Ciriello M., Izzo L., Dopazo A. N., Campana E., Colla G., Corrado G., De Pascale S., Rouphael Y., El-Nakhel C. Differential Effects of Non-Microbial Biostimulants on Secondary Metabolites and Nitrate Content in Organic Arugula Leaves. *Foods*. 2025. Vol. 14, no. 14. P. 2489. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14142489>
4. Кириленко В. В., Рябчун В. К. Продуктивність сортів пшениці озимої залежно від умов вирощування. *Вісник аграрної науки*. 2021. № 3. С. 45–52.
5. Strapchuk O., Manaloor V., Strapchuk S. Assessment of the impact of factors on the yield of strategic crops in Ukraine under climate change. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*. 2026. Vol. 12, no. 1. P. 9. DOI: <https://doi.org/10.51599/are.2026.12.01.09>
6. Romero V., Schultz A.R., Powlen K., Shah S.D. Climate-smart agriculture for Ukraine: Winter wheat breeding for food security and climate adaptation. *U.S. Geological Survey, Department of Interior International Technical Assistance Program*. 2024. 62 p.

7. Yu, S., Lian, Z., Yu, L., Guo, W., Zhang, C., & Zhang, Y. (2024). Gamma-aminobutyric acid elicits H₂O₂ signalling and promotes wheat seed germination under combined salt and heat stress. *PeerJ*, 12, e17907. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.17907>.
8. Suliman M.S.E., et al. Seeds primed with 5-aminolevulinic acid mitigated temperature and drought stresses of wheat at germination and early seedling growth. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2022. Vol. 82, no. 1. P. 111-123. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392022000100111>
9. Abdelaal KAA, El-Maghraby LM, Elansary H, Hafez YM, Ibrahim EI, El-Banna M, El-Esawi M, Elkelish A. Treatment of sweet pepper with stress tolerance-inducing compounds alleviates salinity stress oxidative damage by mediating the physio-biochemical activities and antioxidant systems. *Agronom*. 2020; 10(1), 26. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10010026>
10. Akram NA, Umm-E-Hani M, Sadiq M, Ashraf M, Sadiq M. Exogenous application of L-methionine mitigates the drought-induced oddities in biochemical and anatomical responses of bitter melon (*Momordica charantia* L.). *Sci Hort*. 2020; 267:109333. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109333>
11. Паливода Ю.М., Гавій В.М., Кучменко О.Б. Фізіолого-біохімічні показники проростків пшениці м'якої (*Triticum aestivum* L.) при моделюванні водного дефіциту за дії метаболічно активних сполук. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Біологія*, 2021. № 3 (81). С. 44-54. DOI: <https://doi.org/10.25128/20782357.21.3.7>.
12. Teixeira WF, Fagan FB, Soares LH, Umburanas RC, Reichardt K, Neto DD. Foliar and seed application of amino acids affects the antioxidant metabolism of the soybean crop. *Front Plant Sci*. 2017;8:327. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00327>.
13. Hassan N, Ebeed H, Aljaarany A. Exogenous application of spermine and putrescine mitigate adversities of drought stress in wheat by protecting membranes and chloroplast ultra-structure. *Physiol Mol Biol Plants*. 2020;26(2):233–245. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12298-019-00744-7>.
14. Boubakri H., Gargouri M., Mliki A., Brini F., Chong J., Jbir M. Vitamins for enhancing plant resistance to biotic and abiotic stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2022. Vol. 183. P. 12-23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00425-016-2552-0>.
15. Khadka, S., Khanal, A., Gairhe, B., & Thapa, V. R. (2025). Effect of Seed Priming by Ascorbic Acid on Seed Germination and Seedling Growth of Cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp). *Global Journal of Agricultural and Allied Sciences*, 6(1), 18-21. DOI: <https://doi.org/10.35251/gjaas.2025.010>
16. Nakasone Y., Kobayashi M., Tsurumi S. Effects of organic acids on seed germination and early seedling growth. *Journal of Plant Research*. 2018. Vol. 131. P. 47–55.
17. Decsi, K.; Ahmed, M.; Abdul-Hamid, D.; Tóth, Z. The Role of Salicylic Acid in Activating Plant Stress Responses – Results of the Past Decade and Future Perspectives. *Int. J. Mol. Sci*. 2025, 26, 4447. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms26094447>
18. Horvath E., Pál M., Szalai G., Paldi E., Janda T. Exogenous 4-hydroxybenzoic acid and salicylic acid modulate the effect of short-term drought and freezing stress on wheat plants. *Biologia Plantarum*. 2007. Vol. 51, no. 3. P. 480-487. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10535-007-0101-1>
19. Каленська С. М., Новицька Н. В., Андрійчук В. Г. Фізіологія рослин : навч. посіб. Київ : НАУ, 2018. 440 с.
20. Gohari G., Spanos A., Ioannou A., Efstathiou I., Panahirad S., Kolbert Z., Fotopoulos V. Seed priming approaches for climate-resilient agriculture. *Journal of Experimental Botany*. 2026. Vol. 77, No. 7. P. 2013–2026. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/eraf440>
21. Іваніна В., Коротенко І. Вплив доз і способів унесення азотних добрив на врожайність та якість зерна пшениці озимої. *Вісник аграрної науки*. 2022. № 11 (836). С. 5-12. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202211-01>.
22. Yadav, R.; Gupta, M.; Salman, M.; Gupta, P.; Jyoti Standardization of Halo-priming and Nutri-priming for enhancing seed quality parameters in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Int. J. Chem. Stud*. 2021, 9, 3540–3546, DOI: <https://doi.org/10.22271/chemi.2021.v9.i1ax.11780>.
23. Kanjevac, M., Bojovic, B., Jakovljevic, D. Improvement of physiological performance of selected cereals by modulating pregerminative metabolic activity in seeds. *CEREAL RESEARCH COMMUNICATIONS*. 2022, 50, 831–839. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42976-021-00213-6>.

References

1. Havii, V., Palyvoda, Y., Kuchmenko, O., Stamirowska-Krzaczek, E., Tomaszewska, M., & Kocira, A. (2025). Biochemical mechanisms of drought resistance in soft wheat under modeling of water deficiency and effects of seed treatment with metabolically active substances. *Agricultural Engineering*, 29(1), 15–31. <https://doi.org/10.2478/agriceng-2025-0002>. [in English]
2. Bhatla, S. C., Ranjan, P., Singh, N., & Gogna, M. (2023). Pure biochemicals and nanomaterials as next generation biostimulants for sustainable agriculture under abiotic stress – recent advances and future scope. *Plant Signaling & Behavior*, 18(1), 2290336. <https://doi.org/10.1080/15592324.2023.2290336>. [in English].
3. Ciriello, M., Izzo, L., Dopazo, A. N., Campana, E., Colla, G., Corrado, G., De Pascale, S., Rouphael, Y., & El-Nakhel, C. (2025). Differential effects of non-microbial biostimulants on secondary metabolites and nitrate content in organic arugula leaves. *Foods*, 14(14), 2489. <https://doi.org/10.3390/foods14142489>. [in English].
4. Kyrylenko, V. V., & Riabchun, V. K. (2021). Produktyvniyst sortiv pshenytsi ozymoi zalezno vid umov vyroshchuvannia [Productivity of winter wheat varieties depending on growing conditions]. *Visnyk ahramoi nauky [Bulletin of Agricultural Science]*, (3), 45–52. [in Ukrainian].
5. Strapchuk, O., Manaloor, V., & Strapchuk, S. (2026). Assessment of the impact of factors on the yield of strategic crops in Ukraine under climate change. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*, 12(1), 9. <https://doi.org/10.51599/are.2026.12.01.09>. [in English].
6. Romero, V., Schultz, A. R., Powlen, K., & Shah, S. D. (2024). Climate-smart agriculture for Ukraine: Winter wheat breeding for food security and climate adaptation. *U.S. Geological Survey*. [in English].
7. Yu, S., Lian, Z., Yu, L., Guo, W., Zhang, C., & Zhang, Y. (2024). Gamma-aminobutyric acid elicits H₂O₂ signalling and promotes wheat seed germination under combined salt and heat stress. *PeerJ*, 12, e17907. <https://doi.org/10.7717/peerj.17907>. [in English].
8. Suliman, M. S. E., et al. (2022). Seeds primed with 5-aminolevulinic acid mitigated temperature and drought stresses of wheat at germination and early seedling growth. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 82(1), 111–123. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392022000100111>. [in English].
9. Abdelaal, K. A. A., El-Maghraby, L. M., Elansary, H., Hafez, Y. M., Ibrahim, E. I., El-Banna, M., El-Esawi, M., & Elkelish, A. (2020). Treatment of sweet pepper with stress tolerance-inducing compounds alleviates salinity stress oxidative damage by mediating the physio-biochemical activities and antioxidant systems. *Agronomy*, 10(1), 26. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010026>. [in English].
10. Akram, N. A., Umm-E-Hani, M., Sadiq, M., & Ashraf, M. (2020). Exogenous application of L-methionine mitigates the drought-induced oddities in biochemical and anatomical responses of bitter melon (*Momordica charantia* L.). *Scientia Horticulturae*, 267, 109333. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109333>. [in English].
11. Palyvoda, Y. M., Havii, V. M., & Kuchmenko, O. B. (2021). Fiziolo-ho-biokhimichni pokaznyky prorostkiv pshenytsi miakoi (*Triticum aestivum* L.) pry modeliuvanni vodnoho defitsytu za dii metabolichno aktyvnykh spoluk [Physiological and biochemical indices of soft wheat seedlings under simulated water deficit and action of metabolically active compounds]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Seriya: Biolo-hiia [Scientific Notes of Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. Series: Biology]*, (3), 44–54. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.21.3.7>. [in Ukrainian]
12. Teixeira, W. F., Fagan, F. B., Soares, L. H., Umburanas, R. C., Reichardt, K., & Neto, D. D. (2017). Foliar and seed application of amino acids affects the antioxidant metabolism of the soybean crop. *Frontiers in Plant Science*, 8, 327. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00327>. [in English].
13. Hassan, N., Ebeed, H., & Aljaarany, A. (2020). Exogenous application of spermine and putrescine mitigate adversities of drought stress in wheat by protecting membranes and chloroplast ultra-structure. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 26(2), 233–245. <https://doi.org/10.1007/s12298-019-00744-7>. [in English].

14. Boubakri, H., Gargouri, M., Mliki, A., Brini, F., Chong, J., & Jbir, M. (2022). Vitamins for enhancing plant resistance to biotic and abiotic stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*, 183, 12–23. <https://doi.org/10.1007/s00425-016-2552-0>. [in English].
 15. Khadka, S., Khanal, A., Gairhe, B., & Thapa, V. R. (2025). Effect of seed priming by ascorbic acid on seed germination and seedling growth of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp). *Global Journal of Agricultural and Allied Sciences*, 6(1), 18–21. <https://doi.org/10.35251/gjaas.2025.010>. [in English].
 16. Nakasone, Y., Kobayashi, M., & Tsurumi, S. (2018). Effects of organic acids on seed germination and early seedling growth. *Journal of Plant Research*, 131, 47–55. [in English].
 17. Decsi, K., Ahmed, M., Abdul-Hamid, D., & Tóth, Z. (2025). The role of salicylic acid in activating plant stress responses – results of the past decade and future perspectives. *International Journal of Molecular Sciences*, 26, 4447. <https://doi.org/10.3390/ijms26094447> [in English].
 18. Horváth, E., Pál, M., Szalai, G., Páldi, E., & Janda, T. (2007). Exogenous 4-hydroxybenzoic acid and salicylic acid modulate the effect of short-term drought and freezing stress on wheat plants. *Biologia Plantarum*, 51(3), 480–487. <https://doi.org/10.1007/s10535-007-0101-1>. [in English].
 19. Kalenska, S. M., Novytska, N. V., & Andriichuk, V. H. (2018). Fiziologia roslin [Plant physiology]. Kyiv: NAU. [in Ukrainian].
 20. Gohari, G., Spanos, A., Ioannou, A., Efstathiou, I., Panahirad, S., Kolbert, Z., & Fotopoulos, V. (2026). Seed priming approaches for climate-resilient agriculture. *Journal of Experimental Botany*, 77(7), 2013–2026. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraf440>. [in English].
 21. Ivanina, V., & Korotenko, I. (2022). Vplyv doz i sposobiv unesennia azotnykh dobryv na vrozhaist ta yakist zerna pshenytsi ozymoi [Influence of doses and methods of nitrogen fertilizer application on yield and grain quality of winter wheat]. *Visnyk ahromoi nauky [Bulletin of Agricultural Science]*, (11), 5–12. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202211-01>. [in Ukrainian].
 22. Yadav, R., Gupta, M., Salman, M., Gupta, P., & Jyoti. (2021). Standardization of halo-priming and nutri-priming for enhancing seed quality parameters in wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Chemical Studies*, 9, 3540–3546. <https://doi.org/10.22271/chemi.2021.v9.i1ax.11780>. [in English].
 23. Kanjevac, M., Bojović, B., Jakovljević, D. (2022). Improvement of physiological performance of selected cereals by modulating pregerminative metabolic activity in seeds. *Cereal Research Communications*, 50, 831–839. <https://doi.org/10.1007/s42976-021-00213-6>. [in English].
-

Vashchenko R.

Postgraduate Student, Department of Biology
Nizhyn Mykola Gogol State University
vashchenkor00@gmail.com
orcid.org/0009-0004-3894-4549

Palyvoda Yu.

Doctor of Philosophy,
Lecturer of the Department of Biology
Nizhyn Mykola Gogol State University
yulia.palivoda@gmail.com
orcid.org/0000-0001-6544-3441

INFLUENCE OF METABOLICALLY ACTIVE COMPOUNDS ON THE PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL INDICATORS OF AGRICULTURAL PLANTS

Ensuring high yields and biological productivity of agricultural crops continues to be a key task of modern crop production. One of the promising ways to improve agricultural technologies is the use of metabolically active substances in the processes of growing

agricultural products. They are able to significantly activate physiological and biochemical processes in plants, increase their resistance to stress conditions and contribute to ensuring high yield rates. Of particular importance is the study of the effectiveness of the use of metabolically active substances of a non-hormonal nature, including amino acids, vitamins, vitamin-like compounds, organic acids and macroelements that participate in key metabolic processes. These compounds perform important regulatory and structural functions, directly affecting the intensity of photosynthetic processes, the activity of enzyme systems, the synthesis of proteins, nucleic acids and secondary metabolites. Amino acids perform not only the role of structural components of proteins, but also act as signaling molecules that control the adaptive reactions of plant organisms. Vitamins and compounds with vitamin-like properties are actively involved in the functioning of the antioxidant system, contributing to the protection of cells from damage caused by oxidative stress. Organic acids participate in the regulation of acid-base balance, enter the metabolic pathways of the tricarboxylic acid cycle and ensure effective mobilization of nutrients. Macroelements play a key role as integral components of biomolecules, determining the course of the main energy and plastic processes in the cell.

The issues of studying the influence of metabolically active compounds on the physiological and biochemical parameters of agricultural plants are of great importance for the scientific basis and development of new approaches to pre-sowing seed treatment and foliar plant nutrition, which, in turn, will allow increasing the productivity of agroecosystems and ensuring crop stability.

Key words: metabolically active substances, seed treatment, amino acids, vitamins, organic acids, macroelements.

*Стаття до редакції надійшла 27.03.2026 року
Рецензія на статтю надійшла 14.04.2026 року*

УДК 631.531.04:577.1:633.16:581.144
DOI 10.31654/2786-8478-2026-BN-2-25-34

Ворона В. І.

аспірант кафедри біології
Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя
voronavladyaslav@ndu.edu.ua
orcid.org/0009-0004-6380-7554

Гавій В. М.

кандидат біологічних наук, доцент кафедри біології
Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя
gaviyv@gmail.com
orcid.org/0000-0002-2604-0456

**ФІЗІОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ ЯЧМЕНЮ ЯРОГО ЗА ПЕРЕДПОСІВНОЇ
ОБРОБКИ НАСІННЯ МЕТАБОЛІЧНО АКТИВНИМИ РЕЧОВИНАМИ**

Ярий ячмінь є однією з провідних зернових культур, що має важливе значення для аграрного сектору України та інших країн. Як культура весняного висіву, він проходить повний цикл розвитку протягом одного вегетаційного періоду, що забезпечує можливість його вирощування в регіонах із холодними зимами та нестабільними кліматичними умовами. Ячмінь широко використовують у кормо-виробництві, пивоварній промисловості для отримання солоду, а також у харчовій сфері. Завдяки високому вмісту крохмалю та білка він є цінним компонентом кормових сумішей.

Важливим чинником росту та продуктивності ярого ячменю є розвиток кореневої системи. Вона забезпечує рослини водою й поживними речовинами, а її активне формування на ранніх етапах онтогенезу підвищує стійкість культури до несприятливих умов довкілля. У зв'язку з цим актуальним є застосування передпосівної обробки насіння метаболічно активними речовинами як елементу сучасних технологій вирощування зернових культур. Дослідження свідчать, що метаболічно активні речовини стимулюють утворення коренів. Їх дія пов'язана з регуляцією гормонального балансу, активізацією клітинного поділу й росту в зоні корневих меристем, що сприяє формуванню більш розвиненої кореневої системи.

Це має особливе значення для ярого ячменю, який чутливий до дефіциту вологи та елементів живлення. Передпосівна обробка насіння сприяє збільшенню кількості додаткових коренів і посиленню їх росту, що покращує засвоєння ґрунтових ресурсів та адаптивні властивості рослин. Водночас ефективність дії метаболічно активних речовин залежить від їх складу, концентрації та біологічних особливостей сорту. Недостатньо дослідженим залишається вплив передпосівної обробки насіння метаболічно активними речовинами на розвиток кореневої системи ярого ячменю в умовах Чернігівської області.

Ключові слова: коренева система, бічні корені, хлорофіл, фотосинтетичні пігменти, кушення, колосіння.

Постановка проблеми. В умовах сучасного сільськогосподарського виробництва актуальним є пошук ефективних способів підвищення продуктивності ярого ячменю та його стійкості до несприятливих факторів довкілля. Одним із ключових чинників, що визначають ріст і розвиток рослин, є формування потужної кореневої системи, яка забезпечує ефективне поглинання води та елементів мінерального

живлення. Особливого значення це набуває в умовах нестабільного зволоження та зниження родючості ґрунтів, характерних для багатьох регіонів України.

Серед сучасних агротехнологічних заходів значну увагу приділяють передпосівній обробці насіння фізіологічно та метаболічно активними речовинами, здатними стимулювати проростання насіння, активізувати процеси коренеутворення та підвищувати адаптивні можливості рослин. Водночас ефективність дії таких речовин залежить від їх складу, концентрації, умов вирощування та біологічних особливостей культури. Незважаючи на наявність окремих досліджень щодо використання стимуляторів росту у зернових культур, вплив передпосівної обробки насіння метаболічно активними речовинами на розвиток кореневої системи ярого ячменю в умовах Чернігівської області вивчений недостатньо. Це зумовлює необхідність проведення досліджень, спрямованих на оцінку ефективності застосування таких речовин та їх впливу на морфо-фізіологічні показники рослин ярого ячменю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фізіологічні показники ярого ячменю значною мірою залежать від умов вирощування та застосування сучасних агротехнологічних прийомів, зокрема передпосівної обробки насіння фізіологічно активними речовинами [1–5]. У сучасних дослідженнях значна увага приділяється пошуку способів підвищення продуктивності зернових культур шляхом стимулювання фізіолого-біохімічних процесів у рослинах на ранніх етапах онтогенезу [6].

Встановлено, що передпосівна обробка насіння фізіологічно активними речовинами позитивно впливає на енергію проростання, схожість насіння та інтенсивність ростових процесів [7]. Дослідники відзначають, що застосування стимуляторів росту сприяє активізації ферментативної діяльності, посиленню синтезу білків і фотосинтетичних пігментів, а також оптимізації водного обміну рослин [7, 8]. Особливу роль у формуванні продуктивності ярого ячменю відіграє фотосинтетичний апарат, ефективність функціонування якого визначається вмістом хлорофілів та інтенсивністю накопичення органічної речовини [8].

За дослідженнями вчених, фізіологічно активні речовини здатні регулювати гормональний баланс рослин, стимулюючи процеси клітинного поділу та росту [8]. Це сприяє активнішому формуванню листової поверхні, посиленню розвитку кореневої системи та підвищенню адаптивного потенціалу рослин до дії абіотичних стресових чинників [6, 9]. Деякі автори вказують, що передпосівна обробка насіння фізіологічно активними речовинами забезпечує збільшення вмісту хлорофілу *a* і *b*, що позитивно впливає на інтенсивність фотосинтезу та продуктивність зернових культур [8].

Важливим показником фізіологічного стану рослин є також розвиток кореневої системи, яка забезпечує ефективне поглинання води та елементів мінерального живлення [5]. Доведено, що стимулятори росту можуть посилювати ризогенез, збільшувати кількість додаткових коренів та їх довжину, що покращує використання ґрунтових ресурсів [6, 9]. Це має особливе значення для ярого ячменю, який характеризується підвищеною чутливістю до дефіциту вологи та поживних речовин [5].

Незважаючи на значну кількість досліджень, питання впливу передпосівної обробки насіння метаболічно активними речовинами на фізіологічні показники ярого ячменю в конкретних ґрунтово-кліматичних умовах, зокрема в умовах Чернігівської області, залишається недостатньо вивченими.

Мета статті. Дослідження впливу передпосівної обробки насіння метаболічно активними речовинами на фізіологічні показники ячменю ярого.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для проведення досліджень було використано ярий ячмінь сорту Маріан, створений на Носівській селекційно-дослідній станції. Сорт характеризується скоростиглістю, посухостійкістю та підвищеною стійкістю до основних грибних захворювань, зокрема борошнистої роси, бурої іржі та гелмінтоспоріозу. Він рекомендований для вирощування в умовах Лісостепу та Полісся, а також відзначається стійкістю до вилягання та осипання зерна.

Експериментальні дослідження проводили на базі навчально-дослідної агробіостанції Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя на спеціально підготовлених дослідних ділянках. Перед закладанням досліду ґрунт піддавали передпосівному обробітку (культивуація), після чого ділянки розмічали відповідно до схеми досліду з урахуванням варіантів та повторностей. Насіння ячменю перед посівом обробляли метаболічно активними речовинами згідно із прийнятою експериментальною схемою [8].

1. Контроль – насіння без обробки (оброблене дистильованою водою).
2. Насіння, оброблене комбінацією вітаміну Е (10^{-8} М)+ метіонін (0,001%) + $MgSO_4$ (0,001%) – ЕММg.
3. Насіння, оброблене комбінацією вітаміну Е (10^{-8} М)+ метіонін (0,001%)+параоксibenзойна кислота (ПОБК) (0,001%) + $MgSO_4$ (0,001%) – ЕМПМg.
4. Насіння, оброблене комбінацією вітаміну Е (10^{-8} М) +ПОБК (0,001%) та $MgSO_4$ (0,001%) – ЕПМg.
5. Насіння, оброблене комбінацією вітаміну Е (10^{-8} М) та убіхінону-10 (10^{-8} М) – EQ.

Для визначення морфометричних показників на кожній із трьох фаз розвитку (кущення, колосіння) проводився відбір рослинних зразків у десятикратній повторюваності для кожного варіанта.

Визначення маси сирі та сухої речовини рослин ячменю проводили ваговим методом. Отримані дані підлягали математичній обробці методами варіаційної статистики з використанням пакетів аналізу даних для перевірки достовірності встановлених відхилень.

У процесі дослідження визначали біометричні показники розвитку кореневої системи рослин ячменю ярого, зокрема кількість коренів, за загальноприйнятими методиками польових і лабораторних досліджень рослин [10]. Вміст суми хлорофілів *a* і *b* у тканинах листків ячменю ярого визначали за допомогою спектрофотометричного методу [10]. Вимірювання оптичної густини досліджуваних розчинів проводили спектрофотометрично при довжинах хвиль 665, 654 та 649 нм. Як розчин порівняння використовували етиловий спирт.

Отримані експериментальні дані обробляли методами математичної статистики з використанням стандартних функцій програмного забезпечення Microsoft Office Excel. Результати подано як середні значення з оцінкою варіабельності показників.

Результати досліджень та їх обговорення. Коренева система визначає ефективність поглинання води та мінеральних елементів, що безпосередньо впливає на інтенсивність ростових процесів. Розвинена коренева система сприяє кращому забезпеченню рослин ресурсами, що, у свою чергу, стимулює формування більшої вегетативної маси.

У результаті проведених досліджень встановлено, що передпосівна обробка насіння ячменю ярого метаболічно активними речовинами суттєво впливає на формування кореневої системи рослин. Зокрема, у рослин ячменю, насіння, якого було оброблене перед посівом комбінацією ЕММg спостерігалось збільшення кількості додаткових коренів на 10,2% порівняно з контролем, що свідчить про виражений стимулювальний ефект цієї обробки на початкові етапи органогенезу. У насіння, що оброблялось ЕМПМg та EQ також відмічено тенденцію до збільшення кількості коренів, тоді як застосування комбінації ЕПМg не забезпечувало суттєвих змін цього показника і залишалось близьким до контрольних значень (табл. 1).

Аналіз накопичення біомаси рослинами ячменю ярого сорту Маріан показав, що передпосівна обробка насіння метаболічно активними речовинами суттєво впливає на збільшення маси сирі і сухої речовини рослин на усіх фазах росту і розвитку.

Так, у фазі кущення найкращі результати було зафіксовано у варіантах ЕММg та EQ, забезпечивши приріст маси сухої речовини на 12,5% та 10,1% відповідно. Це вказує на ефективну стимуляцію процесів фотосинтезу (табл. 2).

Таблиця 1

Вплив передпосівної обробки насіння метаболічно активними речовинами на формування кореневої системи ячменю ярого сорту Маріан

Варіант	Кількість додаткових коренів	
	шт	% до контролю
Фаза куцання		
Контроль	8,8±0,6	100,0
ЕММg	9,7±0,5#	110,2
ЕМПМg	9,2±0,4	104,5
ЕПМg	8,7±0,3	98,9
EQ	9,3±0,4	105,7
Фаза колосіння		
Контроль	18± 0,4	100
ЕММg	20,3±0,5#	112,8
ЕМПМg	19,7±0,5#	109,4
ЕПМg	18,2± 0,5	101,1
EQ	19,8±0,6#	110,0

Примітка. # - Різниця достовірна порівняно з контролем (p<0,05)

У фазі колосіння найефективніше стимулювала накопичення маси сирії та сухої речовини передпосівна обробка насіння комбінацією метаболічно активних речовин ЕММg, перевищуючи показники контролю на 13,4% та 15,1% відповідно (табл. 2).

Таблиця 2

Вплив передпосівної обробки насіння метаболічно активними речовинами на динаміку маси сирії та сухої речовин на фазі весняного куцання та колосіння

Варіант	Маса сирії речовини рослини, г	% до контролю	Маса сухої речовини рослини, г	% до контролю
Фаза куцання				
1 Контроль (дистильована вода)	2±0,09	—	0,3±0,016	—
2 ЕММg	2,22±0,08#	+11,1%	0,33±0,015#	+12,5%
3 ЕМПМg	2,16±0,05#	+7,6%	0,32±0,015#	+7,4%
4 ЕПМg	1,96±0,08	-2,30%	0,29±0,015	-0,70%
5 EQ	2,2±0,07#	+9,9%	0,33±0,014#	+10,1%
Фаза колосіння				
1 Контроль (дистильована вода)	15,01±0,5	—	3,45±0,12	—
2 ЕММg	17,03±0,6#	+13,4%	3,97±0,14#	+15,1%
3 ЕМПМg	16,22±0,5#	+8,1%	3,75±0,13#	+8,7%
4 ЕПМg	14,73±0,5	-1,90%	3,35±0,11	-2,90%
5 EQ	16,77±0,6#	+11,7%	3,9±0,13#	+13,0%

#Примітка. Різниця достовірна порівняно з контролем (p<0,05)

Таким чином, для оптимізації продукційного процесу ячменю сорту Маріан в умовах чорнозему опідзоленого доцільним є використання комбінацій метаболічно активних сполук EMMg та EQ.

Збільшення біомаси надземної частини є важливим показником фізіологічного стану рослин, оскільки воно пов'язане з підвищенням площі листкової поверхні. Це створює передумови для більш ефективного перебігу фотосинтетичних процесів. Відомо, що інтенсивність фотосинтезу прямо залежить від функціонального стану листкового апарату, зокрема від вмісту фотосинтетичних пігментів.

Аналіз вмісту фотосинтетичних пігментів показав, що досліджувані метаболічно активні речовини по-різному впливають на накопичення хлорофілів залежно від варіанта обробки. Найвищі значення хлорофілу *a*, *b* та суми хлорофілів зафіксовано у тканинах листків рослин, насіння якого оброблялось поєднанням ЕМГМg, що свідчить про посилення фотосинтетичної активності рослин під дією даної комбінації у фазі колосіння. У групі EQ також спостерігалось підвищення вмісту хлорофілу порівняно з контролем у фазі колосіння, тоді як у варіантах EMMg та ЕГМg зміни мали менш виражений характер (табл. 3).

Таблиця 3

Вплив передпосівної обробки насіння метаболічно активними речовинами на вміст хлорофілу у листках ячменю ярого сорту Маріан

Фаза кущення						
Варіант	Хлорофіл <i>a</i>	% до контролю	Хлорофіл <i>b</i>	% до контролю	Хлорофіл <i>a+b</i>	% до контролю
Контроль	3,28	100	1,82	100	5,10	100
EMMg	2,79	85,1	1,89	103,8	4,68	91,8
ЕМГМg	3,49	106,4	1,78	97,8	5,27	103,3
ЕГМg	4,59	139,9	1,92	105,5	6,51	127,3
EQ	2,68	81,7	1,17	64,3	3,85	75,5
Фаза колосіння						
Варіант	Хлорофіл <i>a</i>	% до контролю	Хлорофіл <i>b</i>	% до контролю	Хлорофіл <i>a+b</i>	<i>a+b</i> % до контролю
Контроль	4,47	100	2,12	100	6,59	100
EMMg	4,51	100,9	1,97	92,9	6,48	98,3
ЕМГМg	7,02	157	3,23	152,4	10,25	155,5
ЕГМg	3,72	83,2	1,45	68,4	5,17	78,5
EQ	5,46	122,1	2,38	112,3	7,84	119

Накопичення сухої маси рослин ячменю ярого тісно пов'язане з вмістом хлорофілу як основного фотосинтетичного пігменту, що визначає інтенсивність

асиміляційних процесів. Підвищення концентрації хлорофілу в листовому апараті сприяє більш ефективному поглинанню світлової енергії та активізації фотосинтезу, внаслідок чого зростає синтез органічних речовин і, відповідно, накопичення сухої речовини. Водночас збільшення біомаси супроводжується розширенням листової поверхні, що додатково підсилює фотосинтетичну продуктивність рослин.

У результаті досліджень встановлено наявність взаємозв'язку між накопиченням сухої маси рослин ярого ячменю та підвищенням вмісту хлорофілу. Зокрема, у фазі колосіння зразки, отримані з ділянок, де насіння було оброблене препаратом ЕМГПМг, характеризувалися зростанням сухої маси в середньому на 8,7% порівняно з контрольною групою, збільшенням кількості бічних коренів на 9,4% та підвищенням сумарного вмісту хлорофілу $a+b$ на 55,5%.

Подібна позитивна тенденція спостерігалась і в групі рослин, насіння яких перед посівом обробляли EQ, де приріст сухої маси становив 13% відносно контролю, кількість бічних коренів була в середньому на 10% більшою порівняно з контролем, а вміст хлорофілу $a+b$ перевищував контрольні значення на 19%.

У дослідженні простежується взаємозв'язок між розвитком кореневої системи, накопиченням біомаси та вмістом хлорофілу. Покращене мінеральне живлення, зумовлене активнішою роботою коренів, сприяє синтезу хлорофілів a і b , що є ключовими компонентами фотосинтетичного апарату. Зростання їх концентрації свідчить про підвищення фотосинтетичної активності рослин.

Отримані результати в процесі досліджень зумовлені високою біологічною активністю компонентів досліджуваних комбінацій та оптимально підібраними концентраціями застосованих сполук. Зокрема, вітамін Е характеризується вираженими антиоксидантними властивостями та в рослинному організмі виконує важливу роль складової захисної системи від окиснювального стресу [12]. Убіхінон активно залучений до метаболічних процесів рослин, проявляє антиоксидантну активність, а також бере участь у регуляції експресії генів і передачі внутрішньоклітинних сигналів [13]. Разом із пластохіноном він функціонує у процесах фотофосфорилування та окиснювального фосфорилування, які відбуваються відповідно у тилакоїдах хлоропластів і на внутрішній мембрані мітохондрій. Крім того, встановлено, що вітамін Е (α -токоферилацетат) та убіхінон здатні проявляти імуностимулювальну активність, а також характеризуються антифітовірусними й антибактеріальними властивостями [12].

Параоксibenзойна кислота має виражену антимікробну дію та здатна пригнічувати розвиток бактерій, цвілевих і інших грибів. Водночас ця сполука виконує функції сигнального посередника та стресового фітогормону [14]. Метіонін є важливим попередником у процесах біосинтезу фітогормонів росту [15]. Додатковим джерелом мінерального живлення рослин виступає сульфат магнію, який забезпечує надходження магнію – одного з основних елементів фотосинтетичного апарату. Магній входить до складу молекули хлорофілу, впливає на інтенсивність фотосинтезу, бере участь у транспорті фосфору та регуляції вуглеводного обміну, активує окисно-відновні процеси, входить до складу фітину й пектинових речовин, стимулює ферментативну активність і регулює колоїдно-хімічний стан протоплазми клітин [16].

Таким чином, отримані дані узгоджуються з уявленнями про тісний функціональний зв'язок між підземною та надземною частинами рослини. Посилення розвитку кореневої системи виступає одним із визначальних факторів підвищення продуктивності ячменю ярого через опосередкований вплив на біомасу та ефективність фотосинтезу.

Висновки і перспективи подальших досліджень. У результаті проведених досліджень встановлено, що передпосівна обробка насіння ячменю ярого метаболічно активними речовинами позитивно впливає на накопичення сухої маси рослин, розвиток кореневої системи та вміст фотосинтетичних пігментів залежно від фази онтогенезу. Найбільш виражене збільшення сухої маси відмічено у варіанті ЕМГПМг, де у фазі колосіння цей показник перевищував контроль у середньому на 8,7%, що

супроводжувалося також підвищенням кількості бічних коренів на 9,4% та значним зростанням вмісту хлорофілу *a+b* на 55,5%.

Стабільно високі показники за комплексом досліджуваних параметрів також відзначено у варіанті EQ, де накопичення сухої маси було на 13% вищим порівняно з контролем, кількість бічних коренів – на 10%, а вміст хлорофілу *a+b* – на 19% порівняно з контрольними значеннями.

Отримані результати відкривають низку напрямів для подальшого наукового дослідження. Насамперед доцільним є поглиблене вивчення фізіолого-біохімічних механізмів дії метаболічно активних речовин, зокрема їх впливу на гормональну регуляцію росту, активність антиоксидантної системи та інтенсивність фотосинтетичних процесів у ячменю ярого.

Перспективним є також дослідження тривалої післядії передпосівної обробки насіння на формування врожайності та якісних показників зерна, оскільки виявлені зміни у накопиченні сухої маси, розвитку кореневої системи та вмісту хлорофілу можуть мати відображення на продуктивності культури.

Окремої уваги потребує порівняльний аналіз ефективності різних комбінацій метаболічно активних речовин за різних ґрунтово-кліматичних умов, з метою виявлення ефективних варіантів для практичного застосування в умовах змінного зволоження та температурного режиму.

Список використаних джерел

1. Krämer U. et al. Root engineering in barley: increasing cytokinin degradation produces a larger root system and improved drought tolerance. *Plant Physiology*. 2018. Vol. 177. P. 163–178. DOI: 10.1104/pp.18.00199
2. Tessema B. B., Raffo M. A., Guo X. et al. Genomic prediction for root and yield traits of barley under a water availability gradient. *Plant Methods*. 2024. Vol. 20. P. 8. DOI: 10.1186/s13007-023-01121-y
3. Suizu M., Lindahl B. D., Müller C. W. et al. Quantification of barley root biomass in cultivar mixtures using genetic markers. *Plant Methods*. 2025. Vol. 21. P. 147. DOI: 10.1186/s13007-025-01464-8
4. Hajibarat Z., Saidi A., Ghazvini H. et al. Investigation of morpho-physiological traits and gene expression in barley under nitrogen deficiency. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Article 8875. DOI: 10.1038/s41598-024-59714-z
5. Xu Z., Jiang Y. et al. Distinct morphological, physiological and biochemical responses of barley to light quality in leaves and roots. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2019. Vol. 142. P. 382–391.
6. Langan P., Cavel É., Henchy J., Bernád V., Ruel P., O’Dea K., Yatagampitiya K., Demailly H., Gutierrez L., Negrão S. Evaluating waterlogging stress response and recovery in barley (*Hordeum vulgare* L.): an image-based phenotyping approach. *Plant Methods*. 2024. Vol. 20. Article 146. DOI: 10.1186/s13007-024-01256-6.
7. Писаренко П. В., Заєць С. О., Василенко Р. М., Щербина З. В. Застосування регуляторів росту рослин на посівах кукурудзи в умовах Південного Степу України. Меліорація і водне господарство. 2025. № 1. С. 89–97. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202501-413>
8. Дмитров С. Г., Саблук В. Т. Формування кореневої системи сільськогосподарських культур за дії біологічно активних речовин. *Вісник аграрної науки Причорномор’я*. 2022. № 4. С. 58–66.
DOI: <https://doi.org/10.47414/be.1-2.2022.271348>
9. Гурба В. С., Баган А. В. Вплив стимуляторів росту на посівні якості насіння пшениці м’якої озимої. *Матеріали наукових конференцій ПДАУ*. 2025. С. 112–115.
10. Грицаєнко З. М., Грицаєнко А. О., Карпенко В.П. Методи біологічних та агрономічних досліджень рослин і ґрунтів. Київ: ЗАТ «Нічлава», 2003. 320 с.
11. Основи наукових досліджень в агрономії: підручник / В.О. Єщенко, П.Г. Копитко, П.В. Костогриз; В.П. Опришко. За ред. В.О. Єщенка. Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К»», 2014. 332 с.

12. Li Q., Javed M., Haider M., Habib N., Rizwan M., Perveen R., Ali S., Alyemeni M., El-Serehy H., Al-Misned F. α -Tocopherol foliar spray and translocation mediates growth, photosynthetic pigments, nutrient uptake, and oxidative defense in Maize (*Zea mays* L.) under drought stress. *Agronomy*. 2020. Vol. 10 (9). P. 1235. DOI: 10.3390/agronomy10091235
13. Liu M., Lu S. Plastocyanin and ubiquinone in plants: Biosynthesis, physiological function and metabolic engineering. *Front Plant Sci*. 2016. Vol. 7. P. 1898. DOI: 10.3389/fpls.2016.01898
14. Cho J.-Y., Moon J.-H., Seong K.-Y., Park K.-H. Antimicrobial Activity of 4-Hydroxybenzoic Acid and trans 4-Hydroxycinnamic Acid Isolated and Identified from Rice Hull. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*. 2008. № 62(11). P. 2273–2276. DOI: 10.1271/bbb.62.2273
15. Roje S. S-Adenosyl-L-methionine: Beyond the universal methyl group donor. *Phytochemistry*, 2006. №67. P. 1686–1698. DOI: 10.1016/j.phytochem.2006.04.019
16. Azizi K., Yaghobi M., Hidary S., Chaeichi M. R., Roham R. Effects of different methods of magnesium sulphate application on qualitative and quantitative yield of lentil (*Lens culinaris* Medik.) cultivars under Khorramabad climatic conditions of Iran. *Res. Crops*, 2011. №12. P. 103–111.

References

1. Krämer, U. et al. (2018). Root engineering in barley: increasing cytokinin degradation produces a larger root system and improved drought tolerance. *Plant Physiology*, 177, 163–178. [in English]. DOI: 10.1104/pp.18.00199.
2. Tessema, B. B., Raffo, M. A., Guo, X. et al. (2024). Genomic prediction for root and yield traits of barley under a water availability gradient. *Plant Methods*, 20, 8. [in English]. DOI: 10.1186/s13007-023-01121-y.
3. Suizu, M., Lindahl, B. D., Müller, C. W. et al. (2025). Quantification of barley root biomass in cultivar mixtures using genetic markers. *Plant Methods*, 21, 147. [in English]. DOI: 10.1186/s13007-025-01464-8
4. Hajibarat Z., Saidi A., Ghazvini H. et al. Investigation of morpho-physiological traits and gene expression in barley under nitrogen deficiency. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Article 8875. DOI: 10.1038/s41598-024-59714-z.
5. Xu, Z., Jiang, Y. et al. (2019). Distinct morphological, physiological and biochemical responses of barley to light quality in leaves and roots. *Plant Physiology and Biochemistry*, 142, 382–391 [in English].
6. Langan P., Cavel É., Henchy J., Bernád V., Ruel P., O’Dea K., Yatagampitiya K., Demailly H., Gutierrez L., Negrão S. Evaluating waterlogging stress response and recovery in barley (*Hordeum vulgare* L.): an image-based phenotyping approach. *Plant Methods*. 2024. Vol. 20. Article 146. DOI: 10.1186/s13007-024-01256-6.
7. Pysarenko, P. V., Zaiets, S. O., Vasilenko, R. M., & Shcherbyna, Z. V. (2025). Zastosuvannia rehulatoriv rostu roslyn na posivakh kukurudzy v umovakh Pivdennoho Stepu Ukrainy [Application of plant growth regulators on corn crops in the conditions of the Southern Steppe of Ukraine]. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo*, 1, 89–97. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202501-413>
8. Dmytrov, S. H., & Sabluk, V. T. (2022). Formuvannia korenevoi systemy silskohospodarskykh kultur za dii biolohichno aktyvnykh rechovyn [Formation of the root system of agricultural crops under the influence of biologically active substances]. *Visnyk ahromoi nauky Prychornomor’ia – Bulletin of Agrarian Science of the Black Sea Region*. 4, 58–66. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.47414/be.1-2.2022.271348>
9. Hurba, V. S., & Bahan, A. V. (2025). Vplyv stymulatoriv rostu na posivni yakosti nasinnia pshenytsi miakoi ozymoi [Influence of growth stimulators on sowing qualities of soft winter wheat seeds]. *Materialy naukovykh konferentsii PDAU*, 112–115. [in Ukrainian].
10. Hrytsaienko, Z. M., Hrytsaienko, A. O., & Karpenko, V. P. (2003). *Metody biolohichnykh ta ahronomichnykh doslidzhen roslyn i gruntiv* [Methods of biological and agronomic research of plants and soils]. Kyiv: Nichlava. [in Ukrainian].
11. Yeshchenko V.O., Kopytko P.H., Kostohryz P.V., Opryshko V.P. (2014). Za red. V.O. Yeshchenka. *Osnovy naukovykh doslidzhen v ahronomii: pidruchnyk / Vinnytsia: PP «TD «Edelweis i K»». 332 s.* [in Ukrainian].

12. Li, Q., Javed, M., Haider, M., Habib, N., Rizwan, M., Perveen, R., Ali, S., Alyemeni, M., El-Serehy, H., & Al-Misned, F. (2020). α -Tocopherol foliar spray and translocation mediates growth, photosynthetic pigments, nutrient uptake, and oxidative defense in maize (*Zea mays* L.) under drought stress. *Agronomy*, 10(9), 1235. [in English]. DOI: 10.3390/agronomy10091235
13. Liu, M., & Lu, S. (2016). Plastoquinone and ubiquinone in plants: Biosynthesis, physiological function and metabolic engineering. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1898. [in English]. DOI: 10.3389/fpls.2016.01898
14. Cho, J.-Y., Moon, J.-H., Seong, K.-Y., & Park, K.-H. (2008). Antimicrobial activity of 4-hydroxybenzoic acid and trans-4-hydroxycinnamic acid isolated and identified from rice hull. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 62(11), 2273–2276. [in English]. DOI: 10.1271/bbb.62.2273
15. Roje, S. (2006). S-adenosyl-L-methionine: Beyond the universal methyl group donor. *Phytochemistry*, 67, 1686–1698. [in English]. DOI: 10.1016/j.phytochem.2006.04.019
16. Azizi, K., Yaghobi, M., Hidary, S., Chaeichi, M. R., & Roham, R. (2011). Effects of different methods of magnesium sulphate application on qualitative and quantitative yield of lentil (*Lens culinaris* Medik.) cultivars under Khorramabad climatic conditions of Iran. *Research on Crops*, 12, 103–111. [in English].
-

Vorona V.

PhD Student, Department of Biology,
Nizhyn Mykola Gogol State University
voronavladyaslav@ndu.edu.ua
orcid.org/0009-0004-6380-7554

Havii V.

Candidate of biological sciences,
Assistant Professor of the Department of Biology,
Nizhyn Mykola Gogol State University
gaviyv@gmail.com
orcid.org/0000-0002-2604-0456

PHYSIOLOGICAL INDICATORS OF SPRING BARLEY UNDER PRE-SOWING SEED TREATMENT WITH METABOLICALLY ACTIVE SUBSTANCES

Spring barley is one of the leading cereal crops of great importance for the agricultural sector of Ukraine and many other countries. As a spring-sown crop, it completes its entire developmental cycle within a single growing season, which enables its cultivation in regions with cold winters and unstable climatic conditions. Barley is widely used in feed production, the brewing industry for malt production, and the food sector. Due to its high starch and protein content, it is a valuable component of feed mixtures.

An important factor affecting the growth and productivity of spring barley is the development of its root system. The root system supplies plants with water and nutrients, while its active formation at the early stages of ontogenesis increases crop resistance to adverse environmental conditions. In this regard, the pre-sowing treatment of seeds with metabolically active substances is considered a relevant element of modern cereal cultivation technologies. Studies indicate that metabolically active substances improve seed sowing qualities, increase germination energy, and stimulate root formation. Their effect is associated with the regulation of hormonal balance, activation of cell division, and growth in root meristem zones, contributing to the formation of a more developed root system. This is particularly important for spring barley, which is sensitive to moisture deficiency and nutrient shortages. Pre-sowing seed treatment promotes an increase in the number of adventitious roots and enhances their growth, thereby improving the absorption of soil resources and the adaptive properties of plants. At the same time, the effectiveness of

metabolically active substances depends on their composition, concentration, and the biological characteristics of the variety. The influence of pre-sowing seed treatment with metabolically active substances on the development of the root system of spring barley under the conditions of the Chernihiv region remains insufficiently studied.

Keywords: spring barley, metabolically active compounds, root system, lateral roots, chlorophyll, photosynthetic pigments, tillering, heading.

*Стаття до редакції надійшла 20.03.2026 року
Рецензія на статтю надійшла 08.04.2026 року*

УДК 582.467:581.14:631.53.027
DOI 10.31654/2786-8478-2026-BN-2-35-41

Донець Н. В.

доктор філософії, асистент кафедри біології,
завідувачка навчально-дослідної агробіостанції
Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя
Nataliavdonets@gmail.com
orcid.org/0000-0003-1187-6721

Приплавко С. О.

кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри біології,
Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя
ngubiolog@ukr.net
orcid.org/0000-0002-4326-8547

**ЗМІНА МАСИ СИРОЇ ТА СУХОЇ РЕЧОВИНИ СІЯНЦІВ *GINKGO BILOBA* L.
ПІД ВПЛИВОМ МЕТАБОЛІЧНО АКТИВНИХ РЕЧОВИН,
ВИКОРИСТАНИХ ДЛЯ ПЕРЕДПОСІВНОЇ ОБРОБКИ НАСІННЯ**

У дослідженні вивчався вплив передпосівної обробки насіння гінкго (*Ginkgo biloba* L.) метаболічно активними речовинами та їх комбінаціями на накопичення маси сирої та сухої речовини у сіянцях. Гінкго, як одна з найдавніших рослин на Землі, має велике значення не лише в ботаніці, а й у медицині, завдяки своїм унікальним фармакологічним властивостям. Однак, для досягнення високої продуктивності та якості рослин важливо оптимізувати умови їх вирощування, зокрема використання метаболічно активних речовин. Пошук нових, більш ефективних та екологічно чистих регуляторів росту рослин є одним з найважливіших напрямків сучасних досліджень у фізіології рослин. Серед перспективних регуляторів росту деревних рослин можна виділити метаболічно активні речовини – сполуки, які відіграють важливу роль у регуляції життєвих процесів у клітинах рослин. Вони впливають на ріст, розвиток, обмін речовин та адаптацію рослин до різних умов середовища. Ці препарати безпечні для людей і тварин, ефективні в малих концентраціях, мають широкий спектр дії та відповідають екологічним і економічним вимогам. Для аналізу було використано проростки *Ginkgo biloba* L. з метою вивчення впливу метаболічно активних речовин, зокрема: Убіхінону-10 (10^{-8} М), Вітаміну Е (10^{-8} М), Параоксибензойної кислоти (ПОБК) (0,001%), Метіоніну (0,001%), Сульфату магнію (0,001%) та їх комбінацій. При цьому досліджували дію таких комбінацій: Вітамін Е (10^{-8} М) + Убіхінон-10 (10^{-8} М); Вітамін Е (10^{-8} М) + Параоксибензойна кислота (0,001%) + Метіонін (0,001%); Вітамін Е (10^{-8} М) + Параоксибензойна кислота (0,001%) + Метіонін (0,001%) + $MgSO_4$ (0,001%). Встановлено, що передпосівна обробка насіння гінкго метаболічно активними речовинами позитивно впливає на накопичення маси сирої та сухої речовини сіянців. Найбільшу ефективність за обома показниками продемонстрували окремі речовини Вітамін Е та Метіонін, а також їх комбінація Вітамін Е + Метіонін + ПОБК.

Ключові слова: *Ginkgo biloba* L., метаболічно активні речовини, передпосівна обробка насіння, сіянець, сира маса, суха маса.

Вступ. Серед рідкісних реліктових декоративних рослин, які були інтродуковані в Україні, особливо виділяється Гінкго дволопатеве (*Ginkgo biloba* L.). Ця листопадна голонасінна рослина є ендеміком Східного Китаю [1] і характеризується унікальною

стійкістю до різноманітних негативних впливів, таких як важкі метали, радіоактивне забруднення, шкідники та хвороби. Крім того, гінкго демонструє високу стійкість до вітру та морозів [2]. Перспективність культивування гінкго дволопатевого має два ключові напрямки. По-перше, його висока стійкість до несприятливих міських умов дозволяє використовувати його для створення стійких зелених насаджень, що сприяють очищенню повітря, збереженню біорізноманіття та поліпшенню мікроклімату. По-друге, створення спеціалізованих плантацій відкриває можливості для ефективного виробництва високоякісної сировини для фармацевтичної, харчової та деревообробної промисловості [3]. Крім того, науковий інтерес до гінкго зосереджений на вивченні його адаптаційних механізмів, таких як стійкість до посухи та заморозків, що може бути використано для розробки інноваційних технологій у декоративному рослинництві та медицині.

В умовах постійно зростаючого попиту на саджанці гінкго та одночасних обмежень у їх поширенні через нестачу якісного садивного матеріалу [4], стає критично важливим вдосконалення агротехнічних методів. Оскільки абіотичні стреси під час формування насіння негативно впливають на його посівні якості, виникає необхідність у додатковій обробці. Ефективним рішенням для підвищення схожості та забезпечення інтенсивного початкового росту [4] є передпосівне використання метаболічно активних речовин природного походження, таких як Вітамін Е, Убіхінон-10, Метіонін, Магній сульфат ($MgSO_4$), Параоксибензойна кислота (ПОБК) та їх комбінації. Ці сполуки є безпечними для навколишнього середовища та людини і демонструють високу ефективність навіть у мінімальних дозах.

Мета дослідження. Визначити та проаналізувати показники маси сирі та сухої речовини сіяньців гінкго під впливом метаболічно активних речовин та їх комбінацій, що використовуються для передпосівної обробки насіння.

Матеріали і методи дослідження. Матеріалом для роботи слугувало насіння гінкго дволопатевого (*Ginkgo biloba* L.), яке було зібрано з дорослих рослин у Національному ботанічному саду ім. М. М. Гришка НАН України (м. Київ) упродовж 2019–2024 років. Перед висівом проводили обробку насіння такими метаболічно активними речовинами: Вітамін Е, Убіхінон-10, Параоксибензойна кислота (ПОБК), Магній сульфат ($MgSO_4$) та Метіонін. Крім цього, було використано різні комбінації із зазначених вище речовин, а саме: Вітамін Е (10^{-8} М) + Убіхінон-10 (10^{-8} М); Вітамін Е (10^{-8} М) + Параоксибензойна кислота (0,001%) + Метіонін (0,001%); Вітамін Е (10^{-8} М) + Параоксибензойна кислота (0,001%) + Метіонін (0,001%) + $MgSO_4$ (0,001%). Для порівняння дії метаболічно активних речовин та їх комбінацій використовували відомий регулятор росту рослин Стимпо (Новітній біостимулятор рослин із серії полікомпонентних препаратів, в основу дії якого покладено синергетичний ефект взаємодії продуктів біотехнологічного культивування грибів-мікроміцетів з кореневої системи женьшеню і авермектинів) [5].

Дослідження проводилися в умовах закритого ґрунту в опалювальній стаціонарній скляній теплиці на території навчально-дослідної агробіостанції Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя.

Перед сівбою насіння готували відповідно до загальноприйнятих методик [6, 7]. Насіння замочували на 24 години у розчинах досліджуваних речовин. Після обробки насіння висівали в ємкості з підготовленим субстратом, що складається з дернового ґрунту, торфу та листового перегною у співвідношенні 1:1:3. Середньодобова температура в теплиці становила $16^{\circ}C$, а відносна вологість повітря коливалася в межах 60–70%.

Для визначення маси сирі та сухої речовини сіяньців використовували ваговий метод, аналізуючи по 10 випадково відібраних рослин у чотирьохкратній повторності [8]. Вміст води у молодих рослинах гінкго визначали також ваговим методом, порівнюючи маси свіжого зразка і маси того ж зразка після видалення вологи) [9].

Статистичну обробку отриманих результатів виконували за допомогою програмного забезпечення *MS Office Excel – 2010* (пакет «Аналіз даних») [10].

Результати досліджень та їх обговорення. Аналіз отриманих результатів показав, що метаболічно активні речовини, навіть у невеликих кількостях, здатні активізувати фізіологічні процеси в рослині [4]. Це може позитивно впливати на накопичення вегетативної маси молодих сіянців. Відомо, що накопичення сирі та сухої речовини є фундаментальним процесом, який триває від появи сходів до стану спокою рослини і відображає загальний стан рослини та її здатність до росту та розвитку [11]. Визначення накопичення маси сирі та сухої речовини в сіянцях дозволяє отримати важливу інформацію про фізіологічний стан рослин та їх здатність до ефективного використання ресурсів. Дослідження з визначення маси сирі та сухої речовини були проведені в 60-70-денних сіянцях гінго першого року у період їх активного росту. Результати цих досліджень відображені в таблиці 1.

Таблиця 1

Маса сирі та сухої речовини сіянців *Ginkgo biloba* за передпосівної обробки насіння метаболічно активними речовинами

Варіанти дослідження	Маса сирі речовини, г	Маса сухої речовини, г
Контроль	2,82±0,05	0,87±0,09
Стимпо	2,89±0,07	0,85±0,09
ПОБК	2,98±0,09*	0,84±0,06
Метіонін	3,31±0,05*#	0,90±0,06
MgSO ₄	3,14±0,09*#	0,91±0,10
Вітамін Е	3,33±0,09*#	0,86±0,08
Убіхінон-10	2,89±0,05	0,90±0,10
Вітамін Е + Убіхінон-10	3,13±0,09*#	0,86±0,06
Вітамін Е + Метіонін + ПОБК	3,48±0,09*#	1,09±0,13
Вітамін Е + Метіонін + ПОБК + MgSO ₄	3,28±0,04*#	1,02±0,11

Примітка: * – різниця достовірна порівняно з контролем, $p < 0,05$;

– достовірно порівняно з варіантом, насіння якого оброблене стимулятором росту Стимпо, $p < 0,05$.

Як видно з таблиці 1, метаболічно активні речовини суттєво стимулюють накопичення маси сирі речовини сіянців, забезпечуючи зростання показників у всіх варіантах порівняно як з контролем, так і з дією стимулятора Стимпо. Найвищі значення маси сирі речовини показали окремі варіанти з обробкою препаратами Вітамін Е та Метіонін. Серед комбінацій найбільш достовірний та виражений ефект забезпечила суміш Вітамін Е + Метіонін + ПОБК, яка сприяла збільшенню маси сирі речовини на 0,66 г порівняно до контролю. Ця комбінація також була найбільш ефективною за показником маси сухої речовини, зростаючи на 0,22 г відносно контролю. Висока ефективність досліджуваних речовин може бути пояснена синергічною дією окремих компонентів, які виконують роль потужних антиоксидантів та стимуляторів росту рослин.

Вода є одним із найважливіших компонентів рослинних тканин, зазвичай складаючи від 65% до 95% їхньої маси [12]. Вона є основою для транспортування поживних речовин, активно бере участь у метаболічних, гідролітичних і синтетичних процесах [13], забезпечуючи підтримку клітинного тиску.

Окрім води, важливу роль у хімічному складі рослин відіграє суха речовина, яка складається з органічних і мінеральних сполук. Органічні сполуки включають білки, вуглеводи, жири, вітаміни та інші метаболіти, які беруть участь у різних біохімічних процесах. Мінеральні сполуки, такі як макро- та мікроелементи, забезпечують рослини необхідними нутрієнтами для росту та розвитку. Взаємодія між водою, органічними та мінеральними речовинами є критично важливою для підтримки життєдіяльності рослин, їхньої адаптації до зовнішніх умов та загальної продуктивності. Таким чином, розуміння ролі води та складових сухої речовини є ключовим для ефективного управління агрономічними практиками та покращення якості садивного матеріалу деревних культур.

Результати досліджень впливу метаболічно активних речовин на вміст води і сухої речовини у тканинах сіянців гінкго відображені в таблиці 2.

Таблиця 2

Процентний вміст сухої речовини та вміст води у тканинах сіянців *Ginkgo biloba* за передпосівної обробки насіння метаболічно активними речовинами

Варіанти дослідження	Процентний вміст сухої речовини, %	Вміст води у тканинах сіянця	
		%	% до контролю
Контроль	30,9	69,1	100,0
Стиμπο	29,4	70,6	102,1
ПОБК	28,2	71,8	103,9
Метіонін	27,2	72,8	105,3
MgSO ₄	29,0	71,0	102,7
Вітамін Е	25,8	74,2	107,3
Убіхінон-10	31,1	68,9	99,6
Вітамін Е + Убіхінон-10	27,5	72,5	104,9
Вітамін Е + Метіонін + ПОБК	31,3	68,7	99,3
Вітамін Е + Метіонін + ПОБК + MgSO ₄	31,1	68,9	99,7

Як видно з таблиці 2, найбільш виражений позитивний ефект на вміст води у тканинах сіянців гінкго виявив Вітамін Е. Інші речовини, такі як Метіонін та ПОБК, також продемонстрували ефективність за цим показником. Отримані результати свідчать про те, що передпосівна обробка насіння метаболічно активними речовинами мають суттєвий вплив на вміст води у тканинах сіянців гінкго та підкреслюють важливість їх використання для оптимізації росту та розвитку.

Поєднання метаболічно активних речовин у складі комбінацій часто призводить до значного посилення їхнього ефекту порівняно з дією кожної речовини окремо. Так було відмічено позитивний вплив комбінацій у складі Вітамін Е + Метіонін + ПОБК, а також Вітамін Е + Метіонін + ПОБК + MgSO₄ на процентний вміст сухої речовини у сіянцях гінкго. Це підкреслює важливість використання комбінацій для досягнення оптимальних результатів у вирощуванні цієї рослини.

Висновки. У результаті проведених досліджень було встановлено, що використання метаболічно активних речовин сприяє накопиченню маси сирової та сухої речовини у сіянцях гінкго. Отримані дані підтверджують, що передпосівна обробка насіння *Ginkgo biloba* ефективно впливає на масу сирової та сухої речовини сіянців, а також на показники процентного вмісту сухої речовини та вмісту води у їх тканинах. У майбутньому ці дослідження можуть стати основою для розробки нових агрономічних практик, які забезпечать більш ефективне вирощування гінкго та інших деревних культур, що потребують особливого догляду в умовах зміни клімату та інших стресових факторів.

Список використаних джерел

1. Колесніченко О. В., Слюсар С. І., Якобчук О. М. Особливості насінношення та результати інтродукційного випробування *Liriodendron tulipifera* L. Наукові доповіді НУБіП України. 2012. № 4. Вип. 33. 13 с.
2. Самородов, В. М. Гінго дволопатеви на Полтавщині: підсумки. 120-річної інтродукції. Проблеми відтворення та охорони біорізноманітності України : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. Полтава : Астроя, 2015. С. 70–71.
3. Остудімов А. О., Гузь М. М. Вирощування садивного матеріалу гінго дволопатевого насінним шляхом : практичні рекомендації. Львів : РВВ НЛТУ України, 2011. 43 с.
4. Гузь М. М., Гречаник Р. М., Остудімов А. О. Особливості розмноження гінго дволопатевого in vitro. Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. Львів : РВВ НЛТУ України. 2008. Вип. 18.7. С. 7–16.
5. Стимпо [Електронний ресурс]. URL : <https://www.agrobiotech.com.ua/ua/stimpo>
6. Методичні рекомендації з розмноження деревних декоративних рослин Ботанічного саду НУБіП України / уклад. : О.В. Колесніченко, С. І. Слюсар, О. М. Якобчук. Київ : Видавничий центр НУБіП України, 2008. 55 с.
7. Методичні рекомендації з розмноження деревних та кущових рослин Ч. 1: Голонасінні / за ред. М. А. Кохна, С. І. Кузнецова. Київ, 1998. 48 с.
8. ДСТУ 7804:2015. Продукти перероблення фруктів та овочів. Методи визначання сухих речовин або вологи. [Чинний від 2015-06-22]. Київ : Держспоживстандарт України, 2015. 19 с.
9. Фізіологія рослин. Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт студентами першого (бакалаврського) освітнього рівня за напрямом підготовки 206 – «Садово-паркове господарство», 206 «Лісове господарство» / уклад. Л. В. Розборська, О. І. Заболотний, А. А. Даценко. Умань, 2020. 65 с.
10. Томашевський О. В., Рисіков В. П. Комп'ютерні технології статистичної обробки даних: навчальний посібник. Запоріжжя: Запорізький національний технічний університет, 2015. 175 с.
11. Фізіологія рослин / за ред. Макрушина М. М. Вінниця: Нова Книга, 2006. 416с.
12. Ковалевський С. Б., Кривохатко Г. А. Посухостійкість та водоутримувальна здатність рослин *Thuja occidentalis* L. та її культиварів. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2018. Т. 28, № 2. С. 77–80. DOI: 10.15421/40280214
13. Taiz L. Eduardo Z. Plant Physiology. 2nd ed. Sinauer Associates, Inc. Sunderland, MA, USA. 1998.

References

1. Kolesnichenko, O. V., Sliusar, S. I., & Yakobchuk, O. M. (2012). Osoblyvosti nasinnienoshennia ta rezultaty introduktsiinoho vyprobuvannia *Liriodendron tulipifera* L. [Peculiarities of seed bearing and results of introduction testing of *Liriodendron tulipifera* L.]. *Naukovi dopovidi NUBiP Ukrainy*, 4(33), 13. [in Ukrainian]
2. Samorodov, V. M. (2015). Hinkho dvolopatevyi na Poltavshchyni: pidsumky 120-richnoi introduktsii [*Ginkgo biloba* in Poltava region: results of 120-year introduction]. In *Problemy vidtvorennia ta okhorony bioriznomanittia Ukrainy: materialy Vseukr. nauk.-prakt. konf.* (pp. 70–71). Poltava: Astraia. [in Ukrainian]
3. Ostudimov, A. O., & Huz, M. M. (2011). *Vyroshchuvannia sadyynoho materialu hinkho dvolopatevoho nasinnym shliakhom: praktychni rekomendatsii* [Growing of planting material of *Ginkgo biloba* by seed method: practical recommendations]. Lviv: RVV NLTU Ukrainy. [in Ukrainian]
4. Huz, M. M., Grechanyk, R. M., & Ostudimov, A. O. (2008). Osoblyvosti rozmnozhennia hinkho dvolopatevoho in vitro [Peculiarities of *Ginkgo biloba* reproduction in vitro]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, 18(7), 7–16. Lviv: RVV NLTU Ukrainy. [in Ukrainian]
5. Stympo URL: <https://www.agrobiotech.com.ua/ua/stimpo> (data zvernennia: 21.104.26).
6. Kolesnichenko, O. V., Sliusar, S. I., & Yakobchuk, O. M. (Comps.). (2008). *Metodychni rekomendatsii z rozmnozhennia derevnykh dekoratyvnykh roslyn Botanichnoho sadu NUBiP*

Ukrainy [Methodical recommendations for propagation of ornamental woody plants of the Botanical Garden of NUBiP of Ukraine]. Kyiv: Vydavnychiy tsentr NUBiP Ukrainy. [in Ukrainian]

7. Kokhno, M. A., & Kuznetsova, S. I. (Eds.). (1998). Metodychni rekomendatsii z rozmnozhennia derevnykh ta kushchovykh roslyn. Ch. 1: Holonasininni [Methodical recommendations for propagation of tree and shrub plants. Part 1: Gymnosperms]. Kyiv. [in Ukrainian]

8. DSTU 7804:2015. (2015). Produkty pererobliannia fruktiv ta ovochiv. Metody vyznachannia sukhykh rehovyn abo volohy [Products of fruit and vegetable processing. Methods for determination of dry matter or moisture]. (Effective from 2015-06-22). Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. [in Ukrainian]

9. Rozborska, L. V., Zabolotnyi, O. I., & Datsenko, A. A. (Comps.). (2020). *Fiziolohiia roslyn. Metodychni rekomendatsii do vykonannia laboratornykh robot studentamy pershoho (bakalavrskoho) osvitnoho rivnia za napriamom pidhotovky 206 – «Sadovo-parkove hospodarstvo», 206 «Lisove hospodarstvo»* [Plant physiology. Methodical recommendations for laboratory work for first (bachelor) level students in the field of study 206 – Landscape gardening, 206 Forestry]. Uman. [in Ukrainian]

10. Tomashevskiy, O. V., & Rysikov, V. P. (2015). Kompiuterni tekhnolohii statystychnoi obrobky danykh: navchalnyi posibnyk [Computer technologies for statistical data processing: a textbook]. Zaporizhzhia: Zaporizkyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet. [in Ukrainian]

12. Makrushyna, M. M. (Ed.). (2006). Fiziolohiia roslyn [Plant physiology]. Vinnytsia: Nova Knyha. [in Ukrainian]

13. Kovalevskiy, S. B., & Kryvokhatko, H. A. (2018). Posukhostiikist ta vodoutrymuvalna zdatsnist roslyn Thuja occidentalis L. ta yii kulturariv [Drought resistance and water-holding capacity of *Thuja occidentalis* L. and its cultivars]. Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy, 28(2), 77–80. DOI: 10.15421/40280214 [in Ukrainian]

14. Taiz, L., & Zeiger, E. (1998). Plant Physiology (2nd ed.). Sunderland, MA, USA: Sinauer Associates, Inc. [in English]

Donets N.

Doctor of Philosophy, Assistant Professor of the Department of Biology,
Head of the Educational and Research Agrobiostation
Nizhyn State University named after Mykola Gogol
Nataliavdonets@gmail.com
orcid.org/0000-0003-1187-6721

Pryplavko S.

Candidate of Agricultural Sciences,
Associate Professor of the Department of Biology,
Nizhyn State University named after Mykola Gogol
ngubiolog@ukr.net
orcid.org/0000-0002-4326-8547

CHANGE IN THE WEIGHT OF RAW AND DRY MATTER OF *GINKGO BILOBA* L. SEEDLINGS UNDER THE INFLUENCE OF METABOLICALLY ACTIVE SUBSTANCES USED FOR PRE-SOWING SEED TREATMENT

The study studied the effect of pre-sowing treatment of ginkgo seeds (Ginkgo biloba L.) with metabolically active substances and their combinations on the accumulation of fresh and dry mass of seedlings. Ginkgo, as one of the oldest plants on Earth, is of great importance not only in botany, but also in medicine, due to its unique pharmacological properties. However, to achieve high productivity and quality of plants, it is important to optimize their growing conditions, in particular the use of metabolically active substances. The search for new, more effective and environmentally friendly plant growth regulators

is one of the most important areas of modern research in plant physiology. Among the promising growth regulators of woody plants, metabolically active substances can be distinguished – compounds that play an important role in the regulation of life processes in plant cells. They affect the growth, development, metabolism and adaptation of plants to various environmental conditions. These drugs are safe for humans and animals, effective in low concentrations, have a wide spectrum of action and meet environmental and economic requirements. For the analysis, Ginkgo biloba L. seedlings were used to study the effect of metabolically active substances, in particular: Ubiquinone (10^{-8} M), Vitamin E (10^{-8} M), Paraoxybenzoic acid (POBA) (0,001%), Methionine (0,001%), Magnesium sulfate (0,001%) and their combinations. In particular, the following compositions were studied: Vitamin E (10^{-8} M) + Ubiquinone (10^{-8} M); Vitamin E (10^{-8} M) + Paraoxybenzoic acid (0,001%) + Methionine (0,001%); Vitamin E (10^{-8} M) + Paraoxybenzoic acid (0,001%) + Methionine (0,001%) + $MgSO_4$ (0,001%). It was found that pre-sowing treatment of ginkgo seeds with metabolically active substances has a positive effect on the accumulation of fresh and dry mass of seedlings. The greatest efficiency in both indicators was demonstrated by the individual substances Vitamin E and Methionine, as well as their combination Vitamin E + Methionine + POBA.

Keywords: Ginkgo biloba L., metabolically active substances, pre-sowing seed treatment, seedlings, fresh weight, dry weight.

Стаття до редакції надійшла 23.03.2026 року

Рецензія на статтю надійшла 10.04.2026 року

UDC 577.15

DOI 10.31654/2786-8478-2026-BN-2-42-47

Nasibov Hikmet Nasir

Ass. professor,
Chairman of Scientific-Research Institute
of Vegetable Growing
Baku State University, Baku, Azerbaijan
nesibov.hikmet@teti.az
orcid.org/0009-0003-4769-0977

Hasanzada Aykhan Vidadi

master's student of Baku State University
Baku State University, Baku, Azerbaijan
ayxanhesen1234@gmail.com
orcid.org/0009-0006-8652-5853

Quluzada Zeka Nazir

master's student of Baku State University
Scientific-Research Institute
of Vegetable Growing, public legal entity,
Baku Azerbaijan
orcid.org/0009-0004-3964-2277

**ENHANCING POTATO (*SOLANUM TUBEROSUM* L., CV CHANLIBEL)
CALLUS INDUCTION AND REGENERATION USING IRON
AND COPPER OXIDE NANOPARTICLES**

The application of nanoparticles (NPs) in plant tissue culture has emerged as a promising strategy to enhance morphogenesis and regeneration efficiency. Despite accumulating evidence regarding nanoparticle-mediated enhancement of plant tissue culture responses, limited information is available on their application in potato, particularly in the cultivar Chanlibel. The absence of systematic evaluation of Fe₃O₄ and CuO nanoparticles in this genotype represents a notable knowledge gap. Therefore, the present study aimed to investigate the effects of different concentrations of Fe₃O₄ and CuO nanoparticles on callus induction, callus growth, and shoot regeneration in Solanum tuberosum L. cv. Chanlibel under in vitro conditions. This study evaluated the effects of iron oxide (Fe₃O₄) and copper oxide (CuO) nanoparticles on callus induction and in vitro regeneration of potato (Solanum tuberosum L., cv. Chanlibel). Explants were cultured on Murashige and Skoog (MS) medium supplemented with Fe₃O₄ or CuO nanoparticles at 0.25, 5, and 10 mg L⁻¹. Callus induction frequency increased with Fe₃O₄ concentration up to 5 mg/L, reaching a maximum of 82%, compared to 60% in the control. Similarly, callus fresh weight and shoot regeneration frequency were highest at 5 mg/L, with values of 0.70 g and 68%, respectively. Increasing the concentration to 10 mg/L slightly reduced both callus induction (72%) and shoot regeneration (55%). Callus induction frequency increased with Fe₃O₄ concentration up to 5 mg/L, reaching a maximum of 82%, compared to 60% in the control. Similarly, callus fresh weight and shoot regeneration frequency were highest at 5 mg/L, with values of 0.70 g and 68%, respectively. Increasing the concentration to 10 mg/L slightly reduced both callus induction (72%) and shoot regeneration (55%). Callus induction frequency, callus fresh weight, and shoot regeneration percentage were assessed to determine treatment efficacy. Fe₃O₄ nanoparticles significantly enhanced morphogenic responses, with the highest performance observed at 10 mg L⁻¹, resulting in 82% callus induction and 68% shoot regeneration. CuO nanoparticles exhibited a concentration-dependent response, with optimal effects at 5 mg L⁻¹ (78% callus induction and 64% shoot regeneration), whereas

10 mg L⁻¹ caused inhibitory effects, including reduced regeneration and callus browning. Morphological evaluation revealed compact, green calli under Fe₃O₄ treatments, while elevated CuO levels induced tissue browning, indicating potential phytotoxicity. Overall, the findings demonstrate that appropriately optimized Fe₃O₄ and CuO nanoparticle supplementation can improve in vitro regeneration efficiency in potato, underscoring their potential application in advanced plant biotechnology and micropropagation systems.

Keywords: nanoparticles; iron oxide (Fe₃O₄); copper oxide (CuO); callus induction; in vitro regeneration; potato; Solanum tuberosum L.

Introduction. Potato (*Solanum tuberosum* L.) is one of the most strategically important food crops worldwide, ranking among the leading staple species in terms of global production and human consumption. Beyond its substantial contribution to food security, potato represents a valuable source of carbohydrates, high-quality proteins, vitamins, and essential minerals. Sustainable improvement of potato cultivars through rapid clonal propagation, genetic transformation, and breeding programs relies heavily on efficient in vitro culture systems. In this context, successful callus induction and subsequent plant regeneration constitute critical steps for micropropagation and biotechnological applications. Nevertheless, regeneration efficiency in potato tissue culture is frequently limited by genotype-dependent morphogenic responses, oxidative stress caused by reactive oxygen species (ROS), phenolic oxidation leading to tissue browning, and microbial contamination, all of which compromise morphogenic competence [1, 6, 8].

Recent advances in nanotechnology have introduced engineered nanoparticles (NPs) as promising modulators of plant physiological and biochemical processes. Due to their nanoscale dimensions, high surface area-to-volume ratio, and enhanced reactivity, nanoparticles exhibit greater bioavailability and biological activity than their bulk counterparts [5, 8]. Emerging evidence indicates that NPs can enhance nutrient uptake, alter membrane permeability, regulate phytohormonal signaling pathways, activate antioxidant defense systems, and suppress microbial growth in plant tissue culture systems [4, 9]. These properties suggest their potential to improve in vitro morphogenesis and regeneration efficiency.

Among micronutrient-based nanoparticles, iron oxide (Fe₃O₄) and copper oxide (CuO) are of particular interest because iron (Fe) and copper (Cu) are essential elements involved in key metabolic pathways. Iron is indispensable for chlorophyll biosynthesis, mitochondrial respiration, and electron transport processes, whereas copper functions as a catalytic cofactor for numerous oxidoreductases, including superoxide dismutase, and plays a crucial role in redox regulation and stress responses [2, 8]. Nano-formulations of these micronutrients may enhance their solubility, mobility, and controlled delivery within plant tissues. For example, Fe₃O₄ nanoparticles have been reported to significantly enhance callus induction and shoot regeneration in rice and chickpea tissue cultures [3, 7]. In contrast, CuO nanoparticles have demonstrated concentration-dependent effects, stimulating callogenesis at lower concentrations while inducing oxidative damage and phytotoxicity at higher doses due to excessive ROS accumulation [6, 10].

Despite accumulating evidence regarding nanoparticle-mediated enhancement of plant tissue culture responses, limited information is available on their application in potato, particularly in the cultivar Chanlibel. The absence of systematic evaluation of Fe₃O₄ and CuO nanoparticles in this genotype represents a notable knowledge gap. Therefore, the present study aimed to investigate the effects of different concentrations of Fe₃O₄ and CuO nanoparticles on callus induction, callus growth, and shoot regeneration in *Solanum tuberosum* L. cv. Chanlibel under *in vitro* conditions. By elucidating the morphogenic responses to micronutrient-based nanoparticles, this research seeks to contribute to the optimization of regeneration protocols and to expand the practical applications of nanotechnology in plant biotechnology.

Materials and Methods. *Plant Material and Explant Preparation*

Certified disease-free tubers of *S. tuberosum* L., cv. Chanlibel were used. Stem and leaf explants (1–2 cm) were surface sterilized using 70% ethanol (1 min) and 2% sodium hypochlorite (15 min), followed by three rinses with sterile distilled water.

Nanoparticle Preparation. Fe_3O_4 and CuO nanoparticles (Sigma-Aldrich, 20–50 nm) were dispersed in sterile distilled water by sonication for 15 min. NPs were added to MS medium at the following concentrations:

Fe_3O_4 : 0,25, 5, 10 mg/L

CuO: 0,25, 5, 10 mg/L

Control media contained no nanoparticles. Medium pH was adjusted to 5.8 and autoclaved at 121°C for 20 min.

Culture Conditions. Explants were incubated in the dark at $25 \pm 2^\circ\text{C}$ for 4 weeks for callus induction. Calli were then transferred to regeneration medium containing 1 mg/L BAP and 0.1 mg/L NAA under a 16/8 h light/dark photoperiod.

Evaluation Parameters.

Callus induction frequency (%) = (number of explants forming callus ÷ total explants) × 100

Callus fresh weight (g) after 4 weeks

Shoot regeneration frequency (%) = (number of calli producing shoots ÷ total calli) × 100

Morphological observations: color, compactness, and necrosis

Statistical Analysis. Experiments were performed in triplicate with 20 explants per treatment. Data were analyzed using ANOVA followed by Tukey's test at $p < 0.05$.

Results and Discussion. *Effects of Fe_3O_4 Nanoparticles.* The effect of Fe_3O_4 nanoparticles on callus induction, fresh weight, and shoot regeneration of *Solanum tuberosum* L., cv. Chanlibel is presented in Table 1. Callus induction frequency increased with Fe_3O_4 concentration up to 5 mg/L, reaching a maximum of 82%, compared to 60% in the control. Similarly, callus fresh weight and shoot regeneration frequency were highest at 5 mg/L, with values of 0.70 g and 68%, respectively. Increasing the concentration to 10 mg/L slightly reduced both callus induction (72%) and shoot regeneration (55%). Morphologically, calli at 5 mg/L were compact, green, and highly meristematic, whereas higher Fe_3O_4 concentrations led to minor decreases in growth and regeneration potential.

Table 1. Effects of Fe_3O_4 nanoparticles on callus induction, fresh weight, and shoot regeneration of potato explants

Fe_3O_4 (mg/L)	Callus Induction (%)	Callus Fresh Weight (g)	Shoot Regeneration (%)
0 (Control)	60	0.42	50
0,25	68	0.55	57
5	82	0.70	68
10	72	0.58	55

Effects of CuO Nanoparticles. CuO nanoparticles also influenced callus induction and regeneration (Table 2). Low concentrations of CuO (0,25–5 mg/L) enhanced callus induction (70–78%) and shoot regeneration (56–64%) compared to the control (60% and 50%, respectively). However, a higher concentration (10 mg/L) markedly reduced callus induction (52%) and shoot regeneration (42%) and caused browning and necrosis in the calli.

Table 2. Effects of CuO nanoparticles on callus induction, fresh weight, and shoot regeneration of potato explants

CuO (mg/L)	Callus Induction (%)	Callus Fresh Weight (g)	Shoot Regeneration (%)
0 (Control)	60	0.42	50
0,25	70	0.53	56
5	78	0.63	64
10	52	0.45	42

Comparative Observations. Comparative analysis indicated that Fe₃O₄ at 5 mg/L and CuO at 5 mg/L were optimal for callus induction and shoot regeneration. Morphologically, Fe₃O₄-treated calli were compact and green at optimal concentration, while high CuO concentrations induced browning and necrosis.

The present study demonstrated that Fe₃O₄ nanoparticles function as a bioavailable iron source, promoting enzymatic activity, antioxidative defense mechanisms, and organogenesis in *Solanum tuberosum* L., cv. Chanlibel. These observations align with the findings of Ullah et al. (2024) and Iqbal et al. (2024), who reported similar stimulatory effects of iron oxide nanoparticles on callus induction and regeneration in rice and turmeric tissue cultures.

CuO nanoparticles exhibited dose-dependent effects: low concentrations (0,25–5 mg/L) enhanced callus formation and shoot regeneration, whereas higher concentrations (10 mg/L) caused oxidative stress, cytotoxicity, and browning of calli. These results are consistent with previous studies by Anwaar et al. (2020) and Khaliloğlu et al. (2022), highlighting the dual role of metal oxide nanoparticles in plant tissue culture. The data emphasize the importance of optimizing nanoparticle type and concentration to maximize regenerative potential while minimizing phytotoxic effects.

Overall, the study confirms that carefully selected concentrations of Fe₃O₄ and CuO nanoparticles can significantly improve callus induction, biomass accumulation, and shoot regeneration, offering a valuable strategy for enhancing in vitro propagation efficiency in potato.

Conclusion. Fe₃O₄ and CuO nanoparticles exert significant effects on callus induction and in vitro regeneration of potato cv. Chanlibel. Optimal concentrations—5 mg/L for Fe₃O₄ and 5 mg/L for CuO—resulted in enhanced callus formation, increased biomass, and higher shoot regeneration rates. These findings suggest that nanoparticle supplementation can serve as a promising tool to improve potato tissue culture protocols, provided that concentrations are carefully optimized to avoid cytotoxicity.

Список використаних джерел

1. Anwaar S., Ali S., Ali S., Ishaque W., Farid M., Farooq M. A., Najeeb U., Abbas, F. Copper oxide nanoparticles: phytotoxicity and role in plant growth modulation. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020, 27, 2983 – 2998.
2. Marschner P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.
3. Rico C. M., Majumdar S., Duarte-Gardea M., Peralta-Videa J. R., Gardea-Torresdey J. L. Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2011, 59(8), 3485 – 3498.
4. Barakat M.N., Abdel-Latif T.H. *In vitro* selection of wheat callus tolerant to high level of salt and plant regeneration. *Euphytica*. 1996, 91(2), 127 – 140. <https://doi.org/10.1007/BF00021062>
5. Siddiqi K. S., Husen A. Plant response to engineered metal oxide nanoparticles. *Nanoscale Research Letters*. 2017, 12, 92.
6. Thorpe T. A. (2007). History of plant tissue culture. *Molecular Biotechnology*. 2017, 37, 169–180.
7. Colin I., Ruhnnow F., Zhu L – K., Zhao Y., Person, S. The cell biology of primary cell walls during salt stress. *The plant cell*. 2017, 35(1), 201 – 207 <https://doi.org/10.1093/plcel/koa292>
8. De Rosa A., McGaughey S., Magrath I., Byrt C. Molecular membrane separations: plants inspire new technologies. *New Phytology*. 2023, 238, 33 – 54 <https://doi.org/10.1111/nph.18762>
9. Sumalan R.L., Nescu V., Berbeccea A., Sumalan R.M., Crisan M., Negrea P., Ciulca S. The impact of heavy metal accumulation on some physiological parameters in *Silphium perfoliatum* L. grown in hydroponic system. *Plants*. 2023, 12(8), 1718 <https://doi.org/10.3390/plants12081718>
10. Dabrowski S.A., Isaenkovm S.V. The regulation of plant cell wall organization under salt stress. *Frontiers in Plant Science*. 2023, 14, 1118313 <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1118313>

References

1. Anwaar, S., Ali S., Ali, S., Ishaque, W., Farid, M., Farooq, M. A., Najeeb, U., Abbas, F. (2020). Copper oxide nanoparticles: phytotoxicity and role in plant growth modulation. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 2983 - 2998
2. Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.
3. Rico, C. M., Majumdar, S., Duarte-Gardea M., Peralta-Videa, J. R., Gardea-Torresdey, J. L. (2011). Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(8), 3485 - 3498
4. Barakat, M.N., Abdel-Latif, T.H. (1996) *In vitro* selection of wheat callus tolerant to high level of salt and plant regeneration. *Euphytica*, 91(2), 127 – 140 <https://doi.org/10.1007/BF00021062>
5. Siddiqi, K. S., Husen, A. (2017). Plant response to engineered metal oxide nanoparticles. *Nanoscale Research Letters*, 12, 92
6. Thorpe, T. A. (2007). History of plant tissue culture. *Molecular Biotechnology*, 37, 169–180.
7. Colin, I., Ruhnnow, F., Zhu, L – K., Zhao, Y., Person, S. (2023) The cell biology of primary cell wats during salt stress. *The plant cell*, 35(1), 201 – 207 <https://doi.org/10.1093/plcel/koa292>
8. De Rosa, A., McGaughey, S., Magrath, I., Byrt, C. (2023) Molecular membrane separations: plants inspire new technologies. *New Phytology*, 238, 33 – 54 <https://doi.org/10.1111/nph.18762>
9. Sumalan, R.L., Nescu, V., Berbeccea, A., Sumalan, R.M., Crisan, M., Negrea, P., Ciulca, S. (2023) The impact of heavy metal accumulation on some physiological parameters in *Silphium perfoliatum* L. grown in hydroponic system. *Plants*, 12(8), 1718 <https://doi.org/10.3390/plants12081718>
10. Dabrovolski, S.A., Isaenkovm, S.V. (2023) The regulation of plant cell wall organization under salt stress. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1118313 <https://doi.10.3389/fpls.2023.1118313>

Насібов Хікмет Насір

доцент, директор Науково-дослідного інституту
овочівництва Бакинського державного університету
Баку, Азербайджан
nesibov.hikmet@teti.az
orcid.org/0009-0003-4769-0977

Хасанзада Айхан Відаді

магістрант Бакинського державного університету
Бакинського державного університету
Баку, Азербайджан
aухanhesen1234@gmail.com
orcid.org/0009-0006-8652-5853

Кулузада Зека Назір

аспірант Бакинського державного університету
Науково-дослідного інституту
овочівництва, державної юридичної особи,
Баку, Азербайджан
orcid.org/0009-0004-3964-2277

ПІДВИЩЕННЯ ІНДУКЦІЇ УТВОРЕННЯ КАЛУСУ ТА РЕГЕНЕРАЦІЇ У КАРТОПЛІ (*SOLANUM TUBEROSUM* L., СОРТ *CHANLIBEL*) ЗА ДОПОМОГОЮ НАНОЧАСТИНОК ОКСИДУ ЗАЛІЗА ТА МІДІ

Застосування наночастинок (НЧ) у культурі рослинних тканин стало перспективною стратегією для покращення морфогенезу та ефективності регенерації.

Незважаючи на накопичення доказів щодо посилення реакцій культури рослинних тканин за допомогою наночастинок, інформація про їх застосування на картоплі, зокрема у сорту *Chanlibel*, обмежена. Відсутність систематичної оцінки наночастинок Fe_3O_4 та CuO у цьому генотипі являє собою значну прогалину в знаннях. Тому метою цього дослідження було дослідити вплив різних концентрацій наночастинок Fe_3O_4 та CuO на індукцію калюсу, ріст калюсу та регенерацію пагонів у *Solanum tuberosum* L. cv. *Chanlibel* в умовах *in vitro*. У цьому дослідженні оцінювали вплив наночастинок оксиду заліза (Fe_3O_4) та оксиду міді (CuO) на індукцію калюсу та регенерацію *in vitro* картоплі (*Solanum tuberosum* L., сорт *Chanlibel*).

Експлантати культивували на середовищі Мурасіге та Скуга (MS), доповненому наночастинами Fe_3O_4 або CuO у концентраціях 0,25, 5 та 10 мг/л. Частота індукції калюсу збільшувалася з концентрацією Fe_3O_4 до 5 мг/л, досягаючи максимуму 82% порівняно з 60% у контролі. Аналогічно, свіжа маса калюсу та частота регенерації пагонів були найвищими при 5 мг/л, зі значеннями 0,70 г та 68% відповідно. Збільшення концентрації до 10 мг/л дещо знизило як індукцію калюсу (72%), так і регенерацію пагонів (55%). Для визначення ефективності обробки оцінювали частоту індукції калюсу, масу свіжого калюсу та відсоток регенерації пагонів. Наночастинки Fe_3O_4 значно посилювали морфогенетичні реакції, причому найвища ефективність спостерігалася при 10 мг L^{-1} , що призвело до 82% індукції калюсу та 68% регенерації пагонів. Наночастинки CuO демонстрували концентраційно-залежну реакцію, з оптимальним ефектом при 5 мг L^{-1} (78% індукції калюсу та 64% регенерації пагонів), тоді як 10 мг L^{-1} викликали інгібуючий ефект, включаючи зниження регенерації та потемніння калюсу. Морфологічна оцінка виявила компактні, зелені калюси при обробці Fe_3O_4 , тоді як підвищений рівень CuO індуквав потемніння тканин, що вказує на потенційну фітотоксичність.

Загалом, результати дослідження показують, що належним чином оптимізоване додавання наночастинок Fe_3O_4 та CuO може покращити ефективність регенерації *in vitro* у картоплі, що підкреслює їх потенційне застосування в передовій біотехнології рослин та системах мікророзмноження.

Ключові слова: наночастинки; оксид заліза (Fe_3O_4); оксид міді (CuO); індукція калюсу; регенерація *in vitro*; картопля; *Solanum tuberosum* L.

Стаття до редакції надійшла 31.03.2026 року
Рецензія на статтю надійшла 13.04.2026 року

УДК 582.794.1:[543.6+615.322]

DOI 10.31654/2786-8478-2026-BN-2-48-59

Fatima Rashidova

Department of Pharmacy,
Azerbaijan State Agricultural University
Baku, Azejbardjan
fatima.rashidova@adau.edu.az
orcid.org/0009-0001-0180-599X

Ziyaddin Mammadov

Department of Molecular biology
and biotechnology, Baku State University
Baku, Azejbardjan
ziyaddin.mammadov@bsu.edu.az
<https://orcid.org/0000-0001-8009-194X>

**PRIMARY PHYTOCHEMICAL ANALYSIS
OF *PRANGOS ACAULIS* (LINDL.) BORNM.
AND COMPARATIVE ANALYSIS WITH *PRANGOS FERULACEA* (L.) LINDL.**

Prangos is a perennial herb belonging to the *Apiaceae* family. This genus is primarily distributed in dry and semi-desert climates. Numerous species of the *Prangos* genus have been studied, and extensive phytochemical analyses have been conducted, revealing that they are rich in biologically active compounds. However, sufficient information regarding *Prangos acaulis* is lacking. Major classes of phytochemicals with disease-preventive properties include dietary fiber, antioxidants, anticancer agents, detoxifying substances, immune enhancers, and neuropharmacological compounds. The potential richness of the phytochemical composition of this species, considering its pharmacological properties, suggests that it may become a future raw material for medicine, and for this reason, the study of the plant is important. The aim of the research is to perform a phytochemical analysis of *P. acaulis* and *P. ferulacea* species using paper chromatography, to conduct preliminary screening for *P. acaulis*, and to evaluate the obtained results in comparison with *P. ferulacea*. The percolation method was employed to obtain plant extracts. Both dried and powdered plant samples were accurately weighed to 20 g each. The measured plant material was soaked in 20 ml of 70% ethanol and allowed to stand for 24 hours. After another 24-hour standing period, the liquid was completely filtered and returned to the separating funnel. From the 20 g sample, 80% was collected as the primary extract at a rate of approximately 40 drops per hour and set aside. To conduct the research, the collected plants were dried under identical conditions, ground into powder, extracts were obtained, and the analysis was performed using paper chromatography. Based on the results of the analysis, specific biologically active compounds were identified on the chromatogram, and the *R_f* values were calculated and compared. The evaluation of the obtained results suggests that the chromatographic profiles of the extracts, in combination with the specific reagents employed, provide insight into the possible functional groups present in the separated compounds. In the present study, a preliminary phytochemical analysis was conducted on 70% ethanol extracts obtained from the leaves and roots of *Prangos acaulis* using the percolation method. This similarity suggests that *P. acaulis* may also possess a diverse array of bioactive compounds. Nevertheless, it should be emphasized that further comprehensive and detailed investigations are necessary to accurately identify the specific classes of bioactive substances present and to determine the exact molecular composition of this species.

Keywords: *Prangos acaulis*, *Prangos ferulacea*, paper chromatography, phytochemical analysis.

Introduction. Medicinal plants have played a significant role in the development of human civilization. For thousands of years, they have been used to treat health ailments, enhance flavor and preserve food, and prevent disease epidemics [1]. Medicinal plants play an important role in disease prevention, and their promotion and use align with all existing prevention strategies [2].

Across Europe, over 1,300 species of medicinal plants are utilized, with the vast majority (90%) being sourced from wild populations. In the United States, natural products form the basis for approximately 118 of the top 150 prescription medications. Furthermore, plant-based remedies constitute the primary healthcare method for up to 80% of individuals in developing nations. Similarly, in developed countries, more than a quarter (25%) of prescription drugs are derived from wild plant species [3].

Every year, individuals turn to herbal remedies under the belief that they cause fewer adverse side effects. In the United States, approximately 8% of hospital admissions result from negative responses to synthetic drugs, with at least 100,000 deaths occurring annually due to such toxic effects [4]. More than 50,000 plant species—representing over one-tenth of all known species—are utilized in pharmaceutical and cosmetic products. However, the global distribution of medicinal plants is uneven, and they are primarily harvested from wild populations. In fact, in recent decades, the demand for wild plant resources has risen by 8% to 15% annually in regions such as Europe, North America, and Asia [5].

Medicinal plants contain various organic compounds that exert specific physiological effects on the human body. These bioactive substances include tannins, alkaloids, carbohydrates, terpenoids, steroids, and flavonoids. Such compounds are produced through the secondary metabolism of living organisms. Secondary metabolites are chemically diverse and often have unclear taxonomic or functional roles, yet they are widely applied in human medicine, veterinary science, agriculture, research, and numerous other fields [6]. Research conducted over the past two to three decades indicates that these phytochemicals play a significant role in preventing chronic diseases, including cancer, diabetes, and coronary heart disease. Major classes of phytochemicals with disease-preventive properties include dietary fiber, antioxidants, anticancer agents, detoxifying substances, immune enhancers, and neuropharmacological compounds [7].

Among these, flavonoids are recognized for their strong antioxidant, anti-inflammatory, antibacterial, and anticarcinogenic activities, as well as their ability to regulate free radicals. Consequently, they are utilized in the treatment of various diseases [8]. Coumarins, another group of bioactive compounds, have been shown to possess anti-inflammatory, anticoagulant, antibacterial, antifungal, antiviral, anticancer, antihypertensive, antituberculosis, antioxidant, and neuroprotective effects [9]. Additionally, terpenoids are reported in the literature to exhibit a range of pharmacological activities [10].

A variety of methods are employed to identify biologically active compounds in plants, with chromatographic analysis being one of the most commonly used techniques. Chromatography operates on the principle of separating molecules within a mixture by applying them to a solid surface or solid phase and then mobilizing them using a liquid or gaseous mobile phase [11]. The fundamental mechanism underlying all chromatographic methods relies on two key components: the stationary phase and the mobile phase [12]. Paper chromatography is a specific analytical technique used to separate colored substances or compounds, in which paper serves as the stationary phase [13].

In this method, the cellulose fibers of the paper function as the stationary phase, while a solvent, referred to as the developing liquid or eluent, acts as the mobile phase [14]. It is important to note that the behavior of the stationary phase may vary depending on the nature and solubility of each compound being analyzed. Despite its utility, paper chromatography has certain limitations. One drawback is that different compounds may exhibit identical retention values when using the same solvent system. Furthermore, the reproducibility of the method can be influenced by factors such as solvent temperature, the quality of the chromatography paper, solvent purity, and the amount of sample applied.

These limitations have contributed to a decline in both the popularity and the range of applications of this method over time [15].

For this reason, paper chromatography was employed for the preliminary screening of the phytochemical composition of selected species within the *Prangos* genus, which serves as the focus of this research. The *Prangos* genus consists of perennial herbs belonging to the Apiaceae family. Within the flora of Azerbaijan, the Apiaceae family comprises 75 genera and 184 species, while in the flora of the Nakhchivan Autonomous Republic, it includes 57 genera and 107 species. The *Prangos* genus itself is represented by five species in this region [16]. Most of these species are aromatic plants characterized by hollow stems, and many are utilized as vegetables or spices [17]. *Prangos ferulacea* (L.) Lindl., commonly known as "common chashir," can reach heights of up to 150 cm. It features light yellow flowers and emits an unpleasant odor. Its umbels consist of 6 to 16 rays, and the length of its oval fruits ranges from 15 to 20 mm. Flowering typically occurs in May and June, with fruit production taking place from June to August [16].

In contrast, *Prangos acaulis*, referred to as "stemless chashir," grows to a height of 20 to 40 cm. Although many species within the genus have been extensively investigated in previous studies [18], research on *P. acaulis* remains quite limited. In the present study, preliminary phytochemical analyses of *P. acaulis* were conducted using paper chromatography, and a comparative analysis with *P. ferulacea* was also carried out.

Materials and Methods. *P. acaulis* specimens were collected in May 2025 from the Ordubad district of the Nakhchivan Autonomous Republic, specifically at the foot of Soyudqdag near the bank of the Diyachay River. *P. ferulacea* samples were collected in May 2025 from the Kalbajar district. Following collection, the plant materials were thoroughly dried in open air, protected from direct sunlight. Once dried, they were stored in dark glass containers placed in a cool, dark location until extract preparation.

The percolation method was employed to obtain plant extracts. Both dried and powdered plant samples were accurately weighed to 20 g each. The measured plant material was soaked in 20 ml of 70% ethanol and allowed to stand for 24 hours. Subsequently, the soaked material was transferred to a separating funnel, and additional 70% ethanol was added until a mirror layer formed. After another 24-hour standing period, the liquid was completely filtered and returned to the separating funnel. From the 20 g sample, 80% was collected as the primary extract at a rate of approximately 40 drops per hour and set aside. To complete the extraction process, 70% ethanol was continuously added to the separating funnel containing the plant material until the resulting extract became colorless. The extract was then evaporated until a 20% dry residue was achieved and combined with the primary extract. To remove ballast substances, the combined extract was refrigerated for 24 hours, filtered through filter paper, and prepared for subsequent use.

For the chromatographic analysis, Whatman No.1 paper was used as the stationary phase. The following solvent systems were employed as mobile phases: chloroform:methanol:water (7:3:0.4), chloroform:butanol:water (8:1:1), and butanol:acetic acid:water (4:1:5). For each analysis, the paper was cut into pieces measuring 9–13 cm in length and 6–8 cm in width, and a starting line was drawn 2 cm from the bottom edge. Using a micropipette, extracts obtained from the leaves and roots of the plants were applied separately onto the starting line in multiple applications, allowing each spot to dry between applications. After the spots were completely dried, the paper was placed into a chromatography chamber that had been previously saturated with mobile phase vapors.

The development process was allowed to proceed for 45 to 90 minutes, during which the migration of the compounds was observed. Following development, the paper was removed from the chamber, dried, and then exposed to ammonia vapor to enhance the visibility of the separated spots. For the identification of biologically active compounds, chemical reagents such as 1% aluminum chloride (AlCl_3) and 1% iron(III) chloride (FeCl_3) were used. Additionally, spots that were not visible under normal light were detected using

UV light at a wavelength of 365 nm. Finally, the retention factor (Rf) values of the detected substances were calculated and compared.

Results. In the present study, the chromatographic analysis revealed the presence of several components in the plant samples, and successful separation of these compounds was achieved. The chromatograms obtained from leaf and root extracts of *Prangos acaulis* and *Prangos ferulacea*, developed using different solvent systems, are presented below in Figures 1–3.

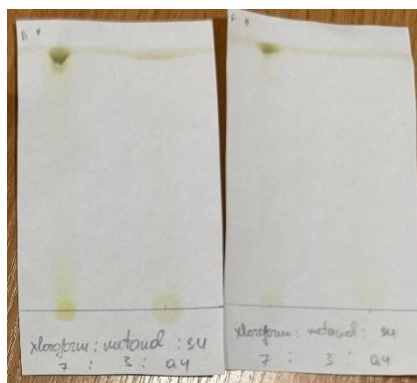


Figure 1. Chromatogram of leaf and root extracts obtained from *Prangos acaulis* and *Prangos ferulacea*, developed using a solvent system consisting of chloroform, methanol, and water in a ratio of 7:3:0.4

In the chromatogram developed using the chloroform:methanol:water (7:3:0.4) solvent system, a green spot with an Rf value of 0.92 was observed in the leaf extract of *Prangos acaulis*, while the yellow component remained almost at the baseline, showing minimal migration. In the root extract of the same species, a yellow spot with an Rf value of 0.06 was detected, indicating very limited movement. For *Prangos ferulacea*, the leaf extract exhibited a green spot with an Rf value of 0.94, with the yellow component again showing negligible migration. In the root extract, a yellow spot with an Rf value of 0.05 was observed, also reflecting very low mobility.

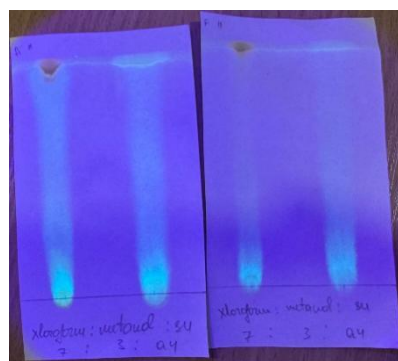


Figure 1 (a). Chromatogram of leaf and root extracts obtained from *Prangos acaulis* and *Prangos ferulacea*, developed using a solvent system consisting of chloroform, methanol, and water in a ratio of 7:3:0.4, observed under UV light

In the chromatogram developed using the chloroform:methanol:water (7:3:0.4) solvent system, previously invisible spots were detected in both the leaf and root extracts of the two plant species. These spots exhibited blue fluorescence and a brown coloration when visualized under UV light at a wavelength of 365 nm.

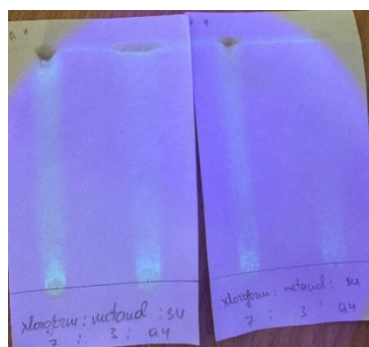


Figure 1 (b). Chromatogram of leaf and root extracts obtained from *Prangos acaulis* and *Prangos ferulacea*, developed using a solvent system consisting of chloroform, methanol, and water in a ratio of 7:3:0.4, treated with AlCl_3 and visualized under UV light

After treating the chromatogram of the leaf and root extracts of both plants, developed in the chloroform:methanol:water (7:3:0.4) system, with 1% AlCl_3 solution and visualizing under UV light, yellow dotted spots were observed along the migration path of the compounds, in addition to the previously noted blue fluorescence and brown spot.

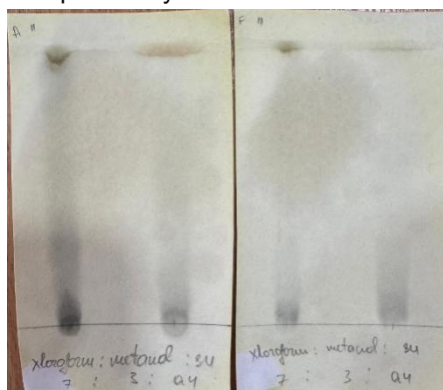


Figure 1 (c). Chromatogram of leaf and root extracts obtained from *Prangos acaulis* and *Prangos ferulacea*, developed using a solvent system consisting of chloroform, methanol, and water in a ratio of 7:3:0.4, treated with FeCl_3

Upon treatment of the chromatogram of the leaf and root extracts of both plants, developed in the chloroform:methanol:water (7:3:0.4) system, with 1% FeCl_3 solution, blue spots were observed along the migration path of the compounds.



Figure 2. Chromatogram of leaf and root extracts obtained from *Prangos acaulis* and *Prangos ferulacea*, developed using a solvent system consisting of chloroform, butanol, and water in a ratio of 8:1:1

In the chromatogram developed using the chloroform:butanol:water (8:1:1) solvent system, a green spot with an Rf value of 0.85 was observed in the leaf extract of *Prangos acaulis*, while the yellow component remained almost at the baseline, showing negligible migration. In the root extract of the same species, a yellow spot with an Rf value of 0.06 was detected, indicating very limited movement. For *Prangos ferulacea*, the leaf extract exhibited a green spot with an Rf value of 0.45, with the yellow component again showing minimal migration. In the root extract, a yellow spot with an Rf value of 0.7 was observed.

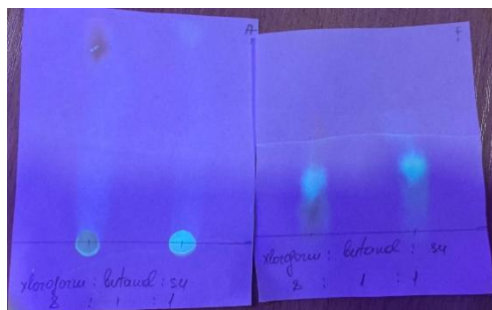


Figure 2 (a). Chromatogram of leaf and root extracts obtained from *Prangos acaulis* and *Prangos ferulacea*, developed using a solvent system consisting of chloroform, butanol, and water in a ratio of 8:1:1, observed under UV light

In the chromatogram developed using the chloroform:butanol:water (8:1:1) solvent system, previously invisible spots were detected in both the leaf and root extracts of the two plant species. These spots exhibited blue fluorescence and a brown coloration when visualized under UV light at a wavelength of 365 nm.

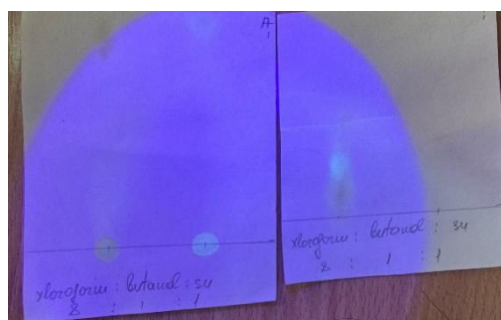


Figure 2 (b). Chromatogram of leaf and root extracts obtained from *Prangos acaulis* and *Prangos ferulacea*, developed using a solvent system consisting of chloroform, butanol, and water in a ratio of 8:1:1, treated with AlCl_3 and visualized under UV light

After treating the chromatogram of the leaf and root extracts of both plants, developed in the chloroform:butanol:water (8:1:1) system, with 1% AlCl_3 solution and visualizing under UV light, blue fluorescence and brown spots were observed.

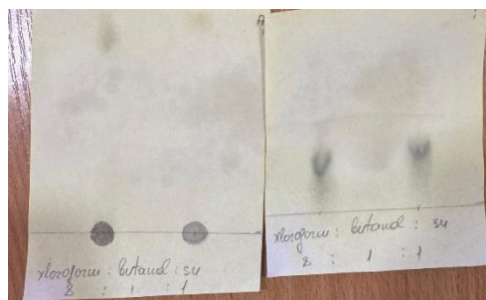


Figure 2 (c). Chromatogram of leaf and root extracts obtained from *Prangos acaulis* and *Prangos ferulacea*, developed using a solvent system consisting of chloroform, butanol, and water in a ratio of 8:1:1, treated with FeCl_3

Upon treatment of the chromatogram of the leaf and root extracts of both plants, developed in the chloroform:butanol:water (8:1:1) system, with 1% FeCl_3 solution, blue spots were observed along the migration path of the compounds.



Figure 3. Chromatogram of leaf and root extracts obtained from *Prangos acaulis* and *Prangos ferulacea*, developed using a solvent system consisting of butanol, acetic acid, and water in a ratio of 4:1:5

In the chromatogram developed using the butanol:acetic acid:water (4:1:5) solvent system, a green spot with an R_f value of 0.8 was observed in the leaf extract of *Prangos acaulis*, while the yellow component remained almost at the baseline, showing negligible migration. In the root extract of the same species, a yellow spot with an R_f value of 0.96 was detected. For *Prangos ferulacea*, the leaf extract exhibited a green spot that remained at the origin ($R_f = 0$) and a yellow spot with an R_f value of 0.8. In the root extract, a yellow spot with an R_f value of 0.8 was also observed.

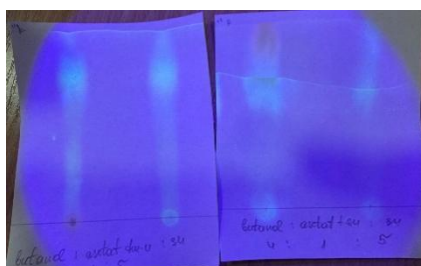


Figure 3 (a). Chromatogram of leaf and root extracts obtained from *Prangos acaulis* and *Prangos ferulacea*, developed using a solvent system consisting of butanol, acetic acid, and water in a ratio of 4:1:5, observed under UV light

In the chromatogram developed using the butanol:acetic acid:water (4:1:5) solvent system, previously invisible spots were detected in both the leaf and root extracts of the two plant species. These spots exhibited blue fluorescence and a brown coloration when visualized under UV light at a wavelength of 365 nm.

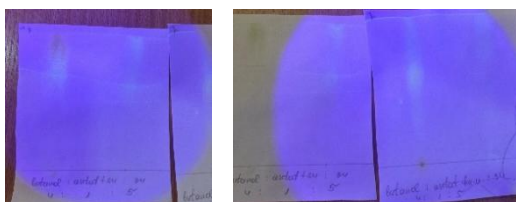


Figure 3 (b). Chromatogram of leaf and root extracts obtained from *Prangos acaulis* and *Prangos ferulacea*, developed using a solvent system consisting of butanol, acetic acid, and water in a ratio of 4:1:5, treated with AlCl_3 and visualized under UV light

After treating the chromatogram of the leaf and root extracts of both plants, developed in the butanol:acetic acid:water (4:1:5) system, with 1% AlCl_3 solution and visualizing under UV light, blue fluorescence and brown spots were observed.

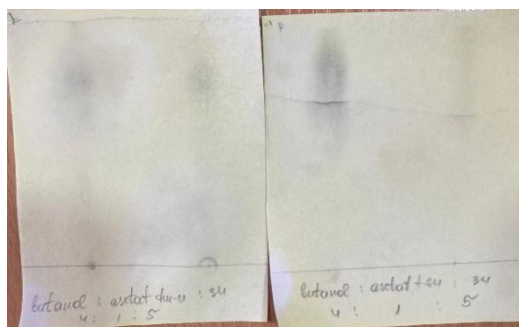


Figure 3 (c). Chromatogram of leaf and root extracts obtained from *Prangos acaulis* and *Prangos ferulacea*, developed using a solvent system consisting of butanol, acetic acid, and water in a ratio of 4:1:5, treated with FeCl_3

Upon treatment of the chromatogram of the leaf and root extracts of both plants, developed in the butanol:acetic acid:water (4:1:5) system, with 1% FeCl_3 solution, blue spots were observed along the migration path of the compounds.

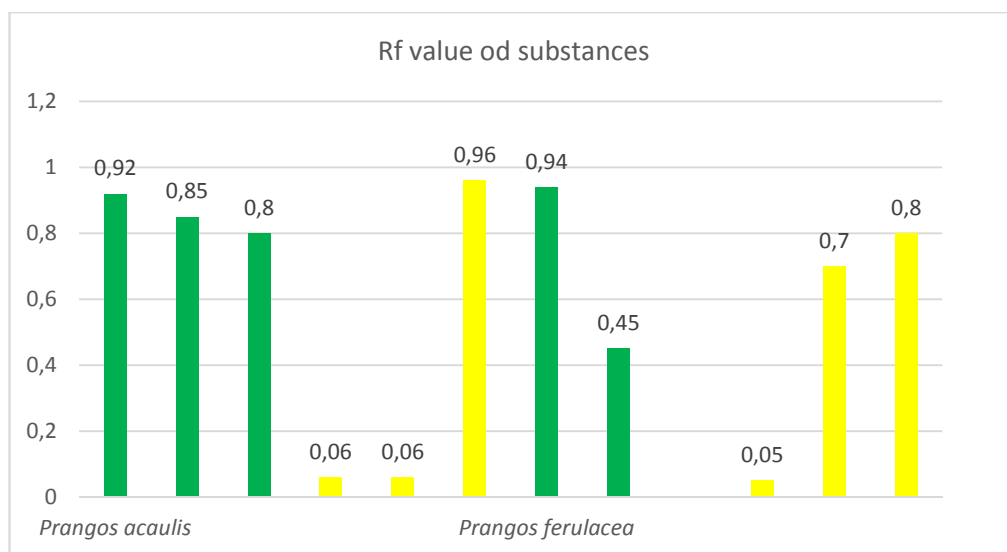


Diagram 1. Rf values calculated from the chromatograms of extracts obtained from *Prangos acaulis* and *Prangos ferulacea*

Order of the solvent systems: chloroform:methanol:water – chloroform:butanol:water – butanol:acetic acid:water

Discussion. The evaluation of the obtained results suggests that the chromatographic profiles of the extracts, in combination with the specific reagents employed, provide insight into the possible functional groups present in the separated compounds. Examination of the chromatograms obtained from different solvent systems, as presented in Figures 1, 2, and 3, indicates that the spots observed in both studied plant species may be associated with photosynthetic pigments such as chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids.

As previously noted, the chromatograms shown in Figures 1a, 2a, and 3a were visualized under UV light at a wavelength of 365 nm. Across all three solvent systems, spots

that were not visible to the naked eye exhibited blue fluorescence and brown coloration under UV illumination. Based on available literature, such fluorescence characteristics suggest the potential presence of coumarins, flavonoids, and other phenolic compounds [19].

In Figures 1b, 2b, and 3b, the chromatograms were treated with $AlCl_3$ and subsequently visualized under UV light. A closer examination of Figure 1b reveals the presence of yellow dotted spots along the migration path of the compounds. Based on findings from previous studies indicating that such spots are characteristic of flavonoids [20], it can be inferred that the investigated plant species may also be rich in flavonoid compounds. It is worth noting, however, that similar spots were not observed in the chromatograms presented in Figures 2b and 3b, which may suggest that these compounds did not dissolve effectively in the respective solvent systems used.

In Figures 1c, 2c, and 3c, the chromatograms were treated with $FeCl_3$. Following this treatment, the spots exhibited a blue coloration. This color change is indicative of the possible presence of phenolic compounds within the plant extracts [21].

As previously noted, while information regarding the phytochemical composition of *P. acaulis* remains limited, the chemical profile of *P. ferulacea* has been extensively documented in the literature [22, 23]. Given the well-established bioactive properties and rich phytochemical content of *P. ferulacea*, a comparison of the chromatograms obtained from both species in this study reveals overlapping spots. This similarity suggests that *P. acaulis* may also possess a diverse array of bioactive compounds. Nevertheless, it should be emphasized that further comprehensive and detailed investigations are necessary to accurately identify the specific classes of bioactive substances present and to determine the exact molecular composition of this species.

Conclusion. In the present study, a preliminary phytochemical analysis was conducted on 70% ethanol extracts obtained from the leaves and roots of *Prangos acaulis* using the percolation method. The analysis was carried out by means of paper chromatography, and the results were compared with those of *Prangos ferulacea*. The chromatographic profiles obtained indicate that both plant species may be rich in biologically active compounds, including phenols, flavonoids, and coumarins.

Список використаних джерел

1. Dar R.A., Shahnawaz M., Parvaiz Qazi P.H. General overview of medicinal plants: A review. *The Journal of Phytopharmacology*. 2017, 6(6), 349-351. Available at: www.phytopharmajournal.com
2. Eytape S.A., Onayade O.A. The role and place of medicinal plants in the strategies for disease prevention. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicine*. 2013, 10(5), 210–229. <http://dx.doi.org/10.4314/ajtcam.v10i5.2>
3. Chen S.L., Yu H., Luo H.M., Wu Q., Li C-F., Steinmetz A. Conservation and sustainable use of medicinal plants: Problems, progress, and prospects. *Chinese Medicine*. 2016, 11-37 <https://doi.org/10.1186/s13020-016-0108-7>
4. Nasri H., Shirzad H. Toxicity and safety of medicinal plants. *Journal of HerbMed Pharmacology*. 2013, 2(2), 21-22. Available at: <http://www.herbmedpharmacol.com>
5. Jamshidi-Kia F., Lorigooini Z., Amini-Khoei H. Medicinal plants: Past history and future perspective. *Journal of HerbMed Pharmacology*. 2018; 7(1): 1-7. <http://dx.doi.org/10.15171/jhp.2018.01>
6. Yadav R.N.S., Agarwala M. Phytochemical analysis of some medicinal plants. *Journal of Phytology*. 2011, 3(12), 10-14.
7. Mamta Saxena, Jyoti Saxena, Rajeev Nema Dharmendra Singh Abhishek Gupta. Phytochemistry of medicinal plants. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2013, 1(6).
8. Karak P. Biological activities of flavonoids: An overview. 2017, *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*. [http://dx.doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.10\(4\).1567-74](http://dx.doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.10(4).1567-74)

9. Venugopala K. N., Rashmi V., Odhav B. Review on natural coumarin lead compounds for their pharmacological activity. *BioMed Research International*. 2013; <http://dx.doi.org/10.1155/2013/963248>
10. Yan W., Chen X., Li Y., Guo S., Wang Z., Yu X. Advances in pharmacological activities of terpenoids. *Natural Product Communications*. 2020, 15(3), 1-13. <http://dx.doi.org/10.1177/1934578X20903555>
11. Coskun Ö. Separation techniques: Chromatography. *Northern Clinics of Istanbul*. 2016, 3(2), 156–160. <http://dx.doi.org/10.14744/nci.2016.32757>
12. Sharma D.U., Kumar L., Verma R. Selection of stationary phase and mobile phase in high performance liquid chromatography. *Research Journal of Pharmacy and Technology*. 2022, 15(9). <http://dx.doi.org/10.52711/0974-360X.2022.00726>
13. Ebere E.C., Obinna I.B., Wirnkor V.A. Applications of column, paper, thin layer and ion exchange chromatography in purifying samples: Mini review. *Science Forecast Publications*. 2019, 2(2), 229-237
14. Bachalla N. Identification of synthetic food colors adulteration by paper chromatography and spectrophotometric methods. *IAIM*. 2016, 3(6), 182-191.
15. Arora R., Vig A.P., Arora S. Glucosinolates: Transposing trends of identification methods from paper chromatography to microchip analysis. *International Journal of Life Sciences Biotechnology and Pharma Research*. 2014, 44(2), 877 – 810.
16. Safarova F., Ismayilova V., Nasirova A. Apiaceae Lindl in flora of Nakhchivan Autonomous Republic: Poisonous species of the celery family. 2021, pp. 6-11 <http://dx.doi.org/10.54414/UPXH5896>
17. Mottaghipisheh J., Kiss T., Toth B., Csupor D. The Prangos genus: A comprehensive review on traditional use, phytochemistry, and pharmacological activities. *Phytochemistry Reviews*. 2020, 19, 1449-1470. <https://doi.org/10.1007/s11101-020-09688-3>
19. Kovac E.E., Besovic K.D. Thin layer chromatography: Application in qualitative analysis on presence of coumarins and flavonoids in plant material. *Bosnian Journal of Basic Medical Sciences*. 2023, 3(3), 409 – 422
20. Garg J., Ghoshal G., Bhadada S.K., Katare O.P. Derivatization mechanistic-guided identification of phytoconstituents of different extracts of *Cissus quadrangularis* by TLC and standardization by HPTLC. *Phytomedicine Plus*. 2024, 4, 100601. <https://doi.org/10.1016/j.phyplu.2024.100601>
21. Asriani Suhaenah, Suki Hartina Aminah. Determination of phenolic and flavonoid content of ethanol extract of Manila Sawo leaf (*Manilkara zapota* L.) from Wajo District by UV-Vis spectrophotometry. *Pharm Rep*. 2024; 2(3): 50–55.
22. Kafash-Farkhad, N, Asadi-Samani, M, Rafieian-Kopaei, M. A review on phytochemistry and pharmacological effects of *Prangos ferulacea* (L.) Lindl. *Life Science Journal*. 2013, 10(8s), 360-367.
23. Bruno M., Ilardi V., Lupidi G., Quassinti L., Bramucci M., Fiorini Dennis D., Venditti A., Maggi Filippo. The nonvolatile and volatile metabolites of *Prangos ferulacea* and their biological properties. *Planta Medica*. 2019, 85, 815-824 <https://doi.org/10.1055/a-0873-8622>

References

1. Dar, R.A., Shah Nawaz, M., Parvaiz Qazi, P.H. (2017) General overview of medicinal plants: A review. *The Journal of Phytopharmacology*. 6(6), 349-351.
2. Eytape, S.A., Onayade, O.A., (2013) The role and place of medicinal plants in the strategies for disease prevention. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines*. 10(5), 210-229. <http://dx.doi.org/10.4314/ajtcam.v10i5.2>
3. Chen, S.L., Yu, H., Luo, H.M., Wu, Q., Li, C-F., Steinmetz, A. (2016). Conservation and sustainable use of medicinal plants: Problems, progress, and prospects. *Chinese Medicine*, 2016, 11-37 <https://doi.org/10.1186/s13020-016-0108-7>
4. Nasri, H., Shirzad, H. (2013) Toxicity and safety of medicinal plants. *Journal of HerbMed Pharmacology*. 2(2), 21–22.
5. Jamshidi-Kia, F., Lorigooini, Z., Amini-Khoei, H. (2018) Medicinal plants: Past history and future perspective. *Journal of HerbMed Pharmacology*. 2018, 7(1), 1–7. <http://dx.doi.org/10.15171/jhp.2018.01>

6. Yadav, RNS., Agarwala, M. (2011) Phytochemical analysis of some medicinal plants. *Journal of Phytology*. 3(12), 10-14.
7. Mamta, Saxena., Jyoti, Saxena., Rajeev, Nema, Dharmendra Singh., Abhishek Gupta. (2013) Phytochemistry of medicinal plants. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 1(6).
8. Karak, P. (2017) Biological activities of flavonoids: An overview. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*. [http://dx.doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.10\(4\).1567-74](http://dx.doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.10(4).1567-74)
9. Venugopala, K. N., Rashmi, V., Odhav, B. (2013) Review on natural coumarin lead compounds for their pharmacological activity. *BioMed Research International*. 2013, 963248. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/963248>
10. Yan, W., Chen, X., Li, Y., Guo, S., Wang, Z., Yu, X. (2020) Advances in pharmacological activities of terpenoids. *Natural Product Communications*. 15(3), 1–13. <http://dx.doi.org/10.1177/1934578X20903555>
11. Coskun, Ö. (2016) Separation techniques: Chromatography. *Northern Clinics of Istanbul*. 3(2), 156-160. <http://dx.doi.org/10.14744/nci.2016.32757>
12. Sharma, D.U., Kumar, L., Verma, R. (2022) Selection of stationary phase and mobile phase in high performance liquid chromatography. *Research Journal of Pharmacy and Technology*. 15(9). <http://dx.doi.org/10.52711/0974-360X.2022.00726>
13. Ebere, E.C., Obinna, I.B., Wirmkor, V.A. (2019) Applications of column, paper, thin layer and ion exchange chromatography in purifying samples: Mini review. *ScienceForecast Publications*. 2(2), 1018.
14. Bachalla, N. (2016) Identification of synthetic food colors adulteration by paper chromatography and spectrophotometric methods. *IAIM*. 3(6), 182–191.
15. Arora, R., Vig, A.P., Arora, S. (2014) Glucosinolates: Transposing trends of identification methods from paper chromatography to microchip analysis. *International Journal of Life Sciences Biotechnology and Pharma Research*. 44(2), 877 – 810.
16. Safarova, F., Ismayilova, V., Nasirova, A. (2021) Apiaceae Lindl in flora of Nakhchivan Autonomous Republic: Poisonous species of the celery family. Pp. 6–11. <http://dx.doi.org/10.54414/UPXH5896>
17. Mottaghipisheh, J., Kiss, T., Toth, B., Csupor, D. (2020) The Prangos genus: A comprehensive review on traditional use, phytochemistry, and pharmacological activities. *Phytochemistry Reviews*. 19, 1449-1470. <https://doi.org/10.1007/s11101-020-09688-3>
19. Kovac, E.E., Besovic, K.D. (2003) Thin layer chromatography: Application in qualitative analysis on presence of coumarins and flavonoids in plant material. *Bosnian Journal of Basic Medical Sciences*. 3(3), 409 – 422
20. Garg, J., Ghoshal, G., Bhadada, S.K., Katore, O.P. (2024) Derivatization mechanistic-guided identification of phytoconstituents of different extracts of *Cissus quadrangularis* by TLC and standardization by HPTLC. *Phytomedicine Plus*. 4, 100601. <https://doi.org/10.1016/j.phyplu.2024.100601>
21. Asriani Suhaenah, Suki Hartina, Aminah. Determination of phenolic and flavonoid content of ethanol extract of Manila Sawo leaf (*Manilkara zapota* L.) from Wajo District by UV-Vis spectrophotometry. *Pharm Rep*. 2024, 2(3), 50–55.
22. Kafash-Farkhad, N, Asadi-Samani, M, Rafieian-Kopaei, M. (2013) A review on phytochemistry and pharmacological effects of *Prangos ferulacea* (L.) Lindl. *Life Science Journal*. 10(8s), 360-367.
23. Bruno, M., Ilardi, V., Lupidi, G., Quassinti, L., Bramucci, M., Fiorini, Dennis D., Venditti, A., Maggi, Filippo. (2019) The nonvolatile and volatile metabolites of *Prangos ferulacea* and their biological properties. *Planta Medica*. 85, 815-824 <https://doi.org/10.1055/a-0873-8622>

Фатіма Рашидова

кафедра фармації,
Азербайджанського державного
сільськогосподарського університету

Баку, Азербарджан
fatima.rashidova@adau.edu.az
orcid.org/0009-0001-0180-599X

Зіяддін Мамедов

кафедра молекулярної біології
та біотехнології,
Бакинського державного університету
Баку, Азербарджан
ziyaddin.mammadov@bsu.edu.az
orcid.org/0000-0001-8009-194X

ПОПЕРЕДНІЙ ФІТОХІМІЧНИЙ АНАЛІЗ PRANGOS ACAULIS (LINDL.) BORNH. ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ІЗ PRANGOS FERULACEA (L.) LINDL.

Прангос безлокий (Prangos acaulis) – це багаторічна трав'яниста рослина родини Зонтичних (Ariaceae). Цей рід поширений переважно в сухому та напівпустельному кліматі. Було вивчено численні види роду Прангос, проведено численні фітохімічні аналізи, які показали, що вони багаті на біологічно активні сполуки. Однак достатньої інформації щодо Прангоса безлокатоного (*Prangos acaulis*) бракує. Основні класи фітохімічних речовин з профілактичними властивостями включають харчові волокна, антиоксиданти, протиракові засоби, детоксикуючі речовини, імуностимулятори та нейрофармакологічні сполуки. Потенційне багатство фітохімічного складу цього виду, враховуючи його фармакологічні властивості, свідчить про те, що він може стати майбутньою сировиною для медицини, і з цієї причини вивчення рослини є важливим. Метою дослідження є проведення фітохімічного аналізу видів *P. acaulis* та *P. ferulacea* за допомогою паперової хроматографії, проведення попереднього скринінгу на *P. acaulis* та оцінка отриманих результатів у порівнянні з *P. ferulacea*. Для отримання рослинних екстрактів використовували метод перколяції. Як висушені, так і порошкоподібні зразки рослин точно зважували до 20 г кожен. Вимірний рослинний матеріал замочували у 20 мл 70% етанолу та давали настоятися 24 години. Після ще одного 24-годинного періоду відстоювання рідину повністю фільтрували та повертали у дилільну лійку. Зі зразка масою 20 г 80% збирали у вигляді первинного екстракту зі швидкістю приблизно 40 крапель на годину та відставляли. Для проведення дослідження зібрані рослини сушили за ідентичних умов, подрібнювали на порошок, отримували екстракти та проводили аналіз за допомогою паперової хроматографії.

Оцінка отриманих результатів свідчить про те, що хроматографічні профілі екстрактів у поєднанні зі специфічними реагентами, що використовуються, дають уявлення про можливі функціональні групи, присутні в розділених сполуках. У цьому дослідженні було проведено попередній фітохімічний аналіз 70% етанольних екстрактів, отриманих з листя та коренів *Prangos acaulis*, за допомогою методу перколяції. Ця подібність свідчить про те, що *P. acaulis* також може мати різноманітний спектр біологічно активних сполук. Тим не менш, слід наголосити, що необхідні подальші комплексні та детальні дослідження для точної ідентифікації конкретних класів біологічно активних речовин, що присутні, та визначення точного молекулярного складу цього виду.

Ключові слова: *Prangos acaulis*, *Prangos ferulacea*, паперова хроматографія, фітохімічний аналіз.

Стаття до редакції надійшла 01.04.2026 року
Рецензія на статтю надійшла 13.04.2026 року

УДК 633.88

DOI 10.31654/2786-8478-2026-BN-2-60-65

Сокол О. В.

кандидат біологічних наук,
науковий співробітник
Національного ботанічного саду
імені М. М. Гришка НАН України
sokoloksana23@ukr.net
orcid.org/0000-0002-6297-7912

Джуренко Н. І.

кандидат біологічних наук,
старший науковий співробітник,
Національного ботанічного саду
імені М. М. Гришка НАН України
medbotanica@ukr.net
orcid.org/0000-0001-8210-445X

Паламарчук О. П.

кандидат біологічних наук,
старший науковий співробітник,
Національного ботанічного саду
імені М. М. Гришка НАН України
orcid.org/0000-0002-8649-6806

НАКОПИЧЕННЯ ФОТОСИНТЕТИЧНИХ ПИГМЕНТІВ У ЛИСТКОВІЙ ПЛАСТИНЦІ РОСЛИН ВИДІВ РОДУ *ARCTIUM L* ПРОТЯГОМ ВЕГЕТАЦІЇ

*Для використання рослин як джерела біологічно активних речовин важливе значення мають дослідження накопичення біологічно активних сполук та строків заготівлі рослинної сировини, які визначають їх максимальний вміст. Важливою групою серед них є фотосинтетичні пігменти. Біохімічні аналізи фітосировини (листова пластинка) 4 видів роду *Arctium L.*: *A. lappa L.*, *A. nemorosum Lej.*,*

A. minus Bernh., *A. tomentosum Mill.* Флори України проводили у фазах: вегетативній, відростання, бутонізації, квітування. Вміст пластидних пігментів хлорофілів і каротиноїдів визначали на спектрофотометрі SPECOL 1500 при довжинах хвиль 665, 649 та 470 нм. В результаті фітохімічних досліджень встановлено, що вміст суми хлорофілу a+b в листовій пластинці залежить від виду, фази розвитку рослин та впливу високих температур. Так, в перший рік вегетації найбільшим вмістом хлорофілу характеризуються рослини *A. tomentosum* (3,41 мг/г). Деяко, меншим вмістом – *A. minus* (2,96 мг/г), *A. lappa* (2,81 мг/г), *A. nemorosum* (2,78 мг/г), що припадає на період максимальними температурами у липні та серпні. У другий рік вегетації вміст зелених пігментів у рослин *A. lappa* поступово збільшується від 2,14 мг/г (травень) до 4,73 мг/г (липень); у *A. tomentosum* – від 2,62 мг/г (травень) до 3,07 мг/г (липень); у *A. minus* – від 2,10 мг/г (травень) до 4,0 мг/г (липень); *A. nemorosum* – від 2,41 мг/г (травень) до 2,34 мг/г (липень), однак для всіх видів відмічено його зниження у червні. Максимальні показники кількості хлорофілів у досліджених видів рослин характерні для фази бутонізації-квітування. При фітохімічному дослідженні каротиноїдів у видів рослин роду *Arctium* з'ясовано, що у листовій пластинці вони містяться майже в однакових кількостях протягом двох вегетаційних періодів, так у *A. lappa* цей показник варіює від 0,30 – 0,34, *A. tomentosum* від 0,31– 0,45, *A. minus* 0,3 – 0,49, *A. nemorosum* 0,31 – 0,46 мг/г. Таким чином, з'ясовано, що вміст хлорофілів та каротиноїдів у листках рослин видів роду *Arctium* упродовж

вегетації варіює. В результаті досліджень виявлені видові особливості рослин щодо накопичення пігментів, при цьому максимальна їх кількість характерна для фази бутонізації-квітування.

Ключові слова: лікарські рослини, каротиноїди, хлорофіл, *Arctium*, лікарська сировина.

Вступ. Відомо, що в рослинах продукується значна кількість складних хімічних сполук. На сьогодні є відомості про біологічну активність близько 12 тисяч хімічних сполук, які відносяться до різних класів природних органічних речовин. Важливою групою серед них є фотосинтетичні пігменти, які належать до трьох класів: хлорофіли, каротиноїди та фікобіліни. Найважливішу роль у фотосинтетичному процесі відіграють зелені пігменти – хлорофіли, яких на даний час нараховується близько десяти, які відрізняються за хімічним складом, забарвленням, поширенням серед рослинних організмів. Безперечно основними пігментами у рослинах є хлорофіли *a* та *b*, які відіграють важливу роль у фотосинтетичному процесі. Вміст хлорофілів у листках рослин впливає на їхній ріст і продуктивність, а співвідношення *a/b* є показником стійкості до несприятливих факторів навколишнього середовища [3,4,6]. Кількісна характеристика вмісту пігментів відображає фотосинтетичну активність рослини, отже, кількість синтезованої енергії і глюкози, необхідних для росту і продуктивності, в тому числі і накопиченню біологічно активних речовин.

Сучасні дослідження фармакологічних особливостей хлорофілу виявили тонізуючу дію, яка впливає на основний обмін та відновлення ушкоджених тканин, тощо. Вочевидь, цим пояснюється те, що хлорофіл, потрапляючи до організму з їжею виявляє вплив на кровоносну систему, що сприяє збільшенню кількості лейкоцитів, еритроцитів та гемоглобіну [11]. Так, хлорофіли важливі не тільки для рослин пігменти, але й мають здатність пригнічувати ріст бактерій та інших шкідливих мікроорганізмів, виявляючи бактерицидні, детоксикуючі, антиоксидантні, ефекти [1,9,10].

Широко розповсюджені в рослинах каротиноїди – жиророзчинні пігменти жовтого, помаранчевого або червоного кольору, які відкладаються в органах не рівномірно. Вони мають широкий спектр біологічної дії, зокрема, імуномодельуючу, антимутагенну, стимулюють травлення, посилюють секрецію шлункового соку. Каротиноїди здатні нормалізувати обмін речовин і підвищувати стійкість організму до інфекцій [2]. Важливе значення для організму людини має особлива група каротиноїдів найпоширенішим серед яких є β -каротин (провітамін А) [4,5].

Мета роботи полягала у дослідженні вмісту фотосинтетичних пігментів (хлорофіл *a+b*) та каротиноїдів в листовій пластинці в різні фази росту рослин роду *Arctium*.

Методи та об'єкти досліджень. До досліджень були залучені 4 види роду *Arctium* L.: *A. lappa* L., *A. nemorosum* Lej., *A. minus* Bernh., *A. tomentosum* Mill. Флори України і інтродуковані на ділянці лікарських рослин у Національному ботанічному саду імені М. М. Гришка НАН України. Кліматичні умови в роки досліджень (2023–2024) характеризувалися стабільним перевищенням середньомісячної температури повітря [7]. Найвищою вона була в липні, серпні та вересні та відхилялася від багаторічної норми на 4,4–6,6 °С. Біохімічні аналізи фітосировини (листова пластинка) дослідних зразків проводили у фазах: вегетативній, відростання, бутонізації та квітування. Вміст пластидних пігментів хлорофілів і каротиноїдів визначали спектрофотометричним методом на спектрофотометрі SPECOL 1500 при довжинах хвиль 665, 649 та 470 нм [5,8]. Біохімічні дослідження проводили у 3-кратній повторності в кожному варіанті досліду. Результати обробляли статистично з використанням комп'ютерної програми Microsoft Excel 2009.

Результати дослідження та їх обговорення. Види роду *Arctium* – дворічні трав'яні рослини, які проходять повний цикл розвитку. На першому році вегетації у рослин розвивається розетка прикореневих листків та формується коренева система, на другому – з'являється прямий, червонувато-борозенчастий пагін, розгалужений у верхній частині. Рослини першого року вегетують до кінця жовтня або до настання від'ємної середньодобової температури.

В результаті фітохімічних досліджень встановлено, що вміст суми хлорофілу $a+b$ в листовій пластинці залежить від виду, фази розвитку рослин та впливу високих температур. Так, в перший рік вегетації найбільшим вмістом хлорофілу характеризуються рослини *A. tomentosum* (3,41 мг/г). Дещо, меншим вмістом – *A. minus* (2,96 мг/г), *A. lappa* (2,81 мг/г), *A. nemorosum* (2,78 мг/г), що припадає на період максимальними температурами у липні та серпні (Рис. 1).

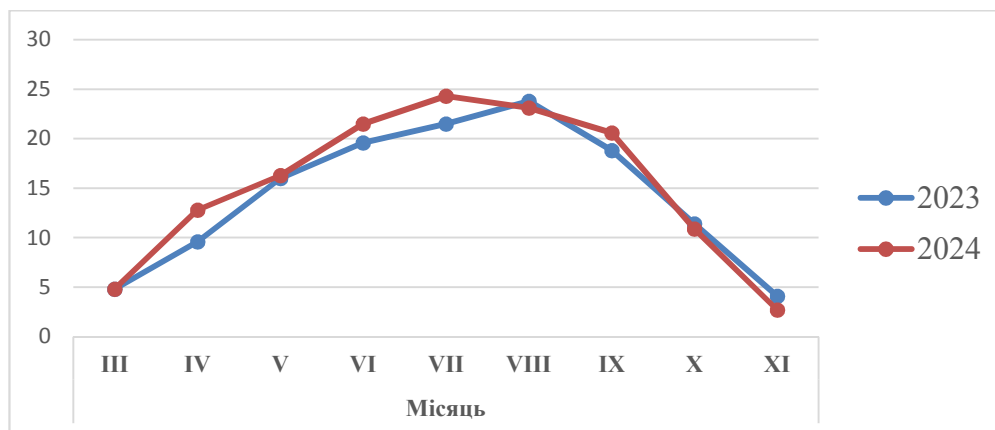


Рис. 1. Середньомісячна температура повітря за вегетаційний період в роки дослідження, °C

У другий рік вегетації вміст зелених пігментів у рослин *A. lappa* поступово збільшується від 2,14 мг/г (травень) до 4,73 мг/г (липень); у *A. tomentosum* – від 2,62 мг/г (травень) до 3,07 мг/г (липень); у *A. minus* – від 2,10 мг/г (травень) до 4,0 мг/г (липень); *A. nemorosum* – від 2,41 мг/г (травень) до 2,34 мг/г (липень), однак для всіх видів відмічено його зниження у червні. Максимальні показники кількості хлорофілів у досліджених видів рослин характерні для фази бутонізації-квітання (Рис. 2).

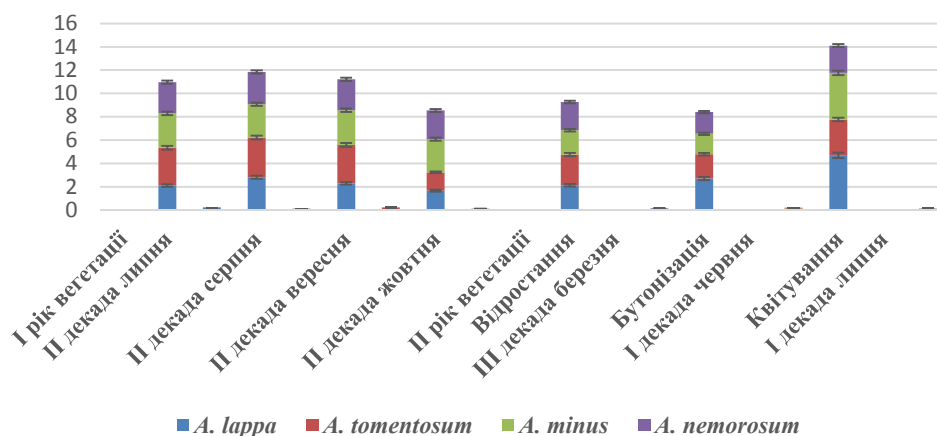


Рис. 2. Накопичення суми хлорофілів $a+b$ у листовій пластинці рослин виду роду *Arctium* протягом вегетації, мг/г

При фітохімічному дослідженні каротиноїдів у видів рослин роду *Arctium* з'ясовано, що у листовій пластинці вони містяться майже в однакових кількостях протягом двох вегетаційних періодів, так у *A. lappa* цей показник варіює від 0,30 – 0,34, *A. tomentosum* від 0,31– 0,45, *A. minus* 0,3 – 0,49, *A. nemorosum* 0,31 – 0,46 мг/г [124], (Рис. 3).

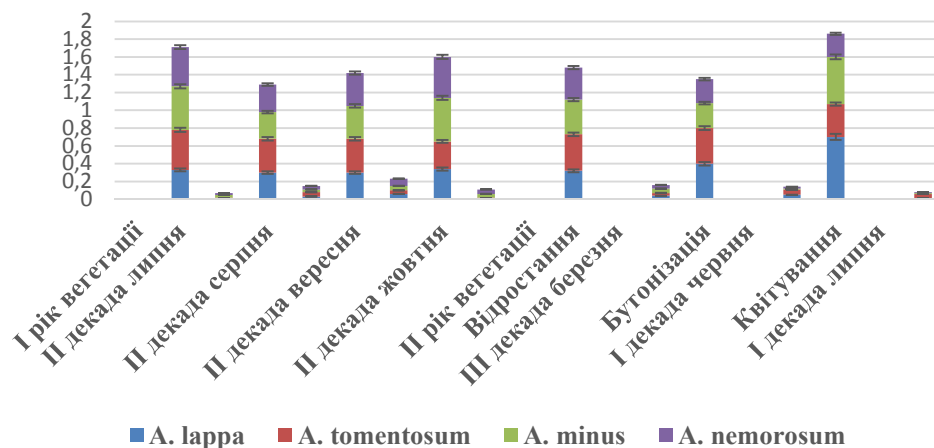


Рис. 3. Накопичення каротиноїдів у листовій пластинці у рослин видів роду *Arctium* протягом вегетації, мг/г

Висновки. Таким чином, з'ясовано, що вміст хлорофілів та каротиноїдів у листках рослин видів роду *Arctium* упродовж вегетації варіює. В результаті досліджень виявлені видові особливості рослин щодо накопичення пігментів, при цьому максимальна їх кількість характерна для фази бутонізації-квітування.

Список використаних джерел

1. Бурлака І. С., Кисличенко В. С. Пігменти трави щучника дернистого і трави сунічника звичайного. *Український журнал клінічної лабораторної медицини*. 2012. Т. 7, № 2. С. 14–16. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ujkl_2012_7_2_4. (дата звернення 13.02.2026).
2. Колісник Ю. С., Кузнецова В. Ю. Пігменти трави грициків звичайних (*Capsella bursa-pastoris*). *Фармацевтичний журнал*. 2013. № 1. С. 75–77. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/pharmazh_2013_1_14 (дата звернення 15.03.2026).
3. Косаківська І.В. Фізіолого-біохімічні основи адаптації рослин до стресів. Київ.: Сталь, 2003. 192 с.
4. Мусієнко М.М. Фізіологія рослин: Київ: Фітосоціоцентр, 2001. 392 с.
5. Мусієнко М.М., Паршикова Т.В., Славний П.С. Спектрофотометричні методи в практиці фізіології, біохімії та екології рослин. Київ: Фітосоціоцентр, 2001. С. 49–50.
6. Сиваш О.О., Михайленко Н.Ф., Золотарьова О.К. Варіація співвідношення вмісту хлорофілів а і в при адаптації рослин до зовнішніх чинників. *Вісник Харківського національного аграрного університету. Серія: Біологія*. 2018. Вип. 3 (45). С. 49–73. URL: <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/1578> (дата звернення: 20.02.2026)
7. Центральної геофізичної обсерваторії ім. Б. Срезневського. Кліматичні дані по м. Києву. URL: <http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua> (дата звернення: 20.01.2026)
8. Lichtestaller H. K., Wellburn A. R. Determination of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaves extracts in different solvents. *Biochem. Soc. Trans.* 1983. V. 11, N 5. P. 591–592.
9. Martins, T., Barros, A. N., Rosa, E., & Antunes, L. Enhancing health benefits through chlorophylls and chlorophyll-rich agro-food: A comprehensive review. *Molecules*, (2023). 28(14), 5344. <https://doi:10.3390/molecules28145344>
10. Mishra V. K., Bacheti R. K., Husen A. Medicinal uses of chlorophyll: A critical overview. *Chlorophyll: Structure, function and medicinal uses*. 2011. 177–196.
11. Tagaouy Y.D., Abdrassulova Z.T., Tulindinova G., Korogod N.P., Salybekova N.N., Shaimerdenova G.Z., Kenzheyeva Z.K., Ashirova Z.B., Tuleukhanov S.T., Ghoneim M.M.I., Saadeldin W.I., Abu-Elsaoud A.M. Comparative effects of different supplemented dietary doses of chlorophyll on blood parameters of experimental male rats. *Braz J Biol.* 2023 Dec 4;83:e274608. <https://doi: 10.1590/1519-6984.274608>

References

1. Burlaka I. S., Kyslychenko V. S. (2012). Pihmenty travy shchuchnyka dernystoho i travy sunychnyka zvychainoho [Pigments of turfgrass and common strawberry grass]. *Ukrainskyi*

zhurnal klinichnoi laboratornoi medytsyny [Ukrainian Journal of Clinical Laboratory Medicine]. Т. 7, № 2. С. 14–16. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ujkl_2012_7_2_4. (дата звернення 13.02.2026). [in Ukrainian].

2. Kolisnyk Yu. S., Kuznietsova V. Yu. (2013). Pihmenty travy hrytskyiv zvychaynykh (Capsellabursa–pastoris) [Ingredients of the grass of common horsetail (Capsellabursa–pastoris)]. Farmatsevychnyi zhurnal [Pharmaceutical Journal]. № 1. С. 75–77. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/pharmazh_2013_1_14 (дата звернення 15.03.2026). [in Ukrainian].

3. Kosakivska I.V. (2003). Fiziolohe-biokhimichni osnovy adaptatsii roslын do stresiv [Physiological and biochemical foundations of plant adaptation to stress]. Kyiv: Stal [in Ukrainian].

4. Musiienko M.M. (2001). Fizioloheia roslын [Plant physiology]. Kyiv: Fitosotsiotsentr, 392 c. [in Ukrainian].

5. Musiienko M.M., Parshykova T.V., Slavnyi P.S. (2001). Spektrofotometrychni metody v praktytsi fizioloheii, biokhimii ta ekoloheii roslын [Spectrophotometric methods in the practice of plant physiology, biochemistry and ecology]. Kyiv: Fitosotsiotsentr, С. 49–50. [in Ukrainian].

6. Syvash O.O., Mykhailenko N.F., Zolotarova O.K. (2018). Variatsiia spivvidnoshennia vmistu khlorofiliv a y b pry adaptatsii roslын do zovnishnykh chynnykiv [Variation in the ratio of chlorophyll a and b content during plant adaptation to external factors]. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Seriia: Bioloheia [Bulletin of the Kharkiv National Agrarian University. Series: Biology.]. Вип. 3 (45). С. 49–73. URL: <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/1578> (дата звернення: 20.02.2026) [in Ukrainian].

7. Tsentralnoi heofizychnoi observatorii im. B. Sreznevskoho. Klimatychni dani po m. Kyievu [Central Geophysical Observatory named after B. Sreznevsky. Climatic data for the city of Kyiv.]. URL: <http://cgo-sreznevskiyi.kyiv.ua> (дата звернення: 20.01.2026) [in Ukrainian].

8. Lichtestaller H. K., Wellburn A. R. (1983). Determination of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaves extracts in different solvents. *Biochem. Soc. Trans.* V. 11, N 5. P. 591–592. [in English].

9. Martins, T., Barros, A. N., Rosa, E., & Antunes, L. (2023). Enhancing health benefits through chlorophylls and chlorophyll-rich agro-food: A comprehensive review. *Molecules*, 28(14), 5344. <https://doi:10.3390/molecules28145344> [in English].

10. Mishra V. K., Bacheti R. K., Husen A. (2011). Medicinal uses of chlorophyll: A critical overview. Chlorophyll: Structure, function and medicinal uses. 177–196. [in English].

11. Tagauov Y.D., Abdrassulova Z.T., Tulindinova G., Korogod N.P., Salybekova N.N., Shaimerdenova G.Z., Kenzheyeva Z.K., Ashirova Z.B., Tuleukhanov S.T., Ghoneim M.M.I., Saadeldin W.I., Abu-Elsaoud A.M. (2023). Comparative effects of different supplemented dietary doses of chlorophyll on blood parameters of experimental male rats. *Braz J Biol.* Dec 4;83:e274608. <https://doi:10.1590/1519-6984.274608> [in English].

Sokol O.

Candidate of Biological Sciences, Researcher,
M. M. Gryshko National Botanical Garden
of the National Academy of Sciences of Ukraine
sokoloksana23@ukr.net
orcid.org/0000-0002-6297-7912

Dzhurenko N.

Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher,
M. M. Gryshko National Botanical Garden
of the National Academy of Sciences of Ukraine
medbotanica@ukr.net
orcid.org/0000-0001-8210-445X

Palamarchuk O.

Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher,
M. M. Gryshko National Botanical Garden

**ACCUMULATION OF PHOTOSYNTHETIC PIGMENTS IN THE LEAF
BLADES OF PLANTS OF THE GENUS *ARCTIUM* L DURING VEGETATION**

For the use of plants as a source of biologically active substances, studies of the accumulation of biologically active compounds and the terms of harvesting plant raw materials, which determine their maximum content, are of great importance. An important group among them are photosynthetic pigments. Biochemical analyses of phytora materials (leaf blade) of 4 species of the genus Arctium L.: A. lappa L., A. nemorosum Lej., A. minus Bernh., A. tomentosum Mill. Flora of Ukraine were carried out in the following phases: vegetative, regrowth, budding, flowering. The content of plastid pigments chlorophylls and carotenoids was determined spectrophotometrically on a SPECOL 1500 spectrophotometer at wavelengths of 665, 649 and 470 nm. As a result of phytochemical studies, it was found that the content of the sum of chlorophyll a+b in the leaf blade depends on the species, phase of plant development and the effect of high temperatures. Thus, in the first year of vegetation, the highest chlorophyll content is characterized by A. tomentosum plants (3.41 mg/g). A. minus (2.96 mg/g), A. lappa (2.81 mg/g), A. nemorosum (2.78 mg/g) have somewhat lower contents, which falls on the period of maximum temperatures in July and August. In the second year of vegetation, the content of green pigments in A. lappa plants gradually increases from 2.14 mg/g (May) to 4.73 mg/g (July); in A. tomentosum – from 2.62 mg/g (May) to 3.07 mg/g (July); in A. minus – from 2.10 mg/g (May) to 4.0 mg/g (July); A. nemorosum – from 2.41 mg/g (May) to 2.34 mg/g (July), however, for all species its decrease was noted in June. The maximum indicators of the amount of chlorophylls in the studied plant species are characteristic of the budding-flowering phase. In the phytochemical study of carotenoids in plant species of the genus Arctium, it was found that in the leaf blade they are contained in almost the same quantities during two growing seasons, so in A. lappa this indicator varies from 0.30 – 0.34, A. tomentosum from 0.31– 0.45, A. minus 0.3 – 0.49, A. nemorosum 0.31 – 0.46 mg/g. Thus, it was found that the content of chlorophylls and carotenoids in the leaves of plants of the genus Arctium varies during the growing season. As a result of the research, specific features of plants regarding the accumulation of pigments were identified, with their maximum amount being characteristic of the budding-flowering phase.

Keywords: medicinal plants, carotenoids, chlorophyll a+b, Arctium, medicinal raw materials.

*Стаття до редакції надійшла 14.04.2026 року
Рецензія на статтю надійшла 28.04.2026 року*

БІОХІМІЯ

УДК 504.064.3:556.114:004.85

DOI 10.31654/2786-8478-2026-BN-2-66-79

Гуменюк Г. Б.

кандидат біологічних наук, доцент
Тернопільського національного педагогічного університету
імені Володимира Гнатюка
gumenjuk@chem-bio.com.ua
orcid.org/0000-0002-7423-9968

Дух Р. М.

аспірант
Тернопільського національного педагогічного університету
імені Володимира Гнатюка
romaedge@ukr.net
orcid.org/0009-0001-0567-1896

**ІНДЕКСИ ЯКОСТІ ВОДИ ЗА ФІЗИКО-ХІМІЧНИМИ, БІОЛОГІЧНИМИ
ТА БІОХІМІЧНИМИ ПОКАЗНИКАМИ В СИСТЕМІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ**

Сучасний стан водних екосистем характеризується зростаючим антропогенним навантаженням, що проявляється у погіршенні якості поверхневих і підземних вод унаслідок промислового, сільськогосподарського та урбанізаційного впливу. До основних факторів деградації водних ресурсів належать надходження біогенних елементів, важких металів, органічних забруднювачів, а також зміни гідрологічного режиму та кліматичні коливання. У цих умовах особливої актуальності набуває розробка та вдосконалення методів інтегральної оцінки стану водних об'єктів у контексті забезпечення сталого розвитку та раціонального використання водних ресурсів. У роботі розглянуто оцінку індексів якості води (WQI) за фізико-хімічними, біологічними та біохімічними показниками, які є основою для моніторингу поверхневих і підземних вод у різних природно-географічних умовах. Здійснено порівняльний аналіз 7 найбільш поширених моделей якості води. Показано, що традиційні індексні моделі забезпечують узагальнену та зручну оцінку якості води, однак їх точність залежить від локальних гідрохімічних умов та складу біологічних показників. Окремо розглянуто можливості застосування методів машинного навчання для підвищення точності оцінювання якості води та класифікації її стану на основі скорочених наборів фізико-хімічних, біологічних і біохімічних параметрів. Встановлено, що використання алгоритмів машинного навчання підвищує ефективність екологічного моніторингу, знижує витрати на лабораторні дослідження та забезпечує оперативне оцінювання стану водних об'єктів. Встановлено, що інтеграція класичних індексних моделей із сучасними методами машинного навчання підвищує ефективність екологічного моніторингу та є важливим інструментом реалізації принципів сталого розвитку у сфері управління водними ресурсами, оскільки сприяє їх раціональному використанню та охороні. Отримані результати підтверджують перспективність розвитку комбінованих підходів

для удосконалення систем управління та охорони водних ресурсів в умовах зростаючого антропогенного навантаження та кліматичних змін.

Ключові слова. якість води; індекс якості води (WQI); моніторинг водних ресурсів; машинне навчання; поверхневі води; екологічний моніторинг; водні екосистеми, сталий розвиток, біологічні та біохімічні показники.

Постановка проблеми. Вода є ключовим компонентом навколишнього середовища; але якість поверхневих і підземних вод вже давно погіршується через природну та антропогенну діяльність. Природними факторами, що впливають на якість води, є гідрологічні, атмосферні, кліматичні, топографічні та літологічні фактори [38, 56]. Прикладами антропогенної діяльності, яка негативно впливає на якість води, є гірничодобувна промисловість, тваринництво, виробництво та утилізація відходів (промислових, комунальних та сільськогосподарських), збільшення стоку осаду або ерозія ґрунту внаслідок зміни землекористування [34] та забруднення важкими металами [47]. Останнім часом країни, що розвиваються, зіткнулися зі значними проблемами у захисті якості води, намагаючись покращити водопостачання та санітарію [12, 42]. Навіть розвинені країни борються за підтримку або покращення стану якості води, стикаючись з такими проблемами, як збагачення поживними речовинами та евтрофікація водних ресурсів [3], а також забезпечення водопостачанням та водовідведенням зростаючого населення.

Річки по всьому світу є життєво важливим джерелом прісної води для навколишнього середовища, економіки та суспільства [16,25,44]. Однак ці прісноводні екосистеми наразі страждають від кількох проблем, таких як надмірна експлуатація, зміна клімату та антропогенне забруднення [11]. На якість води в річках впливають природні (опади та ерозія) та антропогенні процеси (такі як урбанізація, сільське господарство та виробництво) [8,14,49]. Якість води – це нелінійне та нестаціонарне явище, яке охоплює складні взаємозв'язки між природними та антропогенними процесами, і тому безперервний моніторинг якості води є основоположним для розробки стратегій відновлення та збереження річок і підтримки їх сталого управління [30]. З іншого боку, якість води суттєво пов'язана зі здоров'ям людей.

Класифікація якості є вирішальною та корисною для моніторингу, прогнозування та управління водними ресурсами [48]. У цьому випадку індекс якості води (WQI) є універсальним показником. WQI являє собою точну математичну функцію, яка інтегрує багатовимірні ефекти, виражені як одне значення [57]. Моделі індексу якості води (WQI) базуються на функціях агрегації, які дозволяють аналізувати великі набори даних про якість води, що змінюються в часі та просторі, для отримання єдиного значення, тобто індексу якості води, який вказує на якість водойми. Вони привабливі для установ з управління водними ресурсами, оскільки відносно прості у використанні та перетворюють складні набори даних про якість води в єдиний показник якості води, який легко зрозуміти. WQI зазвичай складається з чотирьох процесів або компонентів. Спочатку вибираються параметри якості води, що цікавлять. По-друге, для кожного параметра якості води концентрації перетворюються на однозначний безрозмірний підіндекс. По-третє, визначається ваговий коефіцієнт для кожного параметра якості води, і по-четверте, остаточний однозначний індекс якості води розраховується за допомогою функції агрегації з використанням підіндексів та вагових коефіцієнтів для всіх параметрів якості води. Було розроблено багато різних моделей WQI з варіаціями в структурі моделі, включених параметрах та пов'язаних з ними вагових коефіцієнтах, а також методах, що використовуються для субіндексації та агрегації [29, 50].

Аналіз останніх досліджень і публікацій . Більшість компонентів моделі WQI були розроблені на основі експертних думок та місцевих рекомендацій [51], і тому багато моделей є регіонально-специфічними. Багато дослідників посилаються на

проблеми невизначеності моделей WQI [31]. Хоча невизначеність є неминучим явищем у будь-якій математичній моделі [35], усі чотири етапи аналізу якості життя (WQI) можуть сприяти невизначеності моделі. У дослідженні [23] були розроблені моделі машинного навчання, регресії та класифікації для оцінки екосистемного WQI, розробленого раніше для річки Сантьяго-Гвадалахара, який включав вимірювання 17 параметрів якості води, оскільки існували попередні знання про високоточну структуру алгоритму WQI [1, 19, 33]. Метою цього дослідження було оцінити потенційне використання методів машинного навчання з контрольованою структурою для прогнозування екосистемно-специфічного показника якості води (WQI), розробленого раніше для річки Сантьяго-Гвадалахара у Мексиці [13]. Цей WQI наразі використовується місцевим урядом штату Халіско (Мексика), для повідомлення про стан та тенденції якості води широкому загалу [20]. Оригінальний алгоритм WQI був розроблений з використанням самоадаптивного підходу, заснованого на основі даних про якість води [13]. Для зменшення кількості значущих параметрів, необхідних для прогнозування WQI, було використано модель множинної лінійної регресії з використанням 12 параметрів. Значення $R^2 = 0,9992$ (коефіцієнт детермінації) свідчить про те, що модель пояснює 99,92% варіації даних, тоді як лише 0,08% залишаються неврахованими, що вказує на дуже високу точність апроксимації та майже повну відповідність моделі вихідним даним. Ці результати можна порівняти з результатами, отриманими [5], які використовували додаткову регресію дерева рішень для прогнозування індексу якості води з 10 параметрами, що показує $R^2 0,99$ та [27], що використовували нейронну мережу з радіальною базовою функцією, використовуючи лише шість параметрів для оцінки індексу якості води, та отримали $R^2 0,9872$.

Існують різні застосування WQI для багатьох цілей, наприклад, для захисту міського, озерного, ґрунтового середовища [52] та розробки спеціального індексу для річкової екосистеми [40]. Для визначення WQI було застосовано кілька умов та критеріїв. Наприклад, Граділья-Ернандес [26] використовував сім фізичних параметрів, тобто кисень, поживні речовини, органічні речовини, важкі метали, для розробки свого показника якості води WQI. З іншого боку, для оцінювання якості води в різних дослідженнях використовувалися дев'ять основних параметрів, серед яких концентрації алюмінію, заліза, міді, нітратів, а також показники мікробіологічного забруднення, зокрема вміст кишкової палички. Їх підбір та поєднання залежали від особливостей водного об'єкта, регіональних умов і цілей дослідження [18].

Однак програми моніторингу вимагають численних вимірювань різних параметрів якості води в різних точках відбору проб і в різний час відбору проб, і, як наслідок, створюються великі бази даних [53]. Таким чином, для оцінки екологічного стану водойми необхідні складні аналізи та інтерпретація [7, 43]. Щоб подолати цю проблему, WQI визнаний корисним інструментами для полегшення візуалізації, інтерпретації та комунікації якості води [2]. WQI широко застосовується для оцінки та класифікації якості води поверхневих та підземних водних джерел, а також для допомоги менеджерам водних ресурсів у прийнятті більш ефективних рішень [17, 22, 37].

Мета статті. Метою дослідження є аналіз та оцінка індексів якості води, що базуються на фізико-хімічних, біологічних та біохімічних показниках, а також порівняння основних моделей індексів якості води за їх структурою, набором параметрів, методами нормування та агрегації. Додатково метою є визначення особливостей застосування сучасних підходів машинного навчання для підвищення ефективності оцінювання індексів якості води та зменшення кількості необхідних параметрів без суттєвої втрати точності результатів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Оскільки WQI розраховується шляхом інтеграції кількох фізичних, хімічних, біологічних та біохімічних параметрів, спеціально відібраних за їхньою значущістю для якості води джерел води загалом [9, 47], останні зусилля зосереджені на розробці екосистемно-специфічних індексів якості

води, розроблених для конкретних умов даного джерела води та з дотриманням місцевих стандартів щодо захисту водного життя [13, 46]. Ці екосистемно-специфічні WQI розроблені для адекватного відображення просторових та часових варіацій відповідно до місцевого територіального контексту [26, 54].

Виявлено, що сім моделей домінують, охоплюючи 85% із 107 застосувань індексу якості води (WQI).

Індекс Хортона. Це один із перших інтегральних індексів якості води, запропонований для узагальненої оцінки стану поверхневих вод шляхом об'єднання кількох фізичних, хімічних і частково біологічних та біохімічних показників у єдине числове значення, що дозволяє перетворити багатовимірні дані моніторингу якості води на один узагальнений показник, що характеризує загальний екологічний стан водойми. Модель Хортона використовувалася багатьма дослідниками у багатьох різних країнах для оцінки прісних поверхневих вод. Він містить чотири стандартні компоненти WQI, тобто вибір параметрів, розрахунок субіндексу, зважування параметрів та агрегацію субіндексів [21].

Індекс Шотландського департаменту досліджень та розвитку. Модель постійно розробляється Шотландським департаментом досліджень та розвитку з 1970 року для оцінки якості поверхневих вод [51]. Індекс призначений для узагальнення фізико-хімічних показників якості води в єдиний числовий показник, що відображає загальний екологічний стан водного об'єкта. Більшість країн помірної та тропічно-субтропічного клімату застосовують цю модель завдяки її гнучкості та регіональній зручності. Наприклад, її використовували для оцінки якості поверхневих вод в Ірані [15]. Модифікована модель також використовувалася для оцінки якості річкової води у Східному Таїланді [9].

Індекс Шотландського департаменту досліджень та розвитку є однією з базових класичних моделей WQI, що вплинула на формування сучасних підходів до інтегральної оцінки якості води.

Індекс якості поверхневих вод Національного фонду санітарії США. Індекс якості поверхневих вод був розроблений Брауном у 1965 році [4] як модифікована версія моделі Хортона [36]. Він використовувався для оцінки якості поверхневих вод у різних сферах. Як і модель Хортона, він містить чотири основні компоненти WQI. Типові параметри включають: розчинений кисень, БСК (біохімічне споживання кисню), рН, нітрати, фосфати, каламутність, температура, тверді речовини та фекальні коліформи.

Індекс якості води Канадської ради міністрів навколишнього середовища. Модель була розроблена на основі моделі WQI Британської Колумбії у 2001 році [37]. У всьому світі ця модель застосовувалася до широкого кола поверхневих водойм [3, 55], завдяки гнучкості у виборі параметрів якості води, які включені до моделі. Ключовою особливістю WQI є відсутність жорстко фіксованого переліку параметрів якості води, оскільки для розрахунку можуть використовуватися будь-які фізичні, хімічні або біологічні та біохімічні показники за умови наявності для них встановлених екологічних нормативів (стандартів), з якими здійснюється їх порівняння.

Індекс Баскарона. Ця модель була розроблена Баскаронем у 1979 році для оцінки якості води на основі іспанських рекомендацій щодо якості води [50]. Модель Баскарона вважалася найкращою для оцінки якості поверхневих вод [41], оскільки призначена для узагальнення фізико-хімічних, частково біологічних та біохімічних показників якості води в єдине числове значення, що відображає загальний екологічний стан водойм. Багато країн Південної Америки прийняли її для оцінки якості поверхневих вод, зокрема, такі як Бразилія [4], Аргентина [45] та Чилі [17]. Було кілька застосувань у південноазійському регіоні, в таких країнах, як Непал [32] та Індія [6]. Кілька країн також намагалися розробити модифіковану модель WQI на основі моделі індексу Баскарона, наприклад, Китай [50].

Малайзійський індекс якості води. У 1974 році Міністерство навколишнього середовища Малайзії розробило WQI для оцінки якості поверхневих вод та їх

класифікації на місцевому рівні. Для визначення місцевої якості води та її характеристик були застосовані національні критерії якості води Малайзії [24]. Ця модель містить чотири спільні компоненти моделей WQI. Оскільки для вимірювання показників якості води (фізичних, хімічних та біологічних, біохімічних), які включені до алгоритмів WQI, потрібен значний час, зусилля та фінансові ресурси, існує потреба в практичних обчислювальних підходах для точної та ефективної оцінки WQI. [5]. Типові параметри: розчинений кисень, біохімічне споживання кисню, хімічне споживання кисню, рН, амоній, нітрати, каламутність та загальні зважені речовини.

Витрати, пов'язані з моніторингом якості води, можна зменшити, якщо показники якості води можна оцінювати на основі менших наборів параметрів якості води, і, отже, моніторинг якості води можна поширити на ширші водозбірні зони відповідних джерел води або для моніторингу інших водойм.

Модель WQI для Західної Яви розробили модель у 2017 році [51]. Це найновіших розроблених моделей WQI в літературі. Модель WQI для Західної Яви – це сучасна регіонально-адаптована модель оцінювання якості води, розроблена для умов провінції Західна Ява (Індонезія) з урахуванням місцевих природно-екологічних особливостей та антропогенного навантаження. Модель призначена для інтегральної оцінки якості поверхневих вод шляхом об'єднання фізико-хімічних, біологічних та біохімічних показників у єдиний числовий індекс, що відображає стан водних об'єктів у конкретному регіоні. Ця модель намагалася зменшити невизначеність, яка присутня в інших моделях WQI.

З огляду на відносну простоту та легкість співвіднесення результатів, моделі WQI широко використовуються для оцінки якості води, але на сьогоднішній день розроблено багато різних версій.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Індекси якості води є ефективним інструментом для узагальнення великих масивів даних моніторингу та оцінювання екологічного стану водних об'єктів у контексті забезпечення сталого розвитку та раціонального використання природних ресурсів. Аналіз світового досвіду показав значну різноманітність моделей індексів якості води, які відрізняються набором параметрів, системами вагових коефіцієнтів та методами агрегації. Найбільш поширеними моделями є індекс якості води Хортон, індекс якості води Канадської ради міністрів навколишнього середовища, індекс якості води Баскарона та малайзійський WQI.

Встановлено, що більшість моделей індексів якості води мають регіональну специфіку та залежать від локальних стандартів якості води, типу водойм і цілей водокористування. Основними проблемами застосування індексів залишаються невизначеність результатів, складність вибору параметрів та можливість втрати частини інформації під час агрегації показників.

Досліджено, що класичні індекси якості води, такі як індекс Хортон, NSF WQI, шотландська модель, індекс Баскарона та малайзійський WQI, базуються переважно на фізико-хімічних показниках і не містять повноцінних біологічних та біохімічних індикаторів. Натомість більш сучасні підходи, зокрема WQI Канадської ради міністрів навколишнього середовища, є гнучкими та можуть включати як фізико-хімічні, так і біологічні та біохімічні параметри залежно від наявних екологічних нормативів і цілей оцінювання.

Перспективним напрямом є використання методів машинного навчання для прогнозування індексів якості води. Алгоритми регресії, класифікації, дерев рішень, нейронні мережі та методи опорних векторів дозволяють зменшити кількість необхідних параметрів аналізу без суттєвої втрати точності. Це сприяє зниженню витрат на моніторинг і розширенню систем екологічного контролю водних ресурсів, а також підтримує реалізацію принципів сталого розвитку шляхом раціонального використання природних ресурсів, підвищення ефективності управління водними екосистемами та зменшення антропогенного навантаження.

Отже, поєднання традиційних моделей індексів якості води із сучасними методами машинного навчання є перспективним підходом для підвищення ефективності оцінювання та прогнозування якості води в умовах зростаючого антропогенного навантаження на водні екосистеми та необхідності забезпечення їх сталого розвитку.

Список використаних джерел

1. Abba S. I., Pham Q. B., Saini G., Linh N. T. T., Ahmed A. N., Mohajane M., Khaledian M., Abdulkadir R. A., Bach Q.-V. Implementation of data intelligence models coupled with ensemble machine learning for prediction of water quality index. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27, No. 33. P. 41524–41539. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09689-x>
2. Abbasi T., Abbasi S. A. Chapter 1 – Why Water-Quality Indices. In: *Water Quality Indices*. Amsterdam: Elsevier, 2012. P. 3–7. ISBN 978-0-444-54304-2.
3. Abbasi T., Abbasi S. A. Water-Quality Indices. In: *Water Quality Indices*. Amsterdam: Elsevier, 2012. P. 353–356. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-54304-2.00016-6>
4. Abrahão R., Carvalho M., Da Silva W. R. Jr., Machado T. T. V., Gadelha C. L. M., Hernandez M. I. M. Use of index analysis to evaluate the water quality of a stream receiving industrial effluents. *Water SA*. 2007. Vol. 33, No. 4. P. 459–466. <https://doi.org/10.4314/wsa.v33i4.52940>
5. Asadollah S. B. H. S., Sharafati A., Motta D., Yaseen Z. M. River water quality index prediction and uncertainty analysis: A comparative study of machine learning models. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Vol. 9, No. 1. Article 104599. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104599>
6. Banerjee T., Srivastava R. K. Application of water quality index for assessment of surface water quality surrounding integrated industrial estate-Pantnagar. *Water Science and Technology*. 2009. Vol. 60, No. 8. P. 2041–2053. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.537>
7. Behmel S., Damour M., Ludwig R., Rodriguez M. J. Water quality monitoring strategies – A review and future perspectives. *Science of the Total Environment*. 2016. Vol. 571. P. 1312–1329. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.235>
8. Bhatti N. B., Siyal A. A., Qureshi A. L., Bhatti I. A. Socio-economic impact assessment of small dams based on T-paired sample test using SPSS software. *Civil Engineering Journal*. 2019. Vol. 5, No. 1. P. 153–164. <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091233>
9. Bordalo A. A., Teixeira R., Wiebe W. J. A water quality index applied to an international shared river basin: The case of the Douro River. *Environmental Management*. 2006. Vol. 38. P. 910–920. <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0037-6>
10. Braiek H. B., Khomh F. On testing machine learning programs. *Journal of Systems and Software*. 2020. Vol. 164. Article 110542. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2020.110542>
11. Brack W., Dulio V., Ågerstrand M., Allan I., Altenburger R., Brinkmann M., Bunke D., Burgess R. M., Cousins I., Escher B. I. et al. Towards the review of the European Union Water Framework Directive: Recommendations for more efficient assessment and management of chemical contamination in European surface water resources. *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 576. P. 720–737. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.104>
12. Carvalho L., Cortes R., Bordalo A. A. Evaluation of the ecological status of an impaired watershed by using a multi-index approach. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2011. Vol. 174. P. 493–508. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1473-9>
13. Casillas-García L. F., de Anda J., Yebra-Montes C., Shear H., Díaz-Vázquez D., Gradilla-Hernández M. S. Development of a specific water quality index for the protection of aquatic life of a highly polluted urban river. *Ecological Indicators*. 2021. Vol. 129. Article 107899. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107899>
14. Cordier C., Guyomard K., Stavrakakis C., Sauvade P., Coelho F., Moulin P. Culture of microalgae with ultrafiltered seawater: A feasibility study. *SciMedicine Journal*. 2020. Vol. 2, No. 2. P. 56–62. <https://doi.org/10.28991/SciMedJ-2020-0202-2>
15. Dadolahi-Sohrab A., Arjomand F., Fadaei-Nasab M. Water quality index as a simple indicator of watersheds pollution in southwestern part of Iran. *Water and Environment Journal*. 2012. Vol. 26, No. 4. P. 445–454. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2011.00303.x>

16. Das Gupta A. Implication of environmental flows in river basin management. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2008. Vol. 33, No. 5. P. 298–303. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.02.004>
17. Debels P., Figueroa R., Urrutia R., Barra R., Niell X. Evaluation of water quality in the Chillán River (Central Chile) using physicochemical parameters and a modified water quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2005. Vol. 110. P. 301–322. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-8064-1>
18. De Figueiredo H. P., de Figueiredo C. R. P., de Souza Barros J. H., Constantino M., Magalhães Filho F. J. C., de Moraes P. M., da Costa R. B. Water quality in an urban environmental protection area in the Cerrado Biome, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2019. Vol. 191, No. 2. Article 117. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7194-9>
19. Dezfooli D., Hosseini-Moghari S.-M., Ebrahimi K., Araghinejad S. Classification of water quality status based on minimum quality parameters: Application of machine learning techniques. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2018. Vol. 4. P. 311–324. <https://doi.org/10.1007/s40808-017-0406-9>
20. Estrategia integral Revivamos el Río Santiago. Gobierno de Jalisco. URL: <https://riosantiago.jalisco.gob.mx/> (дата звернення: 10.05.2026).
21. Ewaid S. H., Abed S. A. Water quality index for Al-Gharraf River, southern Iraq. *Egyptian Journal of Aquatic Research*. 2017. Vol. 43, No. 2. P. 117–122. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2017.03.001>
22. Ewaid S. H., Abed S. A., Kadhum S. A. Predicting the Tigris River water quality within Baghdad, Iraq by using water quality index and regression analysis. *Environmental Technology & Innovation*. 2018. Vol. 11. P. 390–398. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.06.013>
23. Fernández del Castillo A., Yebra-Montes C., Verduzco Garibay M., de Anda J., Garcia-Gonzalez A., Gradilla-Hernández M. S. Simple prediction of an ecosystem-specific water quality index and the water quality classification of a highly polluted river through supervised machine learning. *Water*. 2022. Vol. 14, No. 8. Article 1235. <https://doi.org/10.3390/w14081235>
24. Gazzaz N. M., Yusoff M. K., Aris A. Z., Juahir H., Ramli M. F. Artificial neural network modeling of the water quality index for Kinta River (Malaysia) using water quality variables as predictors. *Marine Pollution Bulletin*. 2012. Vol. 64, No. 11. P. 2409–2420. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.08.005>
25. Grabowski R. C., Gurnell A. M. Hydrogeomorphology–ecology interactions in river systems. *River Research and Applications*. 2016. Vol. 32, No. 2. P. 139–141. <https://doi.org/10.1002/rra.2974>
26. Gradilla-Hernández M. S., de Anda J., Garcia-Gonzalez A., Montes C. Y., Barrios-Piña H., Ruiz-Palomino P., Díaz-Vázquez D. Assessment of the water quality of a subtropical lake using the NSF-WQI and a newly proposed ecosystem specific water quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2020. Vol. 192, No. 5. Article 296. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08265-7>
27. Hameed M., Sharqi S. S., Yaseen Z. M., Afan H. A., Hussain A., Elshafie A. Application of artificial intelligence (AI) techniques in water quality index prediction: A case study in tropical region, Malaysia. *Neural Computing and Applications*. 2017. Vol. 28, Suppl. 1. P. S893–S905. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2404-7>
28. Ho J. Y., Afan H. A., El-Shafie A. H., Koting S. B., Mohd N. S., Jaafar W. Z. B., Hin L. S., Malek M. A., Ahmed A. N., Mohtar W. H. M. W. et al. Towards a time and cost effective approach to water quality index class prediction. *Journal of Hydrology*. 2019. Vol. 575. P. 148–165. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.016>
29. Jha D. K., Devi M. P., Vidyalakshmi R., Brindha B., Vinithkumar N. V., Kirubakaran R. Water quality assessment using water quality index and geographical information system methods in the coastal waters of Andaman Sea, India. *Marine Pollution Bulletin*. 2015. Vol. 100, No. 1. P. 555–561. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.08.032>
30. Kachroud M., Trolard F., Kefi M., Jebari S., Bourrié G. Water quality indices: Challenges and application limits in the literature. *Water*. 2019. Vol. 11, No. 2. Article 361. <https://doi.org/10.3390/w11020361>

31. Kannel P. R., Lee S., Lee Y.-S., Kanel S. R., Khan S. P. Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2007. Vol. 132. P. 93–110. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9505-1>
32. Khan A. A., Paterson R., Khan H. Modification and application of the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) for the communication of drinking water quality data in Newfoundland and Labrador. *Water Quality Research Journal of Canada*. 2004. Vol. 39, No. 3. P. 285–293. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2004.039>
33. Kouadri S., Elbeltagi A., Islam A. R. M. T., Kateb S. Performance of machine learning methods in predicting water quality index based on irregular data set: Application on Illizi region (Algerian southeast). *Applied Water Science*. 2021. Vol. 11. Article 190. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01528-9>
34. Lobato T. C., Hauser-Davis R. A., Oliveira T. F., Silveira A. M., Silva H. A. N., Tavares M. R. M., Saraiva A. C. F. Construction of a novel water quality index and quality indicator for reservoir water quality evaluation: A case study in the Amazon region. *Journal of Hydrology*. 2015. Vol. 522. P. 674–683. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.021>
35. Lowe L., Szemis J., Webb J. A. Uncertainty and environmental water. In: *Water for the Environment: From Policy and Science to Implementation and Management*. Elsevier, 2017. P. 317–344. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803907-6.00015-2>
36. Lumb A., Halliwell D., Sharma T. Application of CCME Water Quality Index to monitor water quality: A case study of the Mackenzie River Basin, Canada. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2006. Vol. 113. P. 411–429. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-9092-6>
37. Lumb A., Sharma T. C., Bibeault J.-F. A review of genesis and evolution of Water Quality Index (WQI) and some future directions. *Water Quality, Exposure and Health*. 2011. Vol. 3. P. 11–24. <https://doi.org/10.1007/s12403-011-0040-0>
38. Magesh N. S., Krishnakumar S., Chandrasekar N., Soundranayagam J. P. Groundwater quality assessment using WQI and GIS techniques, Dindigul district, Tamil Nadu, India. *Arabian Journal of Geosciences*. 2013. Vol. 6. P. 4179–4189. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0673-8>
39. Mohebbi M. R., Saeedi R., Montazeri A., Azam Vaghefi K., Labbafi S., Okaie S., Abtahi M., Mohagheghian A. Assessment of water quality in groundwater resources of Iran using a modified Drinking Water Quality Index (DWQI). *Ecological Indicators*. 2013. Vol. 30. P. 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.02.008>
40. Naubi I., Zardari N. H., Shirazi S. M., Ibrahim N. F. B., Baloo L. Effectiveness of Water Quality Index for monitoring Malaysian river water quality. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2016. Vol. 25, No. 1. P. 231–239. <https://doi.org/10.15244/pjoes/60109>
41. Nong X., Shao D., Zhong H., Liang J. Evaluation of water quality in the South-to-North Water Diversion Project of China using the water quality index (WQI) method. *Water Research*. 2020. Vol. 178. Article 115781. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115781>
42. Ortega D. J. P., Pérez D. A., Américo J. H. P., De Carvalho S. L., Segovia J. A. Development of index of resilience for surface water in watersheds. *Journal of Urban and Environmental Engineering*. 2016. Vol. 10, No. 1. P. 72–82. <https://doi.org/10.4090/juee.2016.v10n1.007282>
43. Ouyang Y. Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis. *Water Research*. 2005. Vol. 39, No. 12. P. 2621–2635. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.04.024>
44. Pandhiani S. M., Sihag P., Shabri A. B., Singh B., Pham Q. B. Time-series prediction of streamflows of Malaysian rivers using data-driven techniques. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2020. Vol. 146, No. 7. Article 04020013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001463](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001463)
45. Pesce S. F., Wunderlin D. A. Use of water quality indices to verify the impact of Cordoba City (Argentina) on Suquia River. *Water Research*. 2000. Vol. 34, No. 11. P. 2915–2926. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00036-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00036-1)
46. Rangeti I., Dzwauro B., Barratt G. J., Otieno F. A. O. Ecosystem-specific water quality indices. *African Journal of Aquatic Science*. 2015. Vol. 40, No. 3. P. 227–234. <https://doi.org/10.2989/16085914.2015.1054341>

47. Sánchez E., Colmenarejo M. F., Vicente J., Rubio A., García M. G., Travieso L., Borja R. Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution. *Ecological Indicators*. 2007. Vol. 7, No. 2. P. 315–328. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2006.02.005>
48. Shakhman I., Bystriantseva A. Water quality assessment of the surface water of the Southern Bug River Basin by complex indices. *Journal of Ecological Engineering*. 2021. Vol. 22, No. 1. P. 195–205. <https://doi.org/10.12911/22998993/128858>
49. Singh B., Sihag P., Deswal S. Modelling of the impact of water quality on the infiltration rate of the soil. *Applied Water Science*. 2019. Vol. 9. Article 15. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0892-1>
50. Sun W., Xia C., Xu M., Guo J., Sun G. Application of modified water quality indices as indicators to assess the spatial and temporal trends of water quality in the Dongjiang River. *Ecological Indicators*. 2016. Vol. 66. P. 306–312. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.054>
51. Sutadian A. D., Muttill N., Yilmaz A. G., Perera B. J. C. Development of river water quality indices — A review. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2016. Vol. 188. Article 58. P. 1–29. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5050-0>
52. Talalaj I. A. Adaptation of water quality index (WQI) for groundwater quality assessment near the landfill site. *Journal of Water Chemistry and Technology*. 2014. Vol. 36, No. 3. P. 144–151. <https://doi.org/10.3103/S1063455X14030084>
53. Tiyasha, Tung T. M., Yaseen Z. M. A survey on river water quality modelling using artificial intelligence models: 2000–2020. *Journal of Hydrology*. 2020. Vol. 585. Article 124670. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124670>
54. Tyagi S., Sharma B., Singh P., Dobhal R. Water quality assessment in terms of Water Quality Index. *American Journal of Water Resources*. 2013. Vol. 1, No. 3. P. 34–38. <https://doi.org/10.12691/ajwr-1-3-3>
55. Uddin M. G., Moniruzzaman M., Khan M. Evaluation of groundwater quality using CCME Water Quality Index in the Rooppur Nuclear Power Plant Area, Ishwardi, Pabna, Bangladesh. *American Journal of Environmental Protection*. 2017. Vol. 5, No. 2. P. 33–43. <https://doi.org/10.12691/env-5-2-2>
56. Uddin M. G., Moniruzzaman M., Quader M. A., Hasan M. A. Spatial variability in the distribution of trace metals in groundwater around the Rooppur nuclear power plant in Ishwardi, Bangladesh. *Groundwater for Sustainable Development*. 2018. Vol. 7. P. 220–231. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.06.002>
57. Yan F., Liu L., Li Y., Zhang Y., Chen M., Xing X. A dynamic water quality index model based on functional data analysis. *Ecological Indicators*. 2015. Vol. 57. P. 249–258. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.05.005>

References

1. Abba, S. I., Pham, Q. B., Saini, G., Linh, N. T. T., Ahmed, A. N., Mohajane, M., Khaledian, M., Abdulkadir, R. A., & Bach, Q.-V. (2020). Implementation of data intelligence models coupled with ensemble machine learning for prediction of water quality index. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33), 41524–41539. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09689-x> [in English].
2. Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2012). Chapter 1—Why water-quality indices. In *Water Quality Indices* (pp. 3–7). Amsterdam: Elsevier. [in English].
3. Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2012). Water-quality indices. In *Water Quality Indices* (pp. 353–356). Amsterdam: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-54304-2.00016-6> [in English].
4. Abrahão, R., Carvalho, M., Da Silva, W. R., Jr., Machado, T. T. V., Gadelha, C. L. M., & Hernandez, M. I. M. (2007). Use of index analysis to evaluate the water quality of a stream receiving industrial effluents. *Water SA*, 33(4), 459–466. <https://doi.org/10.4314/wsa.v33i4.52940> [in English].
5. Asadollah, S. B. H. S., Sharafati, A., Motta, D., & Yaseen, Z. M. (2021). River water quality index prediction and uncertainty analysis: A comparative study of machine learning

- models. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), Article 104599. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104599> [in English].
6. Banerjee, T., & Srivastava, R. K. (2009). Application of water quality index for assessment of surface water quality surrounding integrated industrial estate-Pantnagar. *Water Science and Technology*, 60(8), 2041–2053. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.537> [in English].
7. Behmel, S., Damour, M., Ludwig, R., & Rodriguez, M. J. (2016). Water quality monitoring strategies—A review and future perspectives. *Science of the Total Environment*, 571, 1312–1329. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.235> [in English].
8. Bhatti, N. B., Siyal, A. A., Qureshi, A. L., & Bhatti, I. A. (2019). Socio-economic impact assessment of small dams based on T-paired sample test using SPSS software. *Civil Engineering Journal*, 5(1), 153–164. <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091233> [in English].
9. Bordalo, A. A., Teixeira, R., & Wiebe, W. J. (2006). A water quality index applied to an international shared river basin: The case of the Douro River. *Environmental Management*, 38, 910–920. <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0037-6> [in English].
10. Braiek, H. B., & Khomh, F. (2020). On testing machine learning programs. *Journal of Systems and Software*, 164, Article 110542. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2020.110542> [in English].
11. Brack, W., Dulio, V., Ågerstrand, M., Allan, I., Altenburger, R., Brinkmann, M., Bunke, D., Burgess, R. M., Cousins, I., Escher, B. I., et al. (2017). Towards the review of the European Union Water Framework Directive: Recommendations for more efficient assessment and management of chemical contamination in European surface water resources. *Science of the Total Environment*, 576, 720–737. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.104> [in English].
12. Carvalho, L., Cortes, R., & Bordalo, A. A. (2011). Evaluation of the ecological status of an impaired watershed by using a multi-index approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 174, 493–508. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1473-9> [in English].
13. Casillas-García, L. F., de Anda, J., Yebra-Montes, C., Shear, H., Díaz-Vázquez, D., & Gradilla-Hernández, M. S. (2021). Development of a specific water quality index for the protection of aquatic life of a highly polluted urban river. *Ecological Indicators*, 129, Article 107899. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107899> [in English].
14. Cordier, C., Guyomard, K., Stavrakakis, C., Sauvade, P., Coelho, F., & Moulin, P. (2020). Culture of microalgae with ultrafiltered seawater: A feasibility study. *SciMedicine Journal*, 2(2), 56–62. <https://doi.org/10.28991/SciMedJ-2020-0202-2> [in English].
15. Dadolahi-Sohrab, A., Arjomand, F., & Fadaei-Nasab, M. (2012). Water quality index as a simple indicator of watersheds pollution in southwestern part of Iran. *Water and Environment Journal*, 26(4), 445–454. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2011.00303.x> [in English].
16. Das Gupta, A. (2008). Implication of environmental flows in river basin management. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33(5), 298–303. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.02.004> [in English].
17. Debels, P., Figueroa, R., Urrutia, R., Barra, R., & Niell, X. (2005). Evaluation of water quality in the Chillán River (Central Chile) using physicochemical parameters and a modified water quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 110, 301–322. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-8064-1> [in English].
18. De Figueiredo, H. P., de Figueiredo, C. R. P., de Souza Barros, J. H., Constantino, M., Magalhães Filho, F. J. C., de Moraes, P. M., & da Costa, R. B. (2019). Water quality in an urban environmental protection area in the Cerrado Biome, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(2), Article 117. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7194-9> [in English].
19. Dezfooli, D., Hosseini-Moghari, S.-M., Ebrahimi, K., & Araghinejad, S. (2018). Classification of water quality status based on minimum quality parameters: Application of machine learning techniques. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4, 311–324. <https://doi.org/10.1007/s40808-017-0406-9> [in English].
20. Gobierno de Jalisco. (n.d.). *Estrategia integral Revivamos el Río Santiago* [Comprehensive strategy Let's revive the Santiago River]. Retrieved May 10, 2026, from <https://riosantiago.jalisco.gob.mx/> [in Spanish].
21. Ewaid, S. H., & Abed, S. A. (2017). Water quality index for Al-Gharraf River, southern Iraq. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 43(2), 117–122. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2017.03.001> [in English].

22. Ewaid, S. H., Abed, S. A., & Kadhum, S. A. (2018). Predicting the Tigris River water quality within Baghdad, Iraq by using water quality index and regression analysis. *Environmental Technology & Innovation*, 11, 390–398. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.06.013> [in English].
23. Fernández del Castillo, A., Yebra-Montes, C., Verduzco Garibay, M., de Anda, J., Garcia-Gonzalez, A., & Gradilla-Hernández, M. S. (2022). Simple prediction of an ecosystem-specific water quality index and the water quality classification of a highly polluted river through supervised machine learning. *Water*, 14(8), Article 1235. <https://doi.org/10.3390/w14081235> [in English].
24. Gazzaz, N. M., Yusoff, M. K., Aris, A. Z., Juahir, H., & Ramli, M. F. (2012). Artificial neural network modeling of the water quality index for Kinta River (Malaysia) using water quality variables as predictors. *Marine Pollution Bulletin*, 64(11), 2409–2420. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.08.005> [in English].
25. Grabowski, R. C., & Gurnell, A. M. (2016). Hydrogeomorphology–ecology interactions in river systems. *River Research and Applications*, 32(2), 139–141. <https://doi.org/10.1002/rra.2974> [in English].
26. Gradilla-Hernández, M. S., de Anda, J., Garcia-Gonzalez, A., Montes, C. Y., Barrios-Piña, H., Ruiz-Palomino, P., & Díaz-Vázquez, D. (2020). Assessment of the water quality of a subtropical lake using the NSF-WQI and a newly proposed ecosystem specific water quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(5), Article 296. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08265-7> [in English].
27. Hameed, M., Sharqi, S. S., Yaseen, Z. M., Afan, H. A., Hussain, A., & Elshafie, A. (2017). Application of artificial intelligence (AI) techniques in water quality index prediction: A case study in tropical region, Malaysia. *Neural Computing and Applications*, 28(Suppl. 1), S893–S905. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2404-7> [in English].
28. Ho, J. Y., Afan, H. A., El-Shafie, A. H., Koting, S. B., Mohd, N. S., Jaafar, W. Z. B., Hin, L. S., Malek, M. A., Ahmed, A. N., Mohtar, W. H. M. W., et al. (2019). Towards a time and cost effective approach to water quality index class prediction. *Journal of Hydrology*, 575, 148–165. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.016> [in English].
29. Jha, D. K., Devi, M. P., Vidyalakshmi, R., Brindha, B., Vinithkumar, N. V., & Kirubakaran, R. (2015). Water quality assessment using water quality index and geographical information system methods in the coastal waters of Andaman Sea, India. *Marine Pollution Bulletin*, 100(1), 555–561. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.08.032> [in English].
30. Kachroud, M., Trolard, F., Kefi, M., Jebari, S., & Bourrié, G. (2019). Water quality indices: Challenges and application limits in the literature. *Water*, 11(2), Article 361. <https://doi.org/10.3390/w11020361> [in English].
31. Kannel, P. R., Lee, S., Lee, Y.-S., Kanel, S. R., & Khan, S. P. (2007). Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 132, 93–110. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9505-1> [in English].
32. Khan, A. A., Paterson, R., & Khan, H. (2004). Modification and application of the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) for the communication of drinking water quality data in Newfoundland and Labrador. *Water Quality Research Journal of Canada*, 39(3), 285–293. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2004.039> [in English].
33. Kouadri, S., Elbeltagi, A., Islam, A. R. M. T., & Kateb, S. (2021). Performance of machine learning methods in predicting water quality index based on irregular data set: Application on Illizi region (Algerian southeast). *Applied Water Science*, 11, Article 190. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01528-9> [in English].
34. Lobato, T. C., Hauser-Davis, R. A., Oliveira, T. F., Silveira, A. M., Silva, H. A. N., Tavares, M. R. M., & Saraiva, A. C. F. (2015). Construction of a novel water quality index and quality indicator for reservoir water quality evaluation: A case study in the Amazon region. *Journal of Hydrology*, 522, 674–683. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.021> [in English].
35. Lowe, L., Szemis, J., & Webb, J. A. (2017). Uncertainty and environmental water. In *Water for the Environment: From Policy and Science to Implementation and Management* (pp. 317–344). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803907-6.00015-2> [in English].

36. Lumb, A., Halliwell, D., & Sharma, T. (2006). Application of CCME Water Quality Index to monitor water quality: A case study of the Mackenzie River Basin, Canada. *Environmental Monitoring and Assessment*, 113, 411–429. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-9092-6> [in English].
37. Lumb, A., Sharma, T. C., & Bibeault, J.-F. (2011). A review of genesis and evolution of Water Quality Index (WQI) and some future directions. *Water Quality, Exposure and Health*, 3, 11–24. <https://doi.org/10.1007/s12403-011-0040-0> [in English].
38. Magesh, N. S., Krishnakumar, S., Chandrasekar, N., & Soundranayagam, J. P. (2013). Groundwater quality assessment using WQI and GIS techniques, Dindigul district, Tamil Nadu, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 4179–4189. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0673-8> [in English].
39. Mohebbi, M. R., Saeedi, R., Montazeri, A., Azam Vaghefi, K., Labbafi, S., Oktaie, S., Abtahi, M., & Mohagheghian, A. (2013). Assessment of water quality in groundwater resources of Iran using a modified Drinking Water Quality Index (DWQI). *Ecological Indicators*, 30, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.02.008> [in English].
40. Naubi, I., Zardari, N. H., Shirazi, S. M., Ibrahim, N. F. B., & Baloo, L. (2016). Effectiveness of Water Quality Index for monitoring Malaysian river water quality. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(1), 231–239. <https://doi.org/10.15244/pjoes/60109> [in English].
41. Nong, X., Shao, D., Zhong, H., & Liang, J. (2020). Evaluation of water quality in the South-to-North Water Diversion Project of China using the water quality index (WQI) method. *Water Research*, 178, Article 115781. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115781> [in English].
42. Ortega, D. J. P., Pérez, D. A., Américo, J. H. P., De Carvalho, S. L., & Segovia, J. A. (2016). Development of index of resilience for surface water in watersheds. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 10(1), 72–82. <https://doi.org/10.4090/juee.2016.v10n1.007282> [in English].
43. Ouyang, Y. (2005). Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis. *Water Research*, 39(12), 2621–2635. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.04.024> [in English].
44. Pandhiani, S. M., Sihag, P., Shabri, A. B., Singh, B., & Pham, Q. B. (2020). Time-series prediction of streamflows of Malaysian rivers using data-driven techniques. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146(7), Article 04020013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001463](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001463) [in English].
45. Pesce, S. F., & Wunderlin, D. A. (2000). Use of water quality indices to verify the impact of Cordoba City (Argentina) on Suquia River. *Water Research*, 34(11), 2915–2926. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00036-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00036-1) [in English].
46. Rangeti, I., Dzwauro, B., Barratt, G. J., & Otieno, F. A. O. (2015). Ecosystem-specific water quality indices. *African Journal of Aquatic Science*, 40(3), 227–234. <https://doi.org/10.2989/16085914.2015.1054341> [in English].
47. Sánchez, E., Colmenarejo, M. F., Vicente, J., Rubio, A., García, M. G., Travieso, L., & Borja, R. (2007). Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution. *Ecological Indicators*, 7(2), 315–328. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2006.02.005> [in English].
48. Shakhman, I., & Bystrantseva, A. (2021). Water quality assessment of the surface water of the Southern Bug River Basin by complex indices. *Journal of Ecological Engineering*, 22(1), 195–205. <https://doi.org/10.12911/22998993/128858> [in English].
49. Singh, B., Sihag, P., & Deswal, S. (2019). Modelling of the impact of water quality on the infiltration rate of the soil. *Applied Water Science*, 9, Article 15. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0892-1> [in English].
50. Sun, W., Xia, C., Xu, M., Guo, J., & Sun, G. (2016). Application of modified water quality indices as indicators to assess the spatial and temporal trends of water quality in the Dongjiang River. *Ecological Indicators*, 66, 306–312. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.054> [in English].
51. Sutadian, A. D., Muttill, N., Yilmaz, A. G., & Perera, B. J. C. (2016). Development of river water quality indices—A review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, Article 58. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5050-0> [in English].

52. Talalaj, I. A. (2014). Adaptation of water quality index (WQI) for groundwater quality assessment near the landfill site. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 36(3), 144–151. <https://doi.org/10.3103/S1063455X14030084> [in English].

53. Tiyasha, Tung, T. M., & Yaseen, Z. M. (2020). A survey on river water quality modelling using artificial intelligence models: 2000–2020. *Journal of Hydrology*, 585, Article 124670. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124670> [in English].

54. Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P., & Dobhal, R. (2013). Water quality assessment in terms of Water Quality Index. *American Journal of Water Resources*, 1(3), 34–38. <https://doi.org/10.12691/ajwr-1-3-3> [in English].

55. Uddin, M. G., Moniruzzaman, M., & Khan, M. (2017). Evaluation of groundwater quality using CCME Water Quality Index in the Rooppur Nuclear Power Plant Area, Ishwardi, Pabna, Bangladesh. *American Journal of Environmental Protection*, 5(2), 33–43. <https://doi.org/10.12691/env-5-2-2> [in English].

56. Uddin, M. G., Moniruzzaman, M., Quader, M. A., & Hasan, M. A. (2018). Spatial variability in the distribution of trace metals in groundwater around the Rooppur nuclear power plant in Ishwardi, Bangladesh. *Groundwater for Sustainable Development*, 7, 220–231. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.06.002> [in English].

57. Yan, F., Liu, L., Li, Y., Zhang, Y., Chen, M., & Xing, X. (2015). A dynamic water quality index model based on functional data analysis. *Ecological Indicators*, 57, 249–258. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.05.005> [in English].

Humeniuk H.

PhD, Docent of Department of General Biology
and Methods of Teaching Natural Sciences,
Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University
gumenjuk@chem-bio.com.ua
orcid.org/0000-0002-7423-9968

Dukh R.

PhD student of Department of General Biology and
Methods of Teaching Natural Sciences
Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University
romaedge@ukr.net
orcid.org/0009-0001-0567-1896

WATER QUALITY INDICES BASED ON PHYSICOCHEMICAL, BIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL INDICATORS IN THE SYSTEM OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

The current state of aquatic ecosystems is characterized by increasing anthropogenic pressure, which leads to the deterioration of surface and groundwater quality due to industrial, agricultural, and urban impacts. The main factors contributing to water resource degradation include the input of biogenic elements, heavy metals, organic pollutants, as well as changes in hydrological regimes and climate variability. Under these conditions, the development and improvement of integrated approaches for assessing the condition of water bodies becomes particularly important in the context of sustainable development and the rational use of water resources.

This study considers the assessment of water quality indices (WQI) based on physicochemical, biological and biochemical parameters, which serve as the foundation for monitoring surface and groundwater under various natural and geographical conditions. A comparative analysis of seven widely used water quality models was conducted. It was shown that traditional index-based models provide a generalized and

convenient assessment of water quality; however, their accuracy depends on local hydrochemical conditions and the composition of biological and biochemical indicators.

The potential application of machine learning methods for improving the accuracy of water quality assessment and classification based on reduced sets of physicochemical, biological and biochemical parameters is also discussed. It was found that machine learning algorithms enhance the efficiency of environmental monitoring, reduce laboratory analysis costs, and enable rapid assessment of the condition of water bodies.

It was established that the integration of classical index models with modern machine learning methods improves environmental monitoring efficiency and serves as an important tool for implementing sustainable development principles in water resource management, as it promotes their rational use and protection.

The obtained results confirm the prospects of developing combined approaches to improve water resource management and protection systems under increasing anthropogenic pressure and climate change.

Keywords: water quality; water quality index; WQI; water resources monitoring; machine learning; surface water; environmental monitoring; aquatic ecosystems, sustainable development, biological and biochemical indicators.

*Стаття до редакції надійшла 01.04.2026 року
Рецензія на статтю надійшла 20.04.2026 року*

УДК 543.42:577.1:633/635

DOI 10.31654/2786-8478-2026-BN-2-80-92

Осипчук Р. П.

аспірант кафедри біології
Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя
ruslan0399os@gmail.com
orcid.org/0009-0007-2193-0839

Кучменко О. Б.

доктор біологічних наук, професор,
завідувач кафедри біології
Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя
kuchmenko1978@gmail.com
orcid.org/0000-0002-3021-8583

Мельничук О. В.

доктор фізико-математичних наук, професор.
професор кафедри інформаційних технологій,
фізико-математичних на економічних наук
Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя
melnychuk.ov@ndu.edu.ua
orcid.org/0000-0002-6768-8765

**ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ІНФРАЧЕРВОНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ
ДЛЯ ОЦІНКИ БІОХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЛИСТЯ ВИНОГРАДУ,
КВІТОК РОБІНІЇ, НАСІННЯ БАЗИЛІКА ТА ЗЕРЕН ПШЕНИЦІ**

Інфрачервона спектроскопія – це метод якісного та кількісного аналізу. Суть цього методу полягає у вивченні спектрів поглинання і пропускання електромагнітного випромінювання в інфрачервоній області.

Використання інфрачервоної спектроскопії для аналізу рослин не є новинкою. Було проведено багато успішних досліджень для визначення географічного походження рослинної сировини, фальсифікації, і т. д. В нашому дослідженні ми провели інфрачервону спектроскопію сухого рослинного матеріалу: зерна пшениці, листя винограду, квіток робінії та насіння базилика. Ці рослини використовують у косметичній, фармацевтичній та харчовій промисловості.

Встановлено, що ІЧ спектр сухого зерна пшениці вказує на наявність високого рівня крохмалю, білків, води та ліпідів. Аналіз ІЧ спектру висушеного водного екстракту демонструє вищий рівень білків та полісахаридів. Натомість, видно нижчий вміст крохмалю, що може бути пов'язано з його поганою розчинністю у воді. ІЧ спектр сухого листя винограду демонструє можливий високий вміст фенольних сполук, целюлози, пектину, білків, поліфенолів та полісахаридів. Також, імовірно, зафіксовано наявність ліпідів. Натомість, ІЧ спектр висушеного водного екстракту вказує на наявність меншої кількості ліпідів та суттєво вищого рівня поліфенолів.

Аналізуючи ІЧ спектр сухих квіток робінії встановлено наявність високого рівня фенольних сполук та флавоноїдів. Проте, ІЧ спектр висушеного водного екстракту демонструє значно вищу концентрацію поліфенолів та флавоноїдів. ІЧ спектр сухого насіння базилика демонструє високий рівень полісахаридів, ліпідів та білків. Натомість, ІЧ спектр висушеного водного екстракту вказує на суттєво вищий рівень полісахаридів, білків та сильне зниження рівня ліпідів, що може бути пов'язано з гідрофобністю жирів.

Отримані результати доводять високу ефективність використання ІЧ спектроскопії для вивчення рослинної сировини. Отримані результати можуть бути використанні в подальших дослідженнях біохімії рослин та рослинних екстрактів. **Ключові слова:** спектр, ІЧ спектроскопія, екстракти, сухий рослинний матеріал, білки, ліпіди, вуглеводи, флавоноїди, поліфеноли.

Вступ. Інфрачервона спектроскопія – це широковикористовуваний метод якісного та кількісного аналізу. Він використовується для дослідження молекулярних структур на рівні хімічних зв'язків та функціональних груп. Цей метод швидкий, простий у використанні та екологічно чистий. Суть методу інфрачервоної спектроскопії полягає у вивченні спектрів поглинання і пропускання електромагнітного випромінювання в інфрачервоній області. Цей метод часто поєднують із хемометричними методами, які дозволяють адекватно обробляти отримані спектри та покращують вилучення релевантної спектральної інформації [1, 2].

Важливий крок у обробці даних є попередня обробка спектрів. Основна мета – усунення шуму та підвищення чутливості. Найпоширенішими методами усунення шуму є нормалізація, стандартна нормальна варіація та мультиплікативна корекція розсіювання. Для підвищення чутливості найпоширенішою технікою є деривація. Дуже важливим є баланс між техніками згладжування та підвищення чутливості [3, 4]. Золотим стандартом багатовимірної кількісної моделі є метод часткових найменших квадратів [5]. Метод допомагає будувати модель із використанням незалежних змінних для прогнозування залежної змінної, що цікавить вчених під час проведення дослідження [6].

Використання інфрачервоної спектроскопії для аналізу рослин не є новинкою [7]. Найчастіше за допомогою цього методу досліджують рослинну олію. Було проведено багато успішних досліджень для визначення географічного походження рослинної сировини, фальсифікації, кількісного визначення параметрів протікання процесів окислення [8-10]. Більшість досліджень проводиться на оливковій олії та харчових оліях, що використовуються для смаження [11-13]. В даному дослідженні проводили дослідження зерна пшениці, листя винограду, квіток робінії та насіння базиліка за допомогою інфрачервоної спектроскопії. Дослідження цих рослин набирає популярності, оскільки вони є доступними, популярними в косметичних, фармацевтичних та харчових галузях [14].

Базилік (*Ocimum basilicum* L.) зустрічається по всьому світу і використовується в харчовій, фармацевтичній та косметичній промисловості [14]. В попередніх дослідженнях було продемонстровано, що насіння базиліка володіє найвищим рівнем вмісту загальних та білкових SH-груп, відновленого глутатіону та ТБК-позитивних продуктів, а також найвищою активністю каталази та аскорбатпероксидази [14]. Листя винограду (*Vitis vinifera* L.) містить найвищий рівень вітаміну С, антоціанових пігментів та фенольних сполук [14]. Квітки робінії (*Robinia pseudoacacia* L.) володіють найвищим вмістом небілкових SH-груп та білку [14]. Пшениця (*Triticum sp.*) є одним з найважливіших злаків як джерело природних антиоксидантів. Зерно пшениці містить високий вміст біоактивних сполук: фенолкарбонові кислоти, фітостероли, токофероли, алкілрезорцини [15]

Метою роботи є дослідження методом інфрачервоної спектроскопії сухого рослинного матеріалу (зерна пшениці, листя винограду, квітки робінії та насіння базиліка) та висушених водних екстрактів із досліджуваних рослин.

Методи та організація дослідження. Для дослідження використовували листя винограду (*Vitis vinifera* L.), квітки робінії (*Robinia pseudoacacia* L.), насіння базиліка (*Ocimum basilicum* L.) та зерна пшениці (*Triticum aestivum* L.). Робінія та виноград були зібрані навесні 2024 року в місті Коростень, Житомирської області. Пшениця та насіння базиліка було зібране восени того ж року. Висушування проводилось у добре

провітрюваному приміщенні за температури 23-28°C без прямого потрапляння сонячних променів. Сухий рослинний матеріал розтирали до порошкоподібного стану в ступці.

Для дослідження висушених водних екстрактів із досліджуваних рослин готували екстракти шляхом змішування води та сухої рослинної сировини у пропорції 7:3 з подальшою екстракцією за температури 90°C протягом 40 хв. Готові екстракти фільтрували, охолоджували та висушували в роторному випарнику за температури 35°C до повного висушування. Отриманий матеріал також подрібнювали до порошкоподібного стану.

Для аналізу оптичних властивостей досліджуваних зразків проводили вимірювання спектрів дифузного відбивання в інфрачервоному діапазоні, які реєстрували за кімнатної температури за допомогою спектрофотометра високої роздільної здатності Shimadzu IRTTracer-100, оснащеного приставкою дифузного відбивання DRS-8000A, що забезпечує можливість проведення досліджень у спектральному діапазоні 240–4000 cm^{-1} . Реєстрацію спектрів здійснювали з роздільною здатністю 1 cm^{-1} , що забезпечувало високу точність аналізу спектральних особливостей порошкових зразків у досліджуваному діапазоні частот.

Для побудови графіків та аналізу отриманих спектрів використовували програмне забезпечення OriginPro 2024.

Результати досліджень та їх обговорення. Досліджуючи сухе зерно пшениці встановлено високий вміст білків та крохмалю, що є типовим для цієї культури. Широкий пік сильної інтенсивності за частоти коливань 3400 cm^{-1} вказує на наявність великої кількості R-O-H зв'язків (Рис. 1) [16-21].

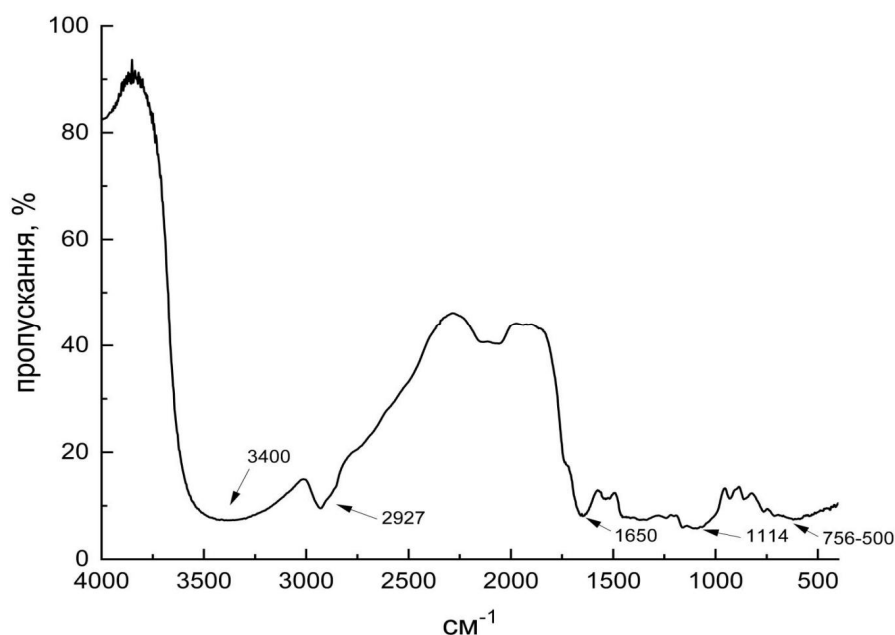


Рисунок 1. ІЧ спектр сухого зерна пшениці

Це може бути пов'язано з наявністю води в зразку та частково з наявністю крохмалю, целюлози та білків. Пік середньої інтенсивності за частоти коливань 297 cm^{-1} вказує на наявність CH_3/CH_2 функціональних груп, що може бути пов'язаним з наявністю в зразку ліпідів, вуглеводів та білків [20, 21]. Гострий пік сильної інтенсивності за частоти коливань 1650 cm^{-1} чітко вказує на коливання C=O зв'язків, що, можливо, підтверджує наявність високого вмісту білка, більшою мірою глютену [21]. Наявність піку середньої інтенсивності за частоти коливань 1114 cm^{-1} доводить

вміст крохмалю, оскільки вказує на коливання C-O-C глікозидних зв'язків. Слабкий широкий пік за частоти коливань 756-500 cm^{-1} вказує на наявність коливань C-H зв'язків, що також може вказувати на наявність полісахаридів та целюлози [20, 21].

Досліджуючи ІЧ спектри сухого листа винограду встановлена наявність поліфенолів, флавоноїдів, води та целюлози. Це підтверджується дуже сильним широким піком за частоти коливань 3400 cm^{-1} та сильним піком за частоти 1640 cm^{-1} , що вказує на наявність великої кількості O-H/N-H зв'язків та ароматичних структур (Рис. 2) [20-23].

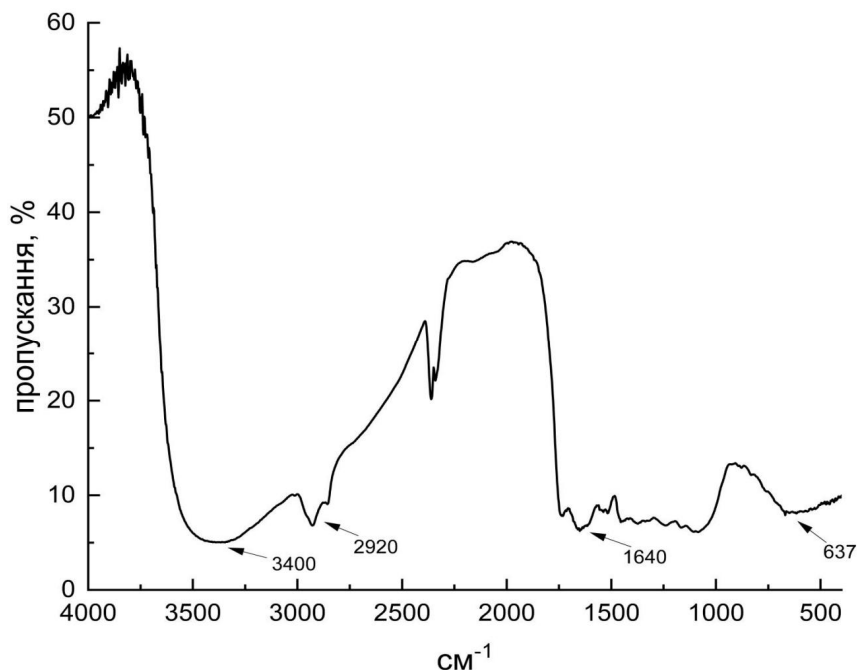


Рисунок 2. ІЧ спектр сухого листа винограду

Ці дані підтверджують результати нещодавніх досліджень, щодо високого вмісту вторинних метаболітів у листі винограду [24, 25]. Пік середньої інтенсивності за частоти коливань 2920 cm^{-1} вказує на наявність CH_2/CH_3 функціональних груп, що характерні для ліпідів. Імовірно, ці результати вказують на наявність ліпідів кутикулярної мембрани листа винограду [20, 21, 24, 25].

Разом з тим, дослідження ІЧ спектрів сухих квіток робінії також вказують на наявність поліфенолів, флавоноїдів, целюлози та води. Це підтверджує широкий пік середньої інтенсивності за частоти коливань 3300 cm^{-1} , що також, як і у листі винограду, вказує на коливання валентних зв'язків O-H та N-H (Рис. 3) [20, 21].

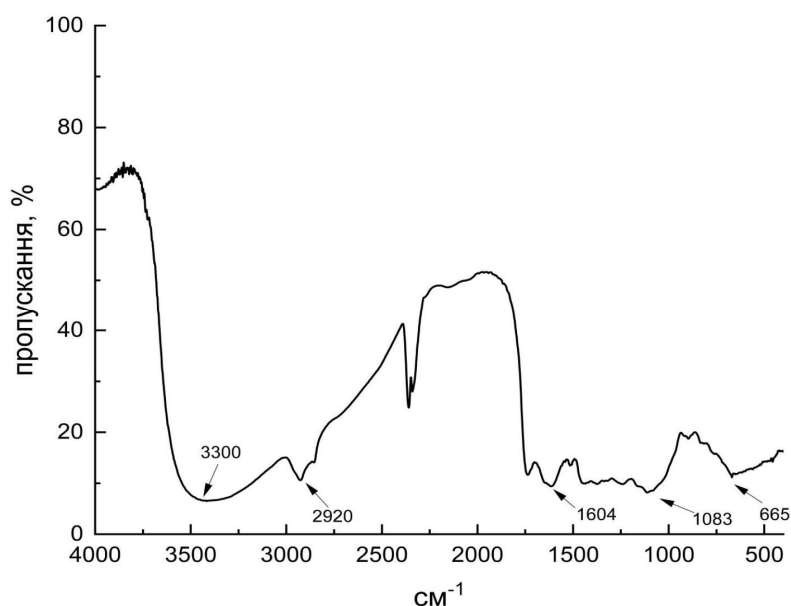


Рисунок 3. ІЧ спектр сухих квіток робінії

Пік середньої інтенсивності за частоти коливань 2920 cm^{-1} вказує на можливий вміст ліпідів, восків та аліфатичних сполук. Пік сильної інтенсивності за частоти коливань 1604 cm^{-1} може вказувати на наявність С=С зв'язків та COO^- функціональної групи, характерної для робініну, кверцетину та інших флавоноїдів [14, 21]. Наявність флавоноїдів підтверджується слабким піком за частоти 665 cm^{-1} , що вказує на наявність коливань С-Н/С-О зв'язків у ароматичних кільцях. Спектр типовий для квіток робінії, що містять підтверджений високий вміст антиоксидантних флавоноїдів [14, 20, 21].

Досліджуючи ІЧ спектр сухого насіння базиліка встановлена наявність невеликої кількості води, полісахаридів, білків та фенольних сполук. Це підтверджується сильним дуже широким піком за частоти коливань 3770-3100 cm^{-1} , що вказує на коливання валентних зв'язків О-Н/Н-Н (Рис. 4) [20, 26].

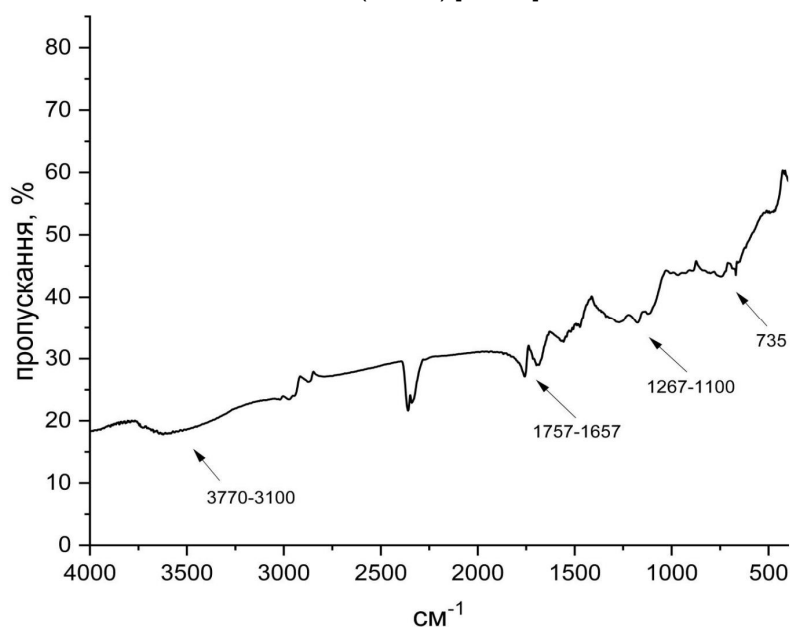


Рисунок 4. ІЧ спектр сухого насіння базиліка

Сильний широкий пік за частоти 1267-1100 cm^{-1} вказує на коливання глікозидних зв'язків С-О-С та С-О. Це може бути пов'язано з наявністю в насінні базилика полісахаридів та пектину [14, 20, 21, 27, 28]. Сильний пік за частоти коливань 1757-1657 cm^{-1} вказує на наявність карбонільної групи С=О, що може бути пов'язано з високим вмістом ліпідів (тригліцеридів) [14, 20, 21, 27, 28]. Наявність піку середньої інтенсивності за частоти коливань 735 cm^{-1} вказує на наявність функціональної групи CH_2 характерної для довгих аліфатичних ланцюгів ліпідів [20, 21].

Досліджуючи ІЧ спектр висушеного водного екстракту із зерен пшениці була встановлена наявність високого вмісту води, що підтверджується сильним широким піком за частоти коливань 3370 cm^{-1} (Рис. 5) [20, 21].

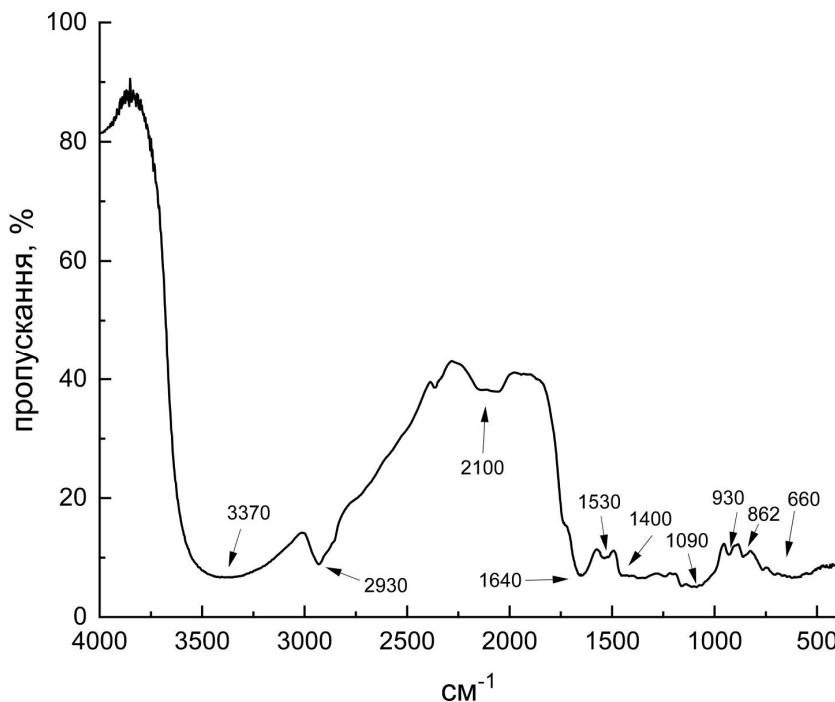


Рисунок 5. ІЧ спектр висушеного водного екстракту із зерен пшениці

Пік середньої інтенсивності за частоти 2930 cm^{-1} вказує на наявність CH_3/CH_2 функціональних груп, що є свідченням вмісту білків та невеликої кількості ліпідів. Високий вміст білків також підтверджується піками середньої інтенсивності за частоти коливань 1640 cm^{-1} , 1530 cm^{-1} , 1400 cm^{-1} та 862 cm^{-1} , що вказують на наявність коливань С=О та N-H зв'язків, CH_2 функціональних груп та β -глікозидних зв'язків відповідно. Наявність піків середньої інтенсивності за частоти коливань 1090 cm^{-1} та слабкої інтенсивності за частоти 930 cm^{-1} та 660 cm^{-1} вказують на коливання С-О-С глікозидних зв'язків, аномального карбону та С-О/С-Н зв'язків відповідно [20, 21]. Це може свідчити про наявність високого вмісту вуглеводів у досліджуваному зразку (водорозчинні β -глюкани, арабіноксилан, олігосахариди тощо) [16, 17, 18]. Пік середньої інтенсивності за частоти 2100 cm^{-1} вказує на коливання С \equiv N зв'язків. Цей пік є нетиповим і може бути результатом коливань у залишках амінів або артефактом підготовки зразка [20].

У порівнянні з ІЧ спектром сухого зерна пшениці, спектр висушеного екстракту вказує на вищий вміст білка та водорозчинних полісахаридів. Натомість, фіксується суттєве зниження вмісту крохмалю, що може бути пов'язаним з його поганою розчинністю у воді.

Досліджуючи ІЧ спектр висушеного водного екстракту з листя винограду встановлено наявність високого вмісту води, поліфенолів та флавоноїдів, що підтверджується піком дуже сильної інтенсивності на частоти коливань 3370 cm^{-1} (Рис. 6) [20, 21].

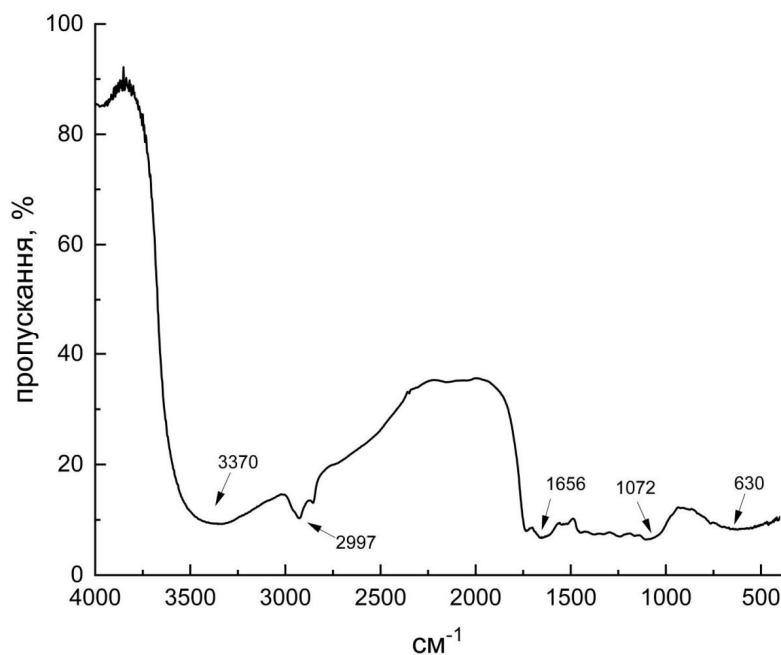


Рисунок 6. ІЧ спектр висушеного водного екстракту з листя винограду

Піки за частоти коливань 1656 см^{-1} , 1072 см^{-1} та 630 см^{-1} вказують на наявність коливань $\text{C}=\text{O}$ зв'язків, $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ глікозидних зв'язків та $\text{C}-\text{H}/\text{C}-\text{O}$ зв'язків у ароматичних кільцях, що підтверджує можливу наявність флавоноїдів та фенольних сполук [14, 20-24]. Пік за частоти 2997 см^{-1} є нетиповим та може вказувати на наявність специфічної сполуки чи бути артефактом, пов'язаним із особливістю підготовки зразка [20].

Порівнюючи ІЧ спектр висушеного екстракту з листя винограду із спектром сухого листа встановлено вищий рівень вмісту поліфенолів та суттєво нижчий рівень ліпідів.

Аналіз ІЧ спектру висушеного водного екстракту з квіток робінії показав високий вміст води, флавоноїдів, поліфенолів та полісахаридів. Це доводить наявність широкого піку сильної інтенсивності за частоти коливань 3350 см^{-1} (Рис. 7) [20, 21].

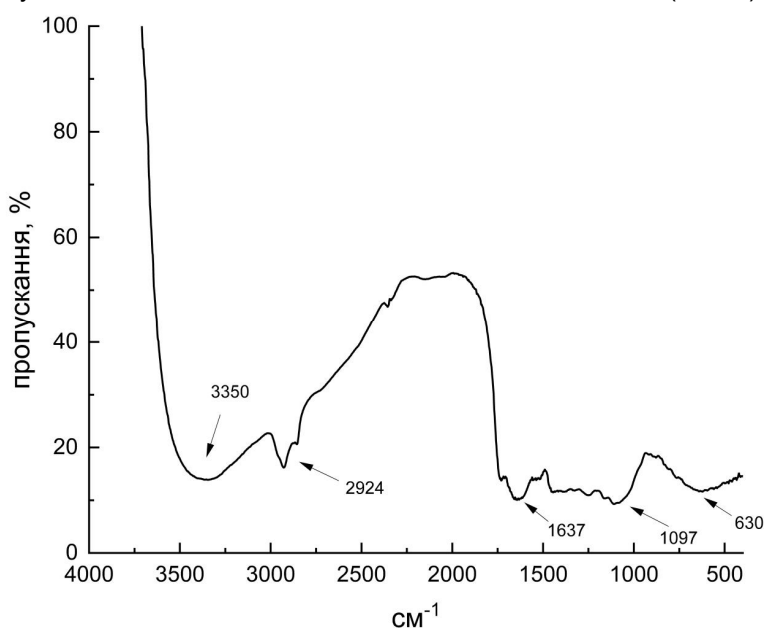


Рис. 7. ІЧ спектр висушеного водного екстракту з квіток робінії

Наявність високого рівня вмісту флавоноїдів доводять середньої інтенсивності піки за частоти 2924 см^{-1} , 1097 см^{-1} та пік сильної інтенсивності за частоти 1637 см^{-1} , що вказують на наявність CH_2 функціональної групи, коливань глікозидних C-O-C/C-O та C=C зв'язків відповідно. Слабкий пік за частоти 630 см^{-1} вказує на наявність коливань C-H/C-O зв'язків у ароматичних кільцях, що доводить можливу наявність фенольних сполук [14, 20, 21].

Порівнюючи ІЧ спектр висушеного водного екстракту з спектром сухих квіток робінії можна зробити висновок, що водний екстракт збагачений більшим вмістом водорозчинних поліфенолів та флавоноїдів та містить суттєво нижчий вміст ліпідів. Пік ароматичних структур зсунувся з частоти коливань 1604 см^{-1} до 1637 см^{-1} . Це типове явище при переході від цільної рослинної сировини до водного екстракту, оскільки флавоноїди (робінін, кверцетин тощо) переходять у водне середовище. Збільшення інтенсивності коливань O-H зв'язків (пік за частоти 3350 см^{-1}) вказує на імовірне збільшення концентрації фенольних сполук та води. Сигнал у районі 2924 см^{-1} слабший, порівняно з ліпідним сигналом у сухому матеріалі. Це може бути пов'язано з поганою екстракцією жирів та восків у водне середовище.

Досліджуючи ІЧ спектри висушеного водного екстракту з насіння базиліка було встановлено наявність великої кількості води та полісахаридів. По це свідчить широкий пік дуже сильної інтенсивності за частоти коливань 3370 см^{-1} (Рис. 8) [20, 21].

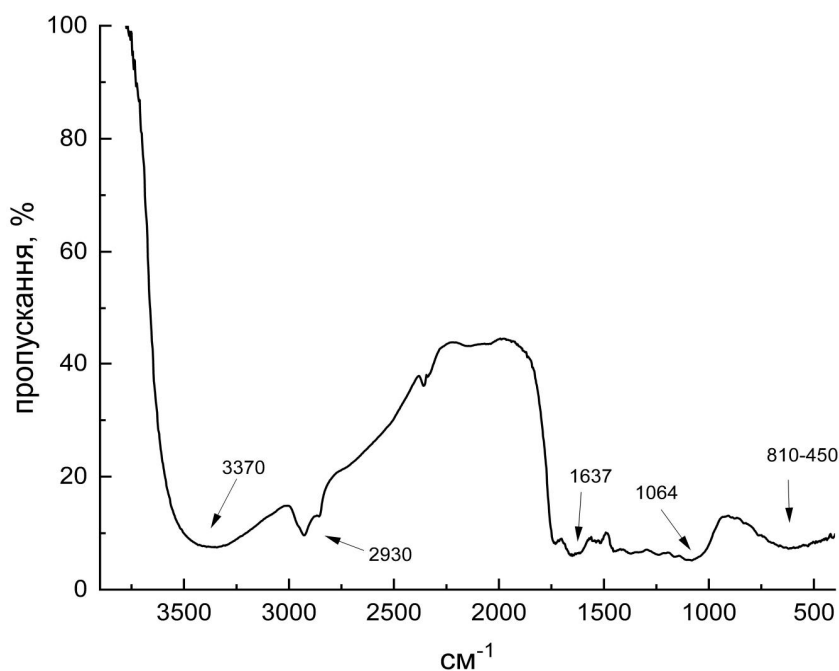


Рис. 8. ІЧ спектр висушеного водного екстракту з насіння базиліка

Наявність високого рівня вмісту полісахаридів також доводить наявність сильних піків за частот 1064 см^{-1} та $810\text{-}450\text{ см}^{-1}$, оскільки вони відповідають за коливання C-O-C/C-O глікозидних зв'язків та C-H/C-O/C-S зв'язків. Сильний сигнал за частоти 1637 см^{-1} вказує на наявність C=O та C=C зв'язків, що, імовірно, пов'язано з наявністю високого рівня вмісту білків. Можливу наявність високого вмісту білків та ліпідів також доводить наявність функціональних груп CH_3 та CH_2 , що підтверджує сигнал середньої інтенсивності за частоти коливань 2930 см^{-1} [20, 21].

Порівнюючи ІЧ спектр висушеного водного екстракту з спектром сухого насіння встановлено вищу концентрацію полісахаридів та білків. Натомість, встановлено суттєво нижчий рівень вмісту ліпідів. Пік карбонільних продуктів за частоти коливань 1757 см^{-1} , який був добре вираженим у ІЧ спектрі сухого насіння базиліка, практично

зник. Це може бути пов'язано з гідрофобністю ліпідів [14, 20, 21, 27, 28]. В цілому, спектр висушеного екстракту демонструє менше "шумів", характерних для спектру сухого насіння (ліпіди, целюлоза, пігменти тощо).

Висновки. Аналізуючи отримані результати встановлено, що ІЧ спектр сухого зерна пшениці вказує на наявність високого рівня вмісту крохмалю, білків, води та ліпідів. Аналіз ІЧ спектру висушеного водного екстракту демонструє вищий рівень білків у екстракті та полісахаридів. Натомість, видно нижчий вміст крохмалю, що може бути пов'язано з його поганою розчинністю у воді.

ІЧ спектр сухого листя винограду демонструє можливий високий вміст фенольних сполук, целюлози, пектину, білків, поліфенолів та полісахаридів. Також, імовірно, зафіксовано наявність ліпідів. Натомість ІЧ спектр висушеного водного екстракту з листя винограду вказує на наявність меншої кількості ліпідів та суттєво вищого рівня вмісту поліфенолів.

Аналізуючи ІЧ спектр сухих квіток робінії встановлено наявність високого вмісту фенольних сполук та ароматичних структур флавоноїдів. Проте, ІЧ спектр висушеного водного екстракту з квіток робінії демонструє суттєво вищу концентрацію поліфенолів та флавоноїдів.

ІЧ спектр сухого насіння базиліка демонструє високий вміст полісахаридів, ліпідів та білків. Натомість, ІЧ спектр висушеного водного екстракту з насіння базиліка вказує на суттєво вищий рівень вмісту полісахаридів, білків та сильне зниження рівня ліпідів, що може бути пов'язано з гідрофобністю жирів.

Отримані результати доводять ефективність використання ІЧ спектроскопії для вивчення рослинної сировини. Отримані результати можуть бути використанні в подальших дослідженнях біохімії рослин та рослинних екстрактів.

Список використаної літератури

1. Geana E.I., Ciucure C.T., Apetrei C., Artem V. Application of Spectroscopic UV-Vis and FT-IR Screening Techniques Coupled with Multivariate Statistical Analysis for Red Wine Authentication: Varietal and Vintage Year Discrimination. *Molecules*. 2019. Vol. 24. № 22. P. 1-15. DOI: [10.3390/molecules24224166](https://doi.org/10.3390/molecules24224166).
2. Wu Z., Zhao Y., Zhang J., Wang Y. Quality Assessment of *Gentiana Rigescens* from Different Geographical Origins Using FT-IR Spectroscopy Combined with HPLC. *Molecules*. 2017. Vol. 22. №7. P. 1-17. DOI: [10.3390/molecules22071238](https://doi.org/10.3390/molecules22071238).
3. Kokalj M., Rihtarič M., Kreft S. Commonly Applied Smoothing of IR Spectra Showed Unappropriate for the Identification of Plant Leaf Samples. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 2011. Vol. 108. №2. P. 154-161. DOI: [10.1016/j.chemolab.2011.07.001](https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2011.07.001).
4. Junaedi E., Lestari K., Muchtaridi M. Infrared Spectroscopy Technique for Quantification of Compounds in Plant-Based Medicine and Supplement. *J. Adv. Pharm. Technol. Res.* 2021. Vol. 12. №1. P. 1-7. DOI: [10.4103/japtr.JAPTR_96_20](https://doi.org/10.4103/japtr.JAPTR_96_20).
5. Geladi P., Martens H., Hadjiiski L., Hopke P. A Calibration Tutorial for Spectral Data. Part 2. Partial Least Squares Regression Using Matlab and Some Neural Network Results. *J. Near Infrared Spectrosc.* 1996. Vol. 4. P. 243-255. DOI: [10.1255/jnirs.94](https://doi.org/10.1255/jnirs.94).
6. Kokalj M., Strgulc Krajšek S., Omahen Bratuša J., Kreft S. Comparison and Improvement of Commonly Applied Statistical Approaches for Identification of Plant Species from IR Spectra. *J. Chemom.* 2010. Vol. 24. P. 611-616. DOI: [10.1002/cem.1336](https://doi.org/10.1002/cem.1336).
7. Guille D., Cabo N. Infrared Spectroscopy in the Study of Edible Oils and Fats. *J. Sci. Food Agric.* 1997. Vol. 75. P. 1-11. DOI: [10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199709\)75:1<1::AID-JSFA842>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199709)75:1<1::AID-JSFA842>3.0.CO;2-R).
8. Vlachos N., Skopelitis Y., Psaroudaki M., Konstantinidou V., Chatzilazarou A., Tegou E. Applications of Fourier Transform-Infrared Spectroscopy to Edible Oils. *Anal. Chim. Acta.* 2006. Vol. 573-574. P. 459-465. DOI: [10.1016/j.aca.2006.05.034](https://doi.org/10.1016/j.aca.2006.05.034).
9. Zhang Q., Liu C., Sun Z., Hu X., Shen Q., Wu J. Authentication of Edible Vegetable Oils Adulterated with Used Frying Oil by Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Food Chem.* 2012. Vol. 132. P. 1607-1613. DOI: [10.1016/j.foodchem.2011.11.129](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.11.129).

10. Liang P., Chen C., Zhao S., Ge F., Liu D., Liu B., Fan Q., Han B., Xiong X. Application of Fourier Transform Infrared Spectroscopy for the Oxidation and Peroxide Value Evaluation in Virgin Walnut Oil. *J. Spectrosc.* 2013. Vol. 2013. P. 138728. DOI: 10.1155/2013/138728.
11. Bendini A., Cerretani L., Di Virgilio F., Belloni P., Bonoli-Carbognin M., Lercker G. Preliminary evaluation of the application of the FTIR spectroscopy to control the geographic origin and quality of virgin olive oils. *J. Food Qual.* 2007. Vol. 30. P. 424–437. DOI: 10.1111/j.1745-4557.2007.00132.x.
12. Mahboubifar M., Yousefinejad S., Alizadeh M., Hemmateenejad B. Prediction of the Acid Value, Peroxide Value and the Percentage of Some Fatty Acids in Edible Oils during Long Heating Time by Chemometrics Analysis of FTIR-ATR Spectra. *J. Iran. Chem. Soc.* 2016. Vol. 13. P. 2291–2299. DOI: 10.1007/s13738-016-0948-1.
13. Wójcicki K., Khmelinskii I., Sikorski M., Sikorska E. Near and Mid Infrared Spectroscopy and Multivariate Data Analysis in Studies of Oxidation of Edible Oils. *Food Chem.* 2015. Vol. 187. P. 416–423. DOI: 10.1016/j.foodchem.2015.04.046.
14. Осипчук Р., Кучменко О. Оцінка антиоксидантного потенціалу водних екстрактів із листя винограду, квіток робінії, насіння базиліку та зерен пшениці. *Наукові записки. Біологічні науки.* 2024. №3. С. 25-33.
15. Antonenko K., Duma M., Kreicberg V., Kunkulberga D. The influence of microelements selenium and copper on the rye malt amylase activity and flour technological properties. *Agronomy Research.* 2016. P. 1261–1270.
16. Amir R., Anjum F. Application of Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy for the identification of wheat varieties. *J. Food Sci. Technol.* 2011. Vol. 50. №5. P. 1018-1023.
17. Daminbek Z. et al. Study and Identification of Flour Samples by IR Spectra. *ECAMPUZ CAMP3 REPORT.* 2025. P. 1-16.
18. Zhang Y. et al. Starch content and physicochemical properties of green wheat. *International Journal of Food Properties.* 2019. Vol. 22. P. 1463-1474.
19. Lončarić P. et al. FTIR-Based Study of Starch Retrogradation and Protein Secondary Structure in Bread. *Foods.* 2026. Vol. 15. №3. P. 1-23.
20. Silverstein R.M. et al. Spectrometric Identification of Organic Compounds. *John Wiley & Sons.* 2014. 464 p.
21. Stuart B.H. Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications. *John Wiley & Sons.* 2004. 224 p.
22. Álvarez et al. Simple distinction of grapevine (*Vitis vinifera* L.) genotypes by direct ATR-FTIR. *Food Chemistry.* 2020. Vol. 328. P. 127164.
23. Topalä C.M. et al. FTIR spectra of grapevines (*Vitis vinifera* L.) in the presence of virus infections. *Acta Horticulturae.* 2017. Vol. 1188. P. 313–318.
24. Murru et al. Artificial Neural Network and Attenuated Total Reflectance-Fourier Transform Infrared Spectroscopy to identify the chemical variables related to ripeness and variety classification of grapes for Protected. Designation of Origin wine production. *Computers and Electronics in Agriculture.* 2019. Vol. 164. P. 104922.
25. Martín-Tornero et al. Comparative quantification of chlorophyll and polyphenol levels in grapevine leaves sampled from different geographical locations. *Scientific Reports.* 2020. Vol. 10. P. 1-13.
26. Fedenko V.S. Spectral characteristics of flavonoids of *Robinia pseudoacacia* L. and *Robinia hispida* L. flowers. *J. of Chemistry & Chemical Technology.* 2025. Vol. 33. №3. P. 602-610.
27. Tyśkiewicz K. Characterization of bioactive compounds in the biomass of black locust, poplar and willow. *Trees.* 2019. Vol. 33. P. 1235-1263.
28. Nazir S. Functional characterization of basil (*Ocimum basilicum* L.) seed mucilage. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre.* 2021. Vol. 25. P. 100261.

References

1. Geana E.I., Ciucure C.T., Apetrei C., Artem V. (2019) Application of Spectroscopic UV-Vis and FT-IR Screening Techniques Coupled with Multivariate Statistical Analysis for Red Wine Authentication: Varietal and Vintage Year Discrimination. *Molecules.* 24(22). 1-15 [in English]

2. Wu Z., Zhao Y., Zhang J., Wang Y. (2017) Quality Assessment of *Gentiana Rigescens* from Different Geographical Origins Using FT-IR Spectroscopy Combined with HPLC. *Molecules*. 22(7). 1-17 [in English]
3. Kokalj M., Rihtarič M., Kreft S. (2011) Commonly Applied Smoothing of IR Spectra Showed Unappropriate for the Identification of Plant Leaf Samples. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 108(2). 154-161 [in English].
4. Junaedi E., Lestari K., Muchtaridi M. (2021) Infrared Spectroscopy Technique for Quantification of Compounds in Plant-Based Medicine and Supplement. *J. Adv. Pharm. Technol. Res.* 12(1). 1-7 [in English].
5. Geladi P., Martens H., Hadjiiski L., Hopke P. (1996) A Calibration Tutorial for Spectral Data. Part 2. Partial Least Squares Regression Using Matlab and Some Neural Network Results. *J. Near Infrared Spectrosc.* 4. 243-255 [in English].
6. Kokalj M., Strgulc Krajšek S., Omahen Bratuša J., Kreft S. (2010) Comparison and Improvement of Commonly Applied Statistical Approaches for Identification of Plant Species from IR Spectra. *J. Chemom.* 24. 611-616 [in English].
7. Guille D., Cabo N. (1997) Infrared Spectroscopy in the Study of Edible Oils and Fats. *J. Sci. Food Agric.* 15. 1-11 [in English].
8. Vlachos N., Skopelitis Y., Psaroudaki M., Konstantinidou V., Chatzilazarou A., Tegou E. (2006) Applications of Fourier Transform-Infrared Spectroscopy to Edible Oils. *Anal. Chim. Acta.* 573-574. 459-465 [in English].
9. Zhang Q., Liu C., Sun Z., Hu X., Shen Q., Wu J. (2012) Authentication of Edible Vegetable Oils Adulterated with Used Frying Oil by Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Food Chem.* 132. 1607-1613 [in English].
10. Liang P., Chen C., Zhao S. (2013) Application of Fourier Transform Infrared Spectroscopy for the Oxidation and Peroxide Value Evaluation in Virgin Walnut Oil. *J. Spectrosc.* 2013. 1-5 [in English].
11. Bendini A., Cerretani L., Di Virgilio F., Belloni P., Bonoli-Carbognin M., Lercker G. (2007) Preliminary evaluation of the application of the FTIR spectroscopy to control the geographic origin and quality of virgin olive oils. *J. Food Qual.* 30. 424-437 [in English].
12. Mahboubifar M., Yousefinejad S., Alizadeh M., Hemmateenejad B. (2016) Prediction of the Acid Value, Peroxide Value and the Percentage of Some Fatty Acids in Edible Oils during Long Heating Time by Chemometrics Analysis of FTIR-ATR Spectra. *J. Iran. Chem. Soc.* 13. 2291-2299 [in English].
13. Wójcicki K., Khmelinskii I., Sikorski M., Sikorska E. Near and Mid (2015) Infrared Spectroscopy and Multivariate Data Analysis in Studies of Oxidation of Edible Oils. *Food Chem.* 187. 416-423 [in English].
14. Osypchuk R., Kuchmenko O. (2024) Otsinka antyoksydantnoho potentsialu vodnykh ekstraktiv iz lystia vynohradu, kvitok robinii, nasinnia bazyliku ta zeren pshenytsi [Assessment of the antioxidant potential of aqueous extracts from grape leaves, robinia flowers, basil seeds and wheat grains.]. *Naukovi zapysky. Biolohichni nauky.* 3. 25-33 [in Ukrainian].
15. Antonenko K., Duma M., Kreicberg V., Kunkulberga D. (2016) The influence of microelements selenium and cooper on the rye malt amylase activity and flour technological properties. *Agronomy Research.* 261-1270 [in English].
16. Amir R., Anjum F. (2011) Application of Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy for the identification of wheat varieties. *J. Food Sci. Technol.* 50(5). 1018-1023 [in English].
17. Daminbek Z. et al. (2025) Study and Identification of Flour Samples by IR Spectra. *ECAMPUZ CAMP3 REPORT.* 1-16 [in English].
18. Zhang Y. et al. (2019) Starch content and physicochemical properties of green wheat. *International Journal of Food Properties.* 22. 1463-1474 [in English].
19. Lončarić P. et al. (2026) FTIR-Based Study of Starch Retrogradation and Protein Secondary Structure in Bread. *Foods.* 15(3). 1-23 [in English].
20. Silverstein R.M. et al. (2014) Spectrometric Identification of Organic Compounds. *John Wiley & Sons.* 464 [in English].
21. Stuart B.H. (2004) Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications. *John Wiley & Sons.* 224 [in English].

22. Álvarez et al. (2020) Simple distinction of grapevine (*Vitis vinifera* L.) genotypes by direct ATR-FTIR. *Food Chemistry*. 328. 127164 [in English].
23. Topalá C.M. et al. (2017) FTIR spectra of grapevines (*Vitis vinifera* L.) in the presence of virus infections. *Acta Horticulturae*. 1188. 313–318 [in English].
24. Murru et al. (2019) Artificial Neural Network and Attenuated Total Reflectance-Fourier Transform Infrared Spectroscopy to identify the chemical variables related to ripeness and variety classification of grapes for Protected. Designation of Origin wine production. *Computers and Electronics in Agriculture*. 164. 104922 [in English].
25. Martín-Tornero et al. (2020) Comparative quantification of chlorophyll and polyphenol levels in grapevine leaves sampled from different geographical locations. *Scientific Reports*. 10. 1-13 [in English].
26. Fedenko V.S. (2025) Spectral characteristics of flavonoids of *Robinia pseudoacacia* L. and *Robinia hispida* L. flowers. *J. of Chemistry & Chemical Technology*. 33(3). 602-610 [in English].
27. Tyśkiewicz K. (2019) Characterization of bioactive compounds in the biomass of black locust, poplar and willow. *Trees*. 33. 1235-1263 [in English].
28. Nazir S. (2021) Functional characterization of basil (*Ocimum basilicum* L.) seed mucilage. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*. 25. 100261 [in English].
-
-

Osypchuk R.

PhD student, Department of Biology
Nizhyn Mykola Gogol State University
ruslan0399os@gmail.com
orcid.org/0009-0007-2193-0839

Kuchmenko O.

Doctor of Biological Sciences, Professor,
Head of the Biology Department of
Nizhyn Mykola Gogol State University
kuchmenko1978@gmail.com
orcid.org/0000-0002-3021-8583

Melnychuk O.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Information Technologies,
Physical, Mathematical, and Economic Sciences
Nizhyn Mykola Gogol State University
melnychuk.ov@ndu.edu.ua
orcid.org/0000-0002-6768-8765

APPLICATION OF THE INFRARED SPECTROSCOPY METHOD FOR ASSESSING THE BIOCHEMICAL COMPOSITION OF GRAPE LEAVES, ROBINIA FLOWERS, BASIL SEEDS, AND WHEAT GRAINS

Infrared spectroscopy is a method of qualitative and quantitative analysis. The essence of this method lies in the study of absorption and transmission spectra of electromagnetic radiation in the infrared region.

The use of infrared spectroscopy for plant analysis is not new. Numerous successful studies have been conducted to determine the geographical origin of plant raw materials, detect adulteration, and address other related issues. In our study, we performed infrared spectroscopy of dried plant materials, namely wheat grains, grape leaves, Robinia flowers, and basil seeds. These plants are widely used in the cosmetic, pharmaceutical, and food industries.

It was established that the IR spectrum of dry wheat grains indicates the presence of high levels of starch, proteins, water, and lipids. The analysis of the IR spectrum of the dried aqueous extract demonstrates higher levels of proteins and polysaccharides. In contrast, a lower starch content is observed, which may be associated with its poor solubility in water.

The IR spectrum of dry grape leaves demonstrates a potentially high content of phenolic compounds, cellulose, pectin, proteins, polyphenols, and polysaccharides. The presence of lipids was also likely detected. In contrast, the IR spectrum of the dried aqueous extract indicates the presence of a lower amount of lipids and a significantly higher level of polyphenols.

The analysis of the IR spectrum of dried Robinia flowers revealed the presence of high levels of phenolic compounds and flavonoids. However, the IR spectrum of the dried aqueous extract demonstrates a significantly higher concentration of polyphenols and flavonoids.

The IR spectrum of dry basil seeds demonstrates high levels of polysaccharides, lipids, and proteins. In contrast, the IR spectrum of the dried aqueous extract indicates significantly higher levels of polysaccharides and proteins, along with a substantial decrease in lipid content, which may be associated with the hydrophobic nature of fats.

The obtained results demonstrate the high effectiveness of using IR spectroscopy for the study of plant raw materials. These findings may be applied in further research on plant biochemistry and plant extracts.

Keywords: spectrum, IR spectroscopy, extracts, dried plant material, proteins, lipids, carbohydrates, flavonoids, polyphenols.

*Стаття до редакції надійшла 09.04.2026 року
Рецензія на статтю надійшла 28.04.2026 року*

УДК 618.3-06:616.391:577.161.2
DOI 10.31654/2786-8478-2026-BN-2-93-101

Якимчук Д. С.

аспірантка кафедри біології
Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя
darynakozlova2023@gmail.com
orcid.org/0009-0009-6084-3601

ВІТАМІН D ЯК МОДУЛЯТОР ГІПЕРПРОДУКЦІЇ ГЕПСИДИНУ ТА ЙОГО РОЛЬ У ФОРМУВАННІ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ЗАЛІЗОДЕФІЦИТУ У ВАГІТНИХ ЖІНОК

Залізодефіцитна анемія та недостатній рівень вітаміну D є поширеними мікронутрієнтними порушеннями під час вагітності. Вітамін D через рецептор VDR пригнічує ген HAMP, що кодує гепсидин – ключовий регулятор гомеостазу заліза. Гіперпродукція гепсидину при запаленні спричиняє функціональний залізодефіцит: залізо секвеструється в тканинних депо (феритин підвищений), ненасичена залізо зв'язувальна здатність сироватки (H333) знижується, залізо недоступне для еритропоезу. В дослідженні взяли участь 62 вагітні жінки (9–25 тижднів гестації) віком 20–44 роки: група з недостатнім рівнем вітаміну D ($25(\text{OH})\text{D} < 20$ нг/мл, $n = 34$) та група з достатнім рівнем ($25(\text{OH})\text{D} > 30$ нг/мл, $n = 28$), та 23 невагітні жінки-волонтери відповідного віку. Визначали рівні гепсидину (IFA, FineTest), заліза (колориметрія), феритину, H333 та C-реактивного білка (СРБ) (імунотурбідиметрія, Cobas Pure, Roche), а також гематологічні показники. У загальній вибірці статистично значущих відмінностей між групами не виявлено. Однак у підгрупах з гіперпродукцією гепсидину (підгрупа 2) рівень гепсидину був вдвічі нижчим при достатньому вітаміні D (1583 ± 233 пг/мл проти 3369 ± 439 пг/мл, $U = 3$, $p \leq 0,01$). У цих підгрупах виявлено підвищений феритин (88,8 та 169,8 мкг/л) та знижену H333 (27,3 та 28,1 мкмоль/л), що відповідає картині функціонального залізодефіциту. Рівень гемоглобіну у підгрупі з недостатнім вітаміном D мав тенденцію до нижчих значень ($119,8 \pm 3,9$ г/л проти $125,2 \pm 4,9$ г/л). Вітамін D може виступати специфічним модулятором гіперпродукції гепсидину у вагітних, що особливо актуально в умовах запалення. Отримані результати відкривають перспективи для розробки диференційованих підходів до профілактики анемії у вагітних – зокрема, включення моніторингу рівнів вітаміну D та гепсидину до стандартного обстеження жінок із запальним статусом під час гестації.

Ключові слова: вітамін D, вагітність, гепсидин, анемія, феритин, H333, функціональний залізодефіцит, гематологічні показники.

Вступ. Залізодефіцитна анемія (ЗДА) та недостатній рівень вітаміну D належать до найпоширеніших мікронутрієнтних порушень у вагітних жінок і несуть серйозні ризики для здоров'я матері та плода [1, 2]. Під час вагітності фізіологічна потреба в залізі та вітаміні D різко зростає у зв'язку з розвитком плода, формуванням плаценти та підтримкою материнського кровотворення. Залізо необхідне для синтезу гемоглобіну, міоглобіну та численних ферментів; дефіцит заліза призводить до порушення еритропоезу та, як наслідок, до анемії [3].

Гепсидин – 25-амінокислотний пептид, що синтезується гепатоцитами, – є ключовим регулятором системного гомеостазу заліза [4]. Він зв'язується з феропортином на поверхні еритроцитів, макрофагів та гепатоцитів, спричиняючи його деградацію та блокуючи вихід заліза з клітин у кровообіг. Продукція гепсидину зростає при перевантаженні залізом та запаленні (через ІЛ-6) і знижується при дефіциті заліза, гіпоксії та анемії [4]. Надмірна продукція гепсидину при запаленні призводить до

функціонального дефіциту заліза – стану, при якому запаси заліза в депо збережені (феритин підвищений або нормальний), але залізо недоступне для еритроїдних клітин-попередниць [5]. Діагностичними маркерами цього стану є підвищений феритин у поєднанні зі зниженою НЗЗЗ.

Вітамін D, окрім класичних функцій у регуляції кальцій-фосфорного обміну, пригнічує транскрипцію гена *HAMP*, що кодує гепсидин, через рецептор VDR у гепатоцитах та моноцитах [6]. Одноразове введення фармакологічних доз вітаміну D здоровим добровольцям знижувало рівень гепсидину на ~34% упродовж 24 годин [6]. Крім того, вітамін D підтримує еритропоез, стимулюючи проліферацію еритроїдних клітин-попередниць та посилюючи їх чутливість до еритропоетину [7]. Попри теоретичне обґрунтування, клінічні дані у вагітних є суперечливими: дослідження MAVIDOS не виявило впливу стандартних доз на рівень гепсидину [8], тоді як при активному запаленні (ЗЗК у дітей) короточасний прийом високих доз знижував гепсидин на 81% і одночасно зменшував СРБ [9].

У попередньо опублікованому дослідженні авторів [12] на вибірці 62 вагітних жінок та 23 волонтерів (серпень–вересень 2024 року) встановлено, що у підгрупах з гіперпродукцією гепсидину рівень цього гормону був вдвічі нижчим при достатньому вітаміні D порівняно з недостатнім рівнем (1583 ± 233 проти 3369 ± 439 пг/мл, $p \leq 0,01$), тоді як у загальних групах значущих відмінностей не виявлено. Дане дослідження є безпосереднім продовженням роботи Якимчук Д. С. та Кучменко О. Б. «Рівні гепсидину у вагітних жінок в залежності від статусу вітаміну D» [12] та спрямоване на з'ясування клінічного значення виявленого зв'язку через аналіз маркерів метаболізму заліза – феритину, НЗЗЗ, СРБ – та гематологічних показників.

Мета роботи. Оцінити зв'язок між статусом вітаміну D (25(OH)D), рівнем гепсидину, феритином, ненасиченою залізовв'язувальною здатністю сироватки (НЗЗЗ), С-реактивним білком та гематологічними показниками у вагітних жінок, зокрема в підгрупах із гіперпродукцією гепсидину, з метою з'ясування ролі вітаміну D у формуванні функціонального залізодефіциту та анемії під час вагітності.

Методи та організація дослідження. З липня по вересень 2024 року було досліджено біологічний матеріал (сироватка крові та ЕДТА-кров), відібраний у 62 вагітних жінок (з 9 по 25 тиждень вагітності) віком 20–44 роки, які перебували на обліку в спеціалізованій жіночій консультації комунального некомерційного підприємства «Перинатальний центр м. Києва». Також була досліджена група волонтерів – 23 невагітні жінки відповідного віку (середній вік $30,6 \pm 1,1$ роки). Вагітні жінки були поділені на 2 групи за рівнем 25(OH)D у сироватці крові, як наведено в табл. 1. При проведенні статистичної обробки даних в кожній групі були виявлені зразки зі значно вищими показниками рівнів гепсидину (визначались як значення, що перевищують медіану відповідної групи більш ніж у 5 разів) порівняно з більшістю отриманих вимірів; ці дані було виключено із основної групи (підгрупа 1) та на їх основі сформовано підгрупу виключення (підгрупа 2).

Таблиця 1

Розподіл вагітних жінок у досліджуваних групах

Дані	Досліджувані групи вагітних	
	Недостатній рівень вітаміну D (< 20 нг/мл)	Достатній рівень вітаміну D (> 30 нг/мл)
Вік, роки	$30,8 \pm 1,0$	$32,6 \pm 1,2$
Кількість, n	34	28
Термін вагітності, тиждень	$14,0 \pm 0,6$	$12,8 \pm 0,7$
25(OH)D, нг/мл	$16,2 \pm 0,5$	$35,7 \pm 0,8$

Рівні 25(OH)D визначали методом ІФА (Monobind, США; рідер Sinowa ER 500). Концентрацію гепсидину визначали за допомогою набору FineTest Human Hepcidin (Китай) методом ІФА з попереднім розведенням зразків 1:20. Оскільки виробник не зазначає референтних значень, для внутрішньолабораторної верифікації використовували групу волонтерів як внутрішній контроль; медіана гепсидину у волонтерів склала 244 (діапазон 26–458) пг/мл. Залізо визначали колориметричним методом (Спайнлаб, Україна; аналізатор BTS-350). Феритин, НЗЗЗ та СРБ визначали із використанням реагентів Roche Diagnostics на автоматичному біохімічному аналізаторі Cobas Pure (Roche Diagnostics, Швейцарія). Клінічний аналіз крові виконували на гематологічному аналізаторі Abacus 3СТ (Угорщина).

В дослідження не включались вагітні з перенесеними інфекційними захворюваннями, такими як ВІЛ, сифіліс, інфекційні гепатити В і С, та зразки з ознаками гемолізу та/або хільозу.

Роботу виконано у відповідності до біоетичних норм з дотриманням відповідних принципів Гельсінської декларації прав людини, Конвенції Ради Європи про права людини і біомедицини та відповідних законів України [16, 17].

Статистичну обробку та аналіз результатів дослідження проводилися з використанням пакету програм Microsoft 365. Для порівняння непараметричних незалежних груп визначали середнє арифметичне (M) та помилку середньої (m) на рівні довірчої ймовірності $P > 0,95$ (або $p < 0,05$) за U-критерієм Манна-Уїтні. З огляду на малий розмір підгруп виключення ($n = 6$), їхні результати розглядаються як пілотні та потребують підтвердження на більшій вибірці.

Результати досліджень та їх обговорення. Попередній аналіз забезпеченості вітаміном D серед 608 вагітних жінок м. Києва (2022–2023) виявив високу поширеність його недостатнього рівня: у 59% жінок у I триместрі та у 68% – у II триместрі рівень 25(OH)D був нижче 20 нг/мл [11]. Встановлено виражені сезонні коливання: у лютому гіповітаміноз D фіксувався у 50–85% вагітних залежно від вікової групи, тоді як у серпні – лише у 15–19%. Виявлено також вікову залежність: молодші вагітні (18–24 роки) демонстрували найгірший статус вітаміну D протягом усього року [11]. На наступному етапі дослідження 142 вагітних жінок (I триместр, квітень–травень 2024) встановлено, що недостатній рівень вітаміну D (< 10 нг/мл) асоціюється з нижчими рівнями гемоглобіну (119,7 г/л), еритроцитів та гематокриту порівняно з групою достатнього рівня (> 30 нг/мл; гемоглобін 129,1 г/л) [10]. При концентраціях вітаміну D від 10 до 30 нг/мл суттєвих коливань гематологічних параметрів не спостерігалось. Ці результати підтвердили клінічну значущість саме крайніх градацій статусу вітаміну D та обумовили формування двох полярних груп (< 20 нг/мл та > 30 нг/мл) для подальшого дослідження. З метою виключення впливу сезонних коливань інсоляції на рівень вітаміну D відбір зразків проводився цілеспрямовано в період максимальної сонячної активності – липень–вересень 2024 року, а результати дослідження гепсидину та заліза в цій вибірці опубліковано раніше [12].

Аналіз літературних даних демонструє значну варіабельність впливу вітаміну D на гепсидин залежно від стану пацієнтів та дозування. Дослідження MAVIDOS показало, що щоденний прийом 1000 МО вітаміну D3 не впливає на рівень гепсидину, феритину або маркерів запалення у вагітних жінок [8]. Проте в когортах жінок Південної Азії з високим рівнем ІЛ-6 спостерігався позитивний зв'язок між вітаміном D та гепсидином [10]. У дітей із запальними захворюваннями кишечника короткочасний прийом 4000 МО/добу знизив гепсидин на 81% та СРБ [9]. У дітей з ожирінням зв'язку між вітаміном D та гепсидином не виявлено [14]. Анемія у недоношених дітей пов'язана з високим рівнем гепсидину та позитивно корелює з феритином, але не з рівнем 25(OH)D [15].

Таблиця 2
Рівні гепсидину, заліза, феритину, НЗЗЗ, СРБ та гематологічних показників у вагітних жінок у досліджуваних групах з даними виключення

Дані	Досліджувані групи вагітних з даними виключення				Волонтери з даними виключення		p (між підгрупами 2)
	Недостатній рівень вітаміну D (< 20 нг/мл)		Достатній рівень вітаміну D (> 30 нг/мл)		Підгрупа 1	Підгрупа 2	
	Підгрупа 1	Підгрупа 2	Підгрупа 1	Підгрупа 2			
Вік, роки	30,5 ± 1,1	32,7 ± 1,9	31,6 ± 1,4	36,2 ± 1,8	30,1 ± 1,1	33,3 ± 3,0	> 0,05
Кількість, n	28	6	22	6	19	4	—
Термін вагіт., тижні	14,3 ± 0,7	13,0 ± 0,8	13,4 ± 0,8	10,3 ± 0,6	—	—	—
25(OH)D, нг/мл	16,2 ± 0,6	16,3 ± 1,0	35,4 ± 0,9	37,1 ± 1,6	*	*	< 0,01
Гепсидин, пг/мл	257 ± 25,5	3369 ± 439	226 ± 18,9	1583 ± 233	257 ± 28,1	3198 ± 936	< 0,05
Мін гепсидину	2	1738	24	836	26	1218	—
Мах гепсидину	626	5000	436	2356	458	5668	—
Залізо, мкмоль/л	23,1 ± 1,6	32,2 ± 2,4	22,1 ± 1,3	24,2 ± 2,7	16,0 ± 1,6	29,8 ± 9,5	0,08
Феритин, мкг/л	44,1 ± 10,6	88,8 ± 11,4	58,9 ± 9,8	169,8 ± 40,0	46,6	107,0 ± 46,8	0,06
НЗЗЗ, мкмоль/л	38,8 ± 2,7	27,3 ± 4,2	37,5 ± 2,5	28,1 ± 4,1	41,0	25,4 ± 12,8	> 0,05
СРБ, мг/л	1,7 ± 0,3	1,8 ± 0,3	3,5 ± 0,8	3,3 ± 1,8	0,8	1,8 ± 0,8	> 0,05
Гемоглобін, г/л	122,7 ± 2,0	119,8 ± 3,9	124,9 ± 1,9	125,2 ± 4,9	126,8 ± 2,8	125,2 ± 0,9	> 0,05
Еритроцити, ×10 ¹² /л	4,0 ± 0,1	3,9 ± 0,1	4,1 ± 0,1	4,0 ± 0,3	4,3 ± 0,1	4,1 ± 0,1	> 0,05
МСН, пг	30,7 ± 0,4	30,8 ± 0,4	30,7 ± 0,3	31,8 ± 1,4	29,0 ± 0,5	29,8 ± 0,7	> 0,05
МСV, фл	88,5 ± 0,9	89,1 ± 1,1	88,5 ± 0,9	92,5 ± 2,7	87,6 ± 1,2	92,0 ± 2,1	> 0,05
Тромбоцити, ×10 ⁹ /л	218 ± 7	203,5 ± 9,3	230 ± 9	274,2 ± 12,8	265 ± 16	214,5 ± 28,4	< 0,05

* – дослідження рівня вітаміну D не проводилось.

У загальній вибірці вагітних жінок між групами з недостатнім та достатнім рівнем вітаміну D не виявлено статистично значущих відмінностей за жодним із досліджуваних показників: рівнями гепсидину, заліза, НЗЗЗ, феритину, СРБ та гематологічними параметрами (p > 0,05 для всіх порівнянь). Рівні гепсидину демонструють значну індивідуальну варіабельність в обох групах при схожих медіанних значеннях

(~214 та ~202 пг/мл відповідно). Аналогічні медіанні рівні гепсидину спостерігаються у волонтерів (244 пг/мл), що підтверджує адекватність внутрішнього контролю для цієї тест-системи. Рівні феритину (44–59 мкг/л) та НЗЗЗ (~38 мкмоль/л) у загальних групах вагітних відповідали значенням, характерним для нормального або помірно-зниженого депо заліза без ознак вираженого залізодефіциту. Рівні СРБ залишались невисокими в обох групах (1,7 та 3,5 мг/л), що вказує на відсутність активного запального процесу у більшості обстежених.

При ідентифікації зразків зі значно підвищеними рівнями гепсидину (> 5-кратне перевищення медіани групи) у кожній групі виділено підгрупи з гіперпродукцією гепсидину: підгрупа 2 групи з недостатнім рівнем вітаміну D (6 вагітних), підгрупа 2 групи з достатнім рівнем вітаміну D (6 вагітних), підгрупа 2 групи волонтерів (4 особи). Ці підгрупи характеризуються принципово іншим біохімічним профілем порівняно з основними групами – підгрупою 1 (табл. 2).

Рівень гепсидину в підгрупі 2 групи з достатнім рівнем вітаміну D був статистично значущо вдвічі нижчим, ніж у підгрупі 2 групи з недостатнім рівнем вітаміну D – 1583 ± 233 пг/мл проти 3369 ± 439 пг/мл ($p < 0,05$). Важливо підкреслити, що підгрупа 2 групи волонтерів демонструвала рівні гепсидину, близькі до підгрупи 2 групи з недостатнім рівнем вітаміну D (3199 ± 937 пг/мл), хоча у волонтерів відсутні дані про рівень вітаміну D.

Принципово важливим є біохімічний профіль підгруп виключення. Феритин у обох підгрупах 2 значно вищий, ніж у загальних групах (підгрупах 1) вагітних (88,8 та 169,8 мкг/л проти 44,1 та 58,9 мкг/л відповідно). Водночас НЗЗЗ у підгрупах 2 знижена (27,3–28,1 мкмоль/л проти 37–39 мкмоль/л в підгрупах 1). Така комбінація – підвищений феритин при зниженій НЗЗЗ – є діагностичною ознакою функціонального залізодефіциту або «перерозподілу заліза» при запаленні [5, 13]. Гепсидин блокує феропортин, залізо утримується в макрофагах та гепатоцитах (звідси підвищений феритин), але не надходить до плазми у формі, доступній для еритроїдного кісткового мозку (звідси знижена НЗЗЗ).

Попри відсутність статистично значущих відмінностей у рівнях СРБ між підгрупами 2, показово, що значення СРБ у підгрупі 2 групи з достатнім рівнем вітаміну D ($3,3 \pm 1,8$ мг/л) мають тенденцію до вищих, ніж у підгрупі 2 групи з недостатнім рівнем ($1,8 \pm 0,3$ мг/л). Це може частково пояснювати феномен вищого гепсидину в підгрупі 2 групи з недостатнім рівнем вітаміну D: навіть помірний запальний стимул реалізується у значно вищу продукцію гепсидину, тоді як достатній рівень вітаміну D пом'якшує цю відповідь.

Рівні гемоглобіну в підгрупі 2 групи з недостатнім рівнем вітаміну D ($119,8 \pm 3,9$ г/л) нижчі, ніж у підгрупі 2 групи з достатнім рівнем ($125,2 \pm 4,9$ г/л) та підгрупі 2 волонтерів ($125,2 \pm 0,9$ г/л), хоча ця різниця не досягає статистичної значущості ($p > 0,05$), що зумовлено малим розміром підгруп.

Отримані дані дозволяють сформулювати концептуальну модель ролі вітаміну D у захисті від анемії у вагітних. В умовах запального процесу або інших станів, що активують синтез ІЛ-6, гепатоцити різко збільшують продукцію гепсидину [4, 13]. У вагітних з достатнім рівнем вітаміну D цей процес частково гальмується через VDR-опосередковану репресію гена *HAMP* [6]. Наслідком є нижча концентрація гепсидину та менш виражене блокування феропортину, що дозволяє зберегти постачання заліза до еритроїдних клітин-попередниць. У вагітних із недостатнім рівнем вітаміну D цей захисний механізм ослаблений, рівень гепсидину досягає значно вищих значень, феропортин активніше деградує, залізо секвеструється в тканинних депо (підвищений феритин) та не надходить до плазми (знижена НЗЗЗ), що проявляється тенденцією до нижчого гемоглобіну.

Ця модель відповідає даним Vacchetta et al. (2014), які виявили, що вітамін D у фармакологічних дозах знижує рівень гепсидину у здорових добровольців на ~34% [6], та Moran-Lev et al. (2019), які продемонстрували зниження гепсидину на 81% у

дітей із активним кишковим запаленням після прийому вітаміну D [9]. Ключовою умовою ефективності є наявність підвищеного рівня гепсидину – саме тому в нашому дослідженні значущий ефект спостерігається лише в підгрупах із гіперпродукцією, а не в загальній вибірці із нормальними рівнями гепсидину.

Відсутність відмінностей у загальних групах узгоджується з даними дослідження MAVIDOS (Braithwaite et al., 2019), де стандартна доза вітаміну D₃ (1000 МО/добу) не впливала на рівні гепсидину у вагітних без ознак системного запалення [8]. Це підтверджує, що захисна дія вітаміну D щодо гепсидину є специфічно запалення-залежною і не проявляється при фізіологічно низьких рівнях гепсидину, характерних для нормального перебігу вагітності.

Виявлені зміни профілю феритину та H333 у підгрупах виключення узгоджуються з концепцією анемії запалення [13] та даними огляду Vardan et al. (2024), який підкреслює центральну роль гепсидину як медіатора між запаленням та залізодефіцитним еритропоезом [3]. Підвищений феритин при зниженій H333 у підгрупах із гіперпродукцією гепсидину є саме тим профілем, який відрізняє функціональний дефіцит заліза від справжньої ЗДА (де феритин знижений, а H333 підвищена) [5].

Таким чином, наше дослідження демонструє можливу специфічну роль вітаміну D як модулятора гіперпродукції гепсидину у вагітних жінок на тлі функціонального залізодефіциту. Ці дані мають потенційне клінічне значення: скринінг на недостатній рівень вітаміну D може бути особливо важливим у вагітних жінок із ознаками запалення або підвищеним рівнем гепсидину.

Обмеження дослідження. 1. Малий розмір підгруп (n = 6) обмежує статистичну потужність; результати для підгруп слід розглядати як пілотні. 2. Жінки з рівнем 25(OH)D 20–30 нг/мл виключені з основного аналізу, що може впливати на репрезентативність. 3. Дослідження проводилось лише у літньо-осінній період (липень–вересень 2024), коли рівні вітаміну D є вищими. 4. Відсутність даних щодо рівнів ІЛ-6 та sTfR не дозволяє остаточно підтвердити запальну природу гіперпродукції гепсидину в підгрупах виключення. 5. Широкий діапазон термінів гестації (9–25 тижнів) без стратифікації по триместрах може маскувати частину ефектів.

Висновки. 1. У загальній вибірці вагітних жінок (9–25 тижнів гестації) відсутні статистично значущі відмінності між групами з недостатнім та достатнім рівнем вітаміну D за показниками гепсидину, заліза, H333, феритину, СРБ та гематологічними параметрами, що відображає фізіологічну супресію гепсидину при нормальному перебігу вагітності.

2. У підгрупах із гіперпродукцією гепсидину виявлено статистично значуще дворазове зниження рівня гепсидину при достатньому рівні вітаміну D порівняно з недостатнім (1583 ± 233 проти 3369 ± 439 пг/мл; $U = 3$, $p \leq 0,01$), що свідчить про специфічну роль вітаміну D як супресора патологічної гіперпродукції гепсидину.

3. Підгрупи з гіперпродукцією гепсидину характеризуються підвищеним феритином ($88\text{--}170$ мкг/л проти $44\text{--}59$ мкг/л у загальних групах) та зниженою H333 ($27\text{--}28$ проти 38 мкмоль/л), що відповідає картині функціонального залізодефіциту та перерозподілу заліза при запаленні незалежно від статусу вітаміну D.

4. Тенденція до нижчого гемоглобіну в підгрупі з недостатнім рівнем вітаміну D та гіперпродукцією гепсидину ($119,8 \pm 3,9$ г/л) порівняно з підгрупою достатнього рівня вітаміну D ($125,2 \pm 4,9$ г/л) вказує на клінічну значущість виявленого зв'язку для формування анемії.

5. Захисний ефект вітаміну D щодо обміну заліза реалізується специфічно в умовах запальної або іншої стимуляції гепсидину і не проявляється при фізіологічно низьких його рівнях, характерних для більшості вагітних.

6. Результати дослідження мають пілотний характер і потребують підтвердження на більшій вибірці з обов'язковим включенням маркера запалення (ІЛ-6) та показника функціонального залізодефіциту (sTfR).

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на верифікацію виявлених закономірностей на більших когортах вагітних жінок із обов'язковим включенням маркерів запалення (ІЛ-6), показника функціонального залізодефіциту (sTfR) та стратифікацією за триместрами вагітності. Перспективним є також вивчення впливу суплементації вітаміном D у жінок із підвищеним рівнем гепсидину на показники еритропоезу та ризик розвитку анемії під час вагітності.

Список використаних джерел

1. Alpakra, M., Hamed, N. F., Alfaki, A., & AlKabbani, D. M. Z. The Correlation Between Vitamin D Deficiency and Anemia: A Systematic Review. *Cureus*. 2025. 17(8). e89428. <https://doi.org/10.7759/cureus.89428>.
2. Rosson, S., & Pavord, S. Understanding hepcidin for iron management in pregnancy. *Transfusion Medicine*. 2025. 35(2). 109–115. <https://doi.org/10.1111/tme.13125>.
3. Bardan, C. R., Ionita, I., Iordache, M., et al. Hepcidin as the Central Regulator in Pregnancy-Associated Iron Deficiency Anemia and Vitamin D Deficiency. *Timisoara Medical Journal*. 2024. 2024(2). 28. <https://tmj.jams.pub/article/2024/2/296>.
4. Chambers, K., Ashraf, M. A., & Sharma, S. Physiology, Hepcidin. In *StatPearls*. StatPearls Publishing. 2023. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30855845/>.
5. Weiss, G., Ganz, T., & Goodnough, L. T. Anemia of inflammation. *Blood*. 2019. 133(1). 40–50. <https://doi.org/10.1182/blood-2018-06-856500>.
6. Bacchetta, J., Zaritsky, J. J., Sea, J. L., et al. Suppression of Iron-Regulatory Hepcidin by Vitamin D. *Journal of the American Society of Nephrology*. 2014. 25(3). 564–572. <https://doi.org/10.1681/ASN.2013040355>.
7. Thomas, C. E., Guillet, R., Queenan, R. A., et al. Vitamin D status is inversely associated with anemia and serum erythropoietin during pregnancy. *American Journal of Clinical Nutrition*. 2015. 102(5). 1088–1095. <https://doi.org/10.3945/ajcn.115.114611>.
8. Braithwaite, V. S., Crozier, S. R., D'Angelo, S., et al. The Effect of Vitamin D Supplementation on Hepcidin, Iron Status, and Inflammation in Pregnant Women in the United Kingdom. *Nutrients*. 2019. 11(1). 190. <https://doi.org/10.3390/nu11010190>.
9. Moran-Lev, H., Galai, T., Yerushalmy-Feler, A., et al. Vitamin D Decreases Hepcidin and Inflammatory Markers in Newly Diagnosed Inflammatory Bowel Disease Paediatric Patients. *Journal of Crohn's & Colitis*. 2019. 13(10). 1287–1291. <https://doi.org/10.1093/ecco-jcc/jjz056>.
10. Greenwood, A., von Hurst, P. R., Beck, K. L., et al. Relationship between vitamin D, iron, and hepcidin in premenopausal females, potentially confounded by ethnicity. *European Journal of Nutrition*. 2023. 62(8). 3361–3368. <https://doi.org/10.1007/s00394-023-03240-7>.
11. Козлова, Д. С., Кучменко, О. Б., & Мхітарян, Л. С. Динаміка вмісту вітаміну D під час вагітності в залежності від віку жінки. *Наукові записки. Біологічні науки (Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя)*. 2023. (1). 69–80. <https://doi.org/10.31654/2786-8478-2023-BN-1-69-80>.
12. Якимчук, Д. С., & Кучменко, О. Б. Рівні гепсидину у вагітних жінок в залежності від статусу вітаміну D. *Наукові записки. Біологічні науки (Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя)*. 2025. [опублікована стаття].
13. Nemeth, E., Rivera, S., Gabayan, V., et al. IL-6 mediates hypoferrremia of inflammation by inducing the synthesis of the iron regulatory hormone hepcidin. *Journal of Clinical Investigation*. 2004. 113(9). 1271–1276. <https://doi.org/10.1172/JCI200420945>.
14. Aka, S., Kilercik, M., Arapoglu, M., & Semiz, S. The Hepcidin and 25-OH-Vitamin D Levels in Obese Children as a Potential Mediator of the Iron Status. *Clinical Laboratory*. 2021. 67(5). <https://doi.org/10.7754/Clin.Lab.2020.200813>.
15. Koren, Y., Lubetzky, R., Mandel, D., et al. Anemia, Hepcidin, and Vitamin D in Healthy Preterm Infants: A Pilot Study. *American Journal of Perinatology*. 2023. 40(5). 508–512. <https://doi.org/10.1055/s-0041-1729556>.
16. Declaration of Helsinki of the World Medical Association «Ethical principles of medical research with the participation of a person as an object of research». 2008. Document 990_005. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/990_005.
17. General Declaration on Bioethics and Human Rights. UNESCO. 2005. <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001461/146180r.pdf>.

References

1. Alpakra, M., Hamed, N. F., Alfaki, A., & AlKabbani, D. M. Z. (2025). The Correlation Between Vitamin D Deficiency and Anemia: A Systematic Review. *Cureus*, 17(8), e89428. <https://doi.org/10.7759/cureus.89428>. [in English].
2. Rosson, S., & Pavord, S. (2025). Understanding hepcidin for iron management in pregnancy. *Transfusion Medicine*, 35(2), 109–115. <https://doi.org/10.1111/tme.13125>. [in English].
3. Bardan, C. R., Ionita, I., Iordache, M., et al. (2024). Hepcidin as the Central Regulator in Pregnancy-Associated Iron Deficiency Anemia and Vitamin D Deficiency. *Timisoara Medical Journal*, 2024(2), 28. <https://tmj.jams.pub/article/2024/2/296>. [in English].
4. Chambers, K., Ashraf, M. A., & Sharma, S. (2023). Physiology, Hepcidin. In *StatPearls*. StatPearls Publishing. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30855845/>. [in English].
5. Weiss, G., Ganz, T., & Goodnough, L. T. (2019). Anemia of inflammation. *Blood*, 133(1), 40–50. <https://doi.org/10.1182/blood-2018-06-856500>. [in English].
6. Bacchetta, J., Zaritsky, J. J., Sea, J. L., et al. (2014). Suppression of Iron-Regulatory Hepcidin by Vitamin D. *Journal of the American Society of Nephrology*, 25(3), 564–572. <https://doi.org/10.1681/ASN.2013040355>. [in English].
7. Thomas, C. E., Guillet, R., Queenan, R. A., et al. (2015). Vitamin D status is inversely associated with anemia and serum erythropoietin during pregnancy. *American Journal of Clinical Nutrition*, 102(5), 1088–1095. <https://doi.org/10.3945/ajcn.115.114611>. [in English].
8. Braithwaite, V. S., Crozier, S. R., D'Angelo, S., et al. (2019). The Effect of Vitamin D Supplementation on Hepcidin, Iron Status, and Inflammation in Pregnant Women in the United Kingdom. *Nutrients*, 11(1), 190. <https://doi.org/10.3390/nu11010190>. [in English].
9. Moran-Lev, H., Galai, T., Yerushalmy-Feler, A., et al. (2019). Vitamin D Decreases Hepcidin and Inflammatory Markers in Newly Diagnosed Inflammatory Bowel Disease Paediatric Patients. *Journal of Crohn's & Colitis*, 13(10), 1287–1291. <https://doi.org/10.1093/ecco-jcc/jjz056>. [in English].
10. Greenwood, A., von Hurst, P. R., Beck, K. L., et al. (2023). Relationship between vitamin D, iron, and hepcidin in premenopausal females, potentially confounded by ethnicity. *European Journal of Nutrition*, 62(8), 3361–3368. <https://doi.org/10.1007/s00394-023-03240-7>. [in English].
11. Kozlova, D. S., Kuchmenko, O. B., & Mkhitarian, L. S. (2023). Dynamika vmistu vitaminu D pid chas vahitnosti v zalezhnosti vid viku zhinky [Dynamics of vitamin D content during pregnancy depending on the age of the woman]. *Naukovi zapysky. Biolohichni nauky (Nizhynskiy derzhavnyi universytet imeni Mykoly Hoholia)*, (1), 69–80. <https://doi.org/10.31654/2786-8478-2023-BN-1-69-80>. [in Ukrainian].
12. Yakymchuk, D. S., & Kuchmenko, O. B. (2025). Rivni hepsydynu u vahitnykh zhinok v zalezhnosti vid statusu vitaminu D [Hepcidin levels in pregnant women depending on vitamin D status]. *Naukovi zapysky. Biolohichni nauky (Nizhynskiy derzhavnyi universytet imeni Mykoly Hoholia)*. [in Ukrainian].
13. Nemeth, E., Rivera, S., Gabayan, V., et al. (2004). IL-6 mediates hypoferraemia of inflammation by inducing the synthesis of the iron regulatory hormone hepcidin. *Journal of Clinical Investigation*, 113(9), 1271–1276. <https://doi.org/10.1172/JCI200420945>. [in English].
14. Aka, S., Kilercik, M., Arapoglu, M., & Semiz, S. (2021). The Hepcidin and 25-OH-Vitamin D Levels in Obese Children as a Potential Mediator of the Iron Status. *Clinical Laboratory*, 67(5). <https://doi.org/10.7754/Clin.Lab.2020.200813>. [in English].
15. Koren, Y., Lubetzky, R., Mandel, D., et al. (2023). Anemia, Hepcidin, and Vitamin D in Healthy Preterm Infants: A Pilot Study. *American Journal of Perinatology*, 40(5), 508–512. <https://doi.org/10.1055/s-0041-1729556>. [in English].
16. World Medical Association. (2008). Declaration of Helsinki. Document 990_005. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/990_005.
17. UNESCO. (2005). General Declaration on Bioethics and Human Rights. <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001461/146180r.pdf>.

Yakymchuk D.

PhD student, Department of Biology
Nizhyn Mykola Gogol State University
darynakozlova2023@gmail.com
orcid.org/0009-0009-6084-3601

VITAMIN D AS A MODULATOR OF HEPCIDIN HYPERPRODUCTION AND ITS ROLE IN THE FORMATION OF FUNCTIONAL IRON DEFICIENCY IN PREGNANT WOMEN

*Iron deficiency anemia and vitamin D insufficiency are among the most common micronutrient disorders during pregnancy. Vitamin D, acting through the VDR receptor, suppresses the HAMP gene encoding hepcidin – the master regulator of iron homeostasis. Hepcidin hyperproduction during inflammation causes functional iron deficiency: iron is sequestered in tissue depots (elevated ferritin), unsaturated iron-binding capacity (UIBC) decreases, and iron becomes unavailable for erythropoiesis. 62 pregnant women aged 20–44 years (9–25 weeks of gestation) were divided into two groups: vitamin D insufficiency (25(OH)D < 20 ng/mL, n = 34) and sufficiency (25(OH)D > 30 ng/mL, n = 28), and 23 non-pregnant female volunteers of corresponding age. Hepcidin (ELISA, FineTest), iron (colorimetry), ferritin, UIBC and CRP (immunoturbidimetry, Cobas Pure, Roche), and hematological parameters were measured. No statistically significant differences were found in the main groups. However, in subgroups with hepcidin hyperproduction (subgroup 2), hepcidin was significantly lower in the vitamin D-sufficient group (1583 ± 233 vs. 3369 ± 439 pg/mL, U = 3, p ≤ 0.01). These subgroups showed elevated ferritin (88.8 and 169.8 µg/L) and reduced UIBC (27.3 and 28.1 µmol/L), consistent with functional iron deficiency. Hemoglobin tended to be lower in the vitamin D-insufficient subgroup (119.8 ± 3.9 vs. 125.2 ± 4.9 g/L). Vitamin D may act as a specific modulator of hepcidin hyperproduction in pregnant women, particularly under inflammatory conditions. These findings suggest the need for further prospective studies including IL-6, sTfR and trimester-stratified analysis to clarify the clinical role of vitamin D supplementation in preventing functional iron deficiency and anemia during pregnancy. **Keywords:** vitamin D, pregnancy, hepcidin, anemia, ferritin, UIBC, functional iron deficiency, hematological parameters.*

*Стаття до редакції надійшла 07.04.2026 року
Рецензія на статтю надійшла 21.04.2026 року*

**НОРМАЛЬНА І ПАТОЛОГІЧНА АНАТОМІЯ ТА
ФІЗІОЛОГІЯ ЛЮДИНИ І ТВАРИН**

УДК 612.017.1:616-092.19:612.6

DOI 10.31654/2786-8478-2026-BN-2-102-113

Гончаренко В. В.

аспірант кафедри біології
Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя
incrediblesmaug@gmail.com
orcid.org/0000-0002-0173-2655

Соколенко С. В.

кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри клітинної біології
та методики викладання біологічних дисциплін
Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького
sokolenko@i.ua
orcid.org/0000-0002-7341-1762

ЗНАЧЕННЯ СТАТЕВОГО ФАКТОРА В РЕАЛІЗАЦІЇ НЕЙТРОФІЛЬНО-ЛІМФОЦИТАРНОГО ІНДЕКСУ ТА ІНШИХ ПОКАЗНИКІВ ЛЕЙКОЦИТАРНОЇ ФОРМУЛИ В УМОВАХ СТРЕСОВИХ ФАКТОРІВ СУЧАСНОСТІ

Серед факторів, які можуть впливати на стрес-індуковані зміни імунних реакцій, зокрема, запальні процеси, вказують стать людини. Важливою характеристикою, яка поєднує стрес-реакцію та запальні явища, є нейтрофільно-лімфоцитарний індекс (НЛІ), що демонструє динамічний зв'язок між вродженою та адаптивною клітинною імунною відповіддю і залежить від багатьох факторів. Проте, нейтрофільно-лімфоцитарний індекс не можна розглядати ізольовано від реакції на стрес імунної системи загалом. Компоненти імунної системи діють на виклики різної природи інтегровано. Мета нашого дослідження – проаналізувати значення статевого фактора у реакціях нейтрофільно-лімфоцитарного індексу та інших показників лейкоцитарної формули на стресові виклики сучасності у студентів віком 18-21 років. Оцінку популяцій лейкоцитів провели у 47 студентів. Серед обстежених було 11 осіб чоловічої статі та 36 осіб жіночої. Для студентів жіночої статі аналіз проводили у фолікулярну фазу менструального циклу. Частина обстежених не хворіла попередньо на COVID-19, частина перехворіли за 6-9 місяців до першого обстеження у 2021 році. Повторну оцінку показників у цих же студентів зробили у 2023 році, в період воєнного стану. Встановили, що серед студентів віком 18-21 років жіноча стать, у випадку інфікування COVID-19, більше схильна до загальної мобілізації лейкопоезу, проте, надалі зумовлює нижчу відповідь на наступні стресові чинники. Така мобілізація відобразилася зростанням кількості лімфоцитів та моноцитів саме в осіб цієї когорти в період пандемії. Стресові умови воєнного стану у 2023 році викликали зниження кількості лімфоцитів, не залежно від статі та попереднього захворювання на COVID-19, що підтверджує схильність лімфоцитів до стрес-індукованого апоптозу. Повернення кількості моноцитів у 2023 році в межі норми свідчить про нижчу чутливість цієї ланки клітинного імунітету до стресових чинників і вищу потенційну

прозапальну роль паличкоядерних нейтрофілів. Саме ця популяція лейкоцитів демонструвала підвищену кількість, особливо в осіб жіночої статі, котрі попередньо перехворіли на COVID-19, в період пандемії, а також в обстежених обох статей в період воєнного стану. Це, своєю чергою, на фоні зниження кількості лімфоцитів у 2023 році, призвело до зростання нейтрофільно-лімфоцитарного індексу у всіх обстежених студентів. Прозапальні явища у період пандемії мали більше вираження в осіб жіночої статі, чітко виражені ознаки стресу проявилися в обстежених обох статей.

Ключові слова: стаття, лейкоцити, нейтрофільно-лімфоцитарний індекс, прозапальні фактори, моноцити, еозинофіли, базофіли, емоційний стрес, пандемія COVID-19, воєнний стан.

Вступ. Поняття стресу та факторів, здатних його викликати, істотно трансформувалося й доповнилося протягом останнього часу. Узагальнено можна сказати, що для людини важливими стресорами є різноманітні життєві події, які вимагають психічної та фізичної адаптації, можуть впливати на здоров'я і передбачають відповіді комплексу психофізіологічних реакцій. Реакції на стрес еволюційно сформовані, але нові соціальні виклики здатні виснажувати адаптивний потенціал і ставлять під загрозу добробут певної когорти населення [7; 13; 24].

Однією з ключових мішеней хронічного психологічного стресу є імунна система, вплив на неї може бути прямим та опосередкованим, проте, узагальнено, призводить до модифікації імунної відповіді, однією з типових проявів якої є мобілізація прозапальних явищ [12; 22].

Важливою характеристикою, яка поєднує стрес-реакцію та запальні явища, є такий гематологічний параметр, як нейтрофільно-лімфоцитарний індекс (ІНЛ). Наразі цей показник широко використовують як надійний та легкодоступний маркер імунної відповіді як на інфекційні, так і на неінфекційні подразники. Нейтрофільно-лімфоцитарний індекс демонструє динамічний зв'язок між вродженою та адаптивною клітинною імунною відповіддю і залежить від багатьох факторів, одним з яких вказують наявність стресу. Дані щодо нормального діапазону ІНЛ ще дискутуються, зазвичай вказують інтервал від 1 до 2. Підвищення показника є раннім попередженням про ризик патології, наявність інфекції, латентного запалення та стресу. В період пандемії ІНЛ враховували як один з маркерів прийняття рішень щодо госпіталізації пацієнтів з пневмонією, спричиненою COVID-19. Зростання нейтрофільно-лімфоцитарного індексу асоціюють також зі старінням організму [8; 9; 17; 26; 30].

Проте, нейтрофільно-лімфоцитарний індекс не можна розглядати ізольовано від реакції на стрес імунної системи загалом. Компоненти імунної системи діють на виклики різної природи інтегровано [15; 29]. Численні дослідження демонструють участь у стрес-індукованих прозапальних явищах моноцитів, еозинофілів та базофілів [1; 2; 4; 25; 31].

Крім того, доцільно враховувати наслідки впливу стресу на імунну систему з урахуванням статі. Дані літератури характеризують випадки залежної від статі інтенсивності зумовленого стресом запалення, варіативності кількості продуцентів запальних медіаторів тощо [3; 10; 16; 19; 23; 27].

Враховуючи дані щодо стресового впливу пандемії COVID-19 та факторів війни [14; 18; 20], важливим є аналіз їх наявних на цей час наслідків для населення України на рівні клітинної ланки імунітету.

Мета дослідження: проаналізувати значення статевого фактора у реакціях нейтрофільно-лімфоцитарного індексу та інших показників лейкоцитарної формули на стресові виклики сучасності у студентів віком 18-21 років.

Методи та організація дослідження. Оцінку популяцій лейкоцитів провели у 47 студентів Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького. Серед обстежених було 11 осіб чоловічої статі та 36 осіб жіночої. Для студентів жіночої статі аналіз проводили у фолікулярну фазу менструального циклу.

Серед обстежених чоловічої статі 3 не хворіли попередньо на COVID-19, 8 перехворіли за 6-9 місяців до першого обстеження у 2021 році. Серед обстежених жіночої статі 27 не хворіли на COVID-19, 9, як і у випадку студентів чоловічої статі, мали в анамнезі інфікування SARS-CoV-2 за 6-9 місяців до першого обстеження. Повторну оцінку показників у цих же студентів зробили у 2023 році, в період воєнного стану.

Відбір крові для наступного аналізу здійснювали медичні фахівці Комунального некомерційного підприємства «Черкаська центральна районна лікарня» Червонослобідської сільської ради (відповідно до угоди про співпрацю з Черкаським національним університетом). Всі студенти давали погодження на участь в дослідженнях та оприлюднення отриманих результатів. Схема проведення дослідження була погоджена з Комісією з біоетики ЧНУ.

Як показники норми використали рекомендовані в лабораторії КНП «Черкаська центральна районна лікарня» референтні значення.

Загальну кількість лейкоцитів визначали на біохімічному аналізаторі Diagon D-cell 60 (Diagon Ltd, Угорщина), лейкоцитарну формулу підраховували за мазками крові, фарбованими за Паппенгеймом. Додатково розраховували нейтрофільно-лімфоцитарний індекс (ІНЛ).

Для порівняння окремих вибірок (розділених за роками аналізу, статевим фактором, наявністю в анамнезі COVID-19) після перевірки на нормальність розподілу використали t-критерій Стьюдента. Результати в таблицях подані у вигляді середнього значення та його похибки ($M \pm m$). Враховували три рівні достовірності різниці: $p < 0,05$; $p < 0,01$; $p < 0,001$.

Результати досліджень та їх обговорення. Встановлено, що достовірна різниця між загальною кількістю лейкоцитів у студентів різної статі, котрі не хворіли на COVID-19, відсутня як у 2021, так і у 2024 році. При цьому в обстежених обох статей відбувалося статистично достовірне зростання показника від 2021 до 2023 року ($p < 0.05$ для чоловічої статі і $p < 0.001$ для жіночої статі, зі зміщенням до верхньої межі норми), що свідчить про загальну мобілізацію лейкопоезу в період воєнного стану. У студентів жіночої статі, котрі перехворіли на COVID-19, загальна кількість лейкоцитів вже у 2021 році була на верхній межі норми і достовірно вищою, ніж у студентів чоловічої статі, котрі перехворіли на COVID-19. При цьому статистично достовірних змін показника у 2023 році, порівняно з 2021, не відбулося, спостерігалася лише тенденція до помірної зростання, особливо, в осіб чоловічої статі (табл. 1). Таким чином, початкова мобілізація лейкопоезу, зумовлена інфекцією SARS-CoV-2 у 2021 році була більше вираженою в осіб жіночої статі, збереглася до 2023 року і зумовила нижчу відповідь на стрес, викликаний воєнним станом.

Таблиця 1

Показники лейкоцитарної формули в обстежених різної статі у різні роки аналізу, $M \pm m$

Показники / норма	Показники в осіб чоловічої статі, що не хворіли на COVID-19, n=3		Показники в осіб жіночої статі, що не хворіли на COVID-19, n=27	
	1	2	3	4
Лейкоцити, $\times 10^9/\text{л}$ / 4,0-9,6	2021	6,9 \pm 0,25	2021	7,15 \pm 0,19
	2023	8,6 \pm 0,35 *	2023	8,84 \pm 0,20 ***
Лімфоцити, % / 20-40	2021	27,0 \pm 0,58	2021	27,15 \pm 1,04
	2023	22,0 \pm 1,73 *	2023	22,56 \pm 0,75 **
Лімфоцити, $\times 10^9/\text{л}$ / 1,5-4,0	2021	1,86 \pm 0,08	2021	1,97 \pm 0,12
	2023	1,90 \pm 0,21	2023	2,01 \pm 0,09

Продовження таблиці 1

1	2		3	
Моноцити, % / 4,0-10,0	2021	7,67 ± 0,33	2021	8,00 ± 0,39
	2023	6,00 ± 0,58	2023	7,48 ± 0,29 #
Моноцити, x10 ⁹ /л / 0,2-0,8	2021	0,53 ± 0,04	2021	0,56 ± 0,03
	2023	0,52 ± 0,06	2023	0,66 ± 0,03 * #
Нейтрофіли пал., % / 1,0-6,0	2021	5,33 ± 0,33	2021	5,67 ± 0,25
	2023	7,00 ± 1,00	2023	6,89 ± 0,27 **
Нейтр. пал., x10 ⁹ /л / 0,04-0,4	2021	0,37 ± 0,03	2021	0,41 ± 0,03
	2023	0,61 ± 0,11	2023	0,62 ± 0,03 ***
Нейтрофіли сегм., % / 47,0-65,0	2021	58,00±0,58	2021	56,78±0,92
	2023	62,33 ± 1,33 *	2023	60,56 ± 0,88 **
Нейтр. сегм., x10 ⁹ /л / 2,0-6,5	2021	4,00 ± 0,12	2021	4,03 ± 0,09
	2023	5,35 ± 0,11 *	2023	5,33 ± 0,12 ***
Еозинофіли, % / 0,5-3,0	2021	1,67 ± 0,33	2021	1,59 ± 0,13
	2023	2,00 ± 0,58	2023	1,82 ± 0,18
Еозиноф., x10 ⁹ /л / 0,05-0,45	2021	0,12 ± 0,03	2021	0,11 ± 0,01
	2023	0,17 ± 0,04	2023	0,16 ± 0,02 *
Базофіли, % / 0,0-1,0	2021	0,33 ± 0,33	2021	0,82 ± 0,15
	2023	0,67 ± 0,67	2023	0,70 ± 0,15
Базофіли, x10 ⁹ /л / 0,00-0,02	2021	0,02 ± 0,02	2021	0,05 ± 0,01
	2023	0,05 ± 0,05	2023	0,06 ± 0,01
Показники / норма	Показники в осіб чоловічої статі, що хворіли на COVID- 19, n=8		Показники в осіб жіночої статі, що хворіли на COVID-19, n=9	
Лейкоцити, x10 ⁹ /л / 4,0-9,6	2021	7,93 ± 0,37	2021	9,00 ± 0,30 #
	2023	8,90 ± 0,25	2023	9,20 ± 0,29
Лімфоцити, % / 20-40	2021	34,38 ± 2,66	2021	41,33 ± 0,90 #
	2023	22,75 ± 1,22 **	2023	23,56 ± 0,73 ***
Лімфоцити, x10 ⁹ /л / 1,5-4,0	2021	2,77 ± 0,31	2021	3,72 ± 0,13 #
	2023	2,02 ± 0,10	2023	2,17 ± 0,10 ***
Моноцити, % / 4,0-10,0	2021	10,75 ± 1,16	2021	13,44 ± 0,53 #
	2023	7,63 ± 0,46 *	2023	7,89 ± 0,35 ***
Моноцити, x10 ⁹ /л / 0,2-0,8	2021	0,87 ± 0,12	2021	1,21 ± 0,05 #
	2023	0,68 ± 0,05	2023	0,73 ± 0,04 ***
Нейтрофіли пал., % / 1,0-6,0	2021	6,13 ± 0,52	2021	7,56 ± 0,29 ###
	2023	8,13 ± 0,44 *	2023	9,11 ± 0,20 **
Нейтр. пал., x10 ⁹ /л / 0,04-0,4	2021	0,49 ± 0,06	2021	0,68 ± 0,03 #
	2023	0,73 ± 0,05*	2023	0,84 ± 0,02 **
Нейтрофіли сегм., % / 47,0-65,0	2021	45,38 ± 4,29	2021	33,67 ± 1,28 #
	2023	58,50 ± 1,64 *	2023	56,11 ± 0,61 ***
Нейтр. сегм., x10 ⁹ /л / 2,0-6,5	2021	3,52 ± 0,27	2021	3,04 ± 0,17
	2023	5,21 ± 0,22 **	2023	5,16 ± 0,15 ***
Еозинофіли, % / 0,5-3,0	2021	1,75 ± 0,37	2021	2,33 ± 0,29
	2023	2,00 ± 0,33	2023	1,78 ± 0,28
Еозиноф., x10 ⁹ /л / 0,05-0,45	2021	0,14 ± 0,03	2021	0,21 ± 0,03
	2023	0,18 ± 0,03	2023	0,17 ± 0,03
Базофіли, % / 0,0-1,0	2021	1,63 ± 0,18	2021	1,67 ± 0,24
	2023	1,00 ± 0,27	2023	1,56 ± 0,18

Продовження таблиці 1

1	2		3	
Базофіли, $\times 10^9/\text{л}$ / 0,00-0,02	2021	0,13 \pm 0,02	2021	0,15 \pm 0,02
	2023	0,09 \pm 0,03	2023	0,14 \pm 0,02

Примітка: * - $p < 0,05$; ** - $p < 0,01$; *** - $p < 0,001$ при порівнянні показників 2023 року з показниками 2021 року в межах однієї групи; * - $p < 0,05$; ** - $p < 0,01$; *** - $p < 0,001$ при порівнянні показників між групами

Аналіз окремих популяцій лейкоцитів показав наступне: достовірна різниця між відносною кількістю лімфоцитів у студентів різної статі, котрі не хворіли на COVID-19, відсутня як у 2021, так і у 2024 році. При цьому в обстежених обох статей відбувалося статистично достовірне зниження показника від 2021 до 2023 року ($p < 0.05$ для чоловічої статі і $p < 0.01$ для жіночої статі, зі зміщенням до нижньої межі норми), що свідчить про пригнічення клітинної ланки адаптивного імунітету в період воєнного стану. У студентів жіночої статі, котрі перехворіли на COVID-19, відносна кількість лімфоцитів у 2021 році була на верхній межі норми і достовірно вищою, ніж у студентів чоловічої статі, котрі перехворіли на COVID-19. В обстежених обох статей відбулося достовірне зниження показника від 2021 до 2023 року ($p < 0.01$ для чоловічої статі і $p < 0.001$ для жіночої статі, зі зміщенням до нижньої межі норми) (табл. 1).

Достовірної різниці за загальною кількістю лімфоцитів між групами, розділеними за статтю, за умов відсутності в анамнезі COVID-19, не виявлено ні у 2021, ні у 2023 році. Відсутні також достовірні зміни показника від 2021 до 2023 року в межах групи певної статі. За умов попереднього захворювання загальна кількість лімфоцитів у 2021 році в обстежених жіночої статі була достовірно вищою, ніж в обстежених чоловічої статі ($p < 0.01$, зміщення до верхньої межі норми), і достовірно знизилася до 2023 року ($p < 0.001$) (табл. 1).

Таким чином, інфікування SARS-CoV-2 істотно мобілізувало клітинну ланку адаптивного імунітету у 2021 році в осіб жіночої статі, проте, фактор воєнного стану викликав її супресію у 2023 році, не залежно від статі. Це узгоджується з даними літератури про підвищену чутливість лімфоцитів до стресових впливів з можливістю індукції апоптозу [5; 8; 17].

У 2021 році відсутня достовірна різниця між групами різної статі, котрі не хворіли на COVID-19, за відносною кількістю моноцитів. Спостерігалася тенденція до зниження показників від 2021 до 2023 року, особливо виражена в осіб чоловічої статі, що призвело до достовірної різниці у 2023 році: показник став нижчим, ніж в осіб жіночої статі ($p < 0.05$). В обстежених обох статей, котрі перехворіли на COVID-19, відносна кількість моноцитів перебувала на верхній межі норми. У багатьох студентів жіночої статі показники вийшли за верхню межу, відносна кількість моноцитів у них була достовірно вищою, ніж в обстежених чоловічої статі ($p < 0.001$). У 2023 році показники достовірно знизилися в осіб обох статей ($p < 0.05$ для чоловічої статі і $p < 0.001$ для жіночої), різниця між групами, розділеними за статтю, зникла (табл. 1). Подібні тенденції спостерігалися для загальної кількості моноцитів, проте, в когорті, котра перехворіла на COVID-19, у 2023 році, достовірне зниження показника виявлено лише для осіб жіночої статі (табл. 1). Таким чином, моноцити, як визнаний прозапальний фактор [6], були мобілізовані у випадку інфікування SARS-CoV-2 у 2021 році. Особливо виражена мобілізація спостерігалася в осіб жіночої статі. Зниження показника у 2023 році доцільно вважати нормалізацією з часом, а не дією стресового фактора воєнного стану, оскільки кількість моноцитів залишилася дещо зміщеною до верхньої межі норми.

Відносна кількість паличкоядерних нейтрофілів в осіб обох статей, котрі не хворіли на COVID-19, у 2021 році була зміщена до верхньої межі норми, не відрізнялася між групами, мала тенденцію до росту в осіб чоловічої статі і достовірно зросла

в осіб жіночої статі до 2023 року ($p < 0.01$). В осіб, котрі хворіли, вже у 2021 році середній показник вийшов за верхню межу норми, був достовірно вищим у студентів жіночої статі, достовірно зріс в обох статей до 2023 року ($p < 0.05$ для чоловічої статі і $p < 0.01$ для жіночої). Подібні тенденції відмічені для загальної кількості паличкоядерних нейтрофілів (табл. 1). Зростання незрілих форм нейтрофілів є важливою ознакою як стресових станів, так і запалення [11; 28]. Відповідно, ознаки стресу спостерігалися вже у період пандемії і посилилися у період воєнного стану, не залежно від статі. У 2021 році в осіб, котрі перехворіли, ефект був виражений більше, що можна пояснити поєднанням у цій підгрупі стресу та прозапальних явищ.

Відносна кількість сегментоядерних нейтрофілів між групами, розділеними за статтю, не відрізнялися у випадку відсутності в анамнезі COVID-19 ні в 2021, ні в 2023 році. Показник достовірно зріс від 2021 до 2023 року в обстежених обох статей ($p < 0.05$ для чоловічої статі і $p < 0.01$ для жіночої). В обстежених, котрі перехворіли, середній показник був на нижній межі норми в осіб чоловічої статі і нижче норми в осіб жіночої. Як наслідок, в осіб жіночої статі показник достовірно нижчий ($p < 0.05$) (табл. 1). Ефект пояснюється перерозподілом у цій підгрупі на користь незрілих паличкоядерних нейтрофілів. Подібні тенденції виявлені для загальної кількості сегментоядерних нейтрофілів, за винятком відсутності різниці між обстеженими різної статі, котрі перехворіли, у 2021 році (табл. 1). Менше виражені закономірності стосовно загальної кількості всіх аналізованих вище популяцій лейкоцитів можна пояснити загальною мобілізацією лейкопоезу у 2023 році.

Показники еозинофілів в осіб, котрі не хворіли на COVID-19, перебували в межах норми і в 2021, і в 2023 році. Загальна кількість достовірно зросла від 2021 до 2023 року в осіб жіночої статі ($p < 0.05$). В осіб, котрі перехворіли, показники також перебували в межах норми, достовірної різниці між групами, розділеними за статтю, не виявлено (табл. 1).

Достовірної різниці за показниками базофілів між групами, розділеними за статтю, не виявлено. Відсутні також достовірні зміни показників від 2021 до 2023 року. Проте, загальна кількість базофілів у всіх підгрупах за середнім значенням вийшла за верхню межу норми. В осіб, котрі перехворіли, за верхню межу вийшли також середні показники відносної кількості (табл. 1). Таким чином, з двох прозапальних факторів (еозинофілів та базофілів) на стресові виклики пандемії та наступного воєнного стану, не залежно від статі, більше відреагувала популяція базофілів.

Додатково проведено аналіз показників нейтрофільно-лімфоцитарного індексу. У випадку загальних груп (без розділення за статевою ознакою), у 2021 році в осіб котрі не хворіли на COVID-19, середній показник дещо вийшов за верхню межу норми, що вже свідчить про наявність ознак стресу. В осіб, котрі перехворіли, показник був у межах норми, це можна пояснити мобілізацією лімфоцитарної ланки, зумовленої інфекцією SARS-CoV-2, що відмічалось вище. Як в обстежених з відсутністю захворювання на COVID-19 в анамнезі, так і у тих, котрі перехворіли, нейтрофільно-лімфоцитарний індекс достовірно зріс від 2021 року до 2023 ($p < 0,001$ в обох випадках), вийшовши за межі рекомендованих значень (табл. 2).

Тобто, наслідки емоційного стресу, зумовлені воєнним станом, були більше вираженими. Головним фактором стало зростання кількості паличкоядерних нейтрофілів на фоні зниження кількості лімфоцитів. Згідно з даними літератури, саме паличкоядерним нейтрофілам властива прозапальна функція, вони є біомаркером метаболічного стресу й динаміки імунної відповіді, тоді як зрілі сегментоядерні клітини сприяють ліквідації наслідків запалення [11; 28]. Виявлені нами ефекти для різних популяцій нейтрофілів підтверджують, що стрес має складні механізми модуляції активності цих клітин і їх роль в імунних реакціях, особливо, в умовах хронічної дії [21].

Таблиця 2

**Показники нейтрофільно-лімфоцитарного індексу
в обстежених різної статі у різні роки аналізу, $M \pm m$**

Показники / норма	Показники в осіб, що не хворіли на COVID-19, n=30		Показники в осіб, що хворіли на COVID-19, n=17	
	ІНЛ (нейтрофільно-лімфоцитарний індекс) / 1,0-2,0	2021	2,41 ± 0,11	2021
2023		3,11 ± 0,13 ***	2023	2,90 ± 0,12 ***
Показники в осіб чоловічої статі, що не хворіли на COVID-19, n=3		Показники в осіб жіночої статі, що не хворіли на COVID-19, n=27		
2021		2,35 ± 0,07	2021	2,42 ± 0,12
2023		3,19 ± 0,27	2023	3,11 ± 0,14 ***
Показники в осіб чоловічої статі, що хворіли на COVID-19, n=8		Показники в осіб жіночої статі, що хворіли на COVID-19, n=9		
2021		1,63 ± 0,24	2021	1,04 ± 0,05 ##
2023		3,01 ± 0,23 **	2023	2,80 ± 0,11 ***

*Примітка: ** - $p < 0,01$; *** - $p < 0,001$ при порівнянні показників 2023 року з показниками 2021 року в межах однієї групи; ## - $p < 0,01$; ### - $p < 0,001$ при порівнянні показників між групами*

При урахуванні статевого фактора з'ясували, що у 2021 році ІНЛ дещо вишшов за верхню межу норми в осіб обох статей, котрі не хворіли на COVID-19. Достовірної різниці між показником в осіб чоловічої та жіночої статі не виявлено. В осіб чоловічої статі виражена тенденція до зростання ІНЛ від 2021 до 2023 року, в осіб жіночої статі це зростання статистично достовірне ($p < 0,001$). В осіб, котрі перехворіли, показник, не залежно від статі, у 2021 році перебував у межах норми, що пояснюється тими ж особливостями, що й для загальної вибірки, без урахування статі, а саме – мобілізацією лімфоцитарної ланки після захворювання. При цьому в осіб жіночої статі показник достовірно нижчий ($p < 0,01$). До 2023 року відбулося статистично достовірне зростання ІНЛ як осіб чоловічої статі ($p < 0,01$), так і жіночої ($p < 0,001$), з виходом за верхню межу рекомендованої норми. Між групами, розділеними за статтю, у 2023 році достовірна різниця зникла (табл. 2).

Загалом, хоча нейтрофільно-лімфоцитарний індекс не продемонстрував вираженої варіативності залежно від статі, інші показники лейкоцитарної формули вказують на вищу схильність осіб жіночої статі до прозапальних явищ у стресових умовах, особливо, після інфекційних захворювань. Це узгоджується з даними літератури щодо запальних профілів у жінок на фоні пригнічення настрою та негативних соціально-емоційних подій [10; 19].

Висновки з дослідження та перспективи подальшого дослідження

Серед студентів віком 18-21 років жіноча стать, у випадку інфікування COVID-19, більше схильна до загальної мобілізації лейкопоезу, проте, надалі зумовлює нижчу відповідь на наступні стресові чинники. Така мобілізація відобразилася зростанням кількості лімфоцитів та моноцитів саме в осіб цієї когорти в період пандемії. Стресові умови воєнного стану у 2023 році викликали зниження кількості лімфоцитів, не залежно від статі та попереднього захворювання на COVID-19, що підтверджує схильність лімфоцитів до стрес-індукованого апоптозу. Повернення кількості моноцитів у 2023 році в межі норми свідчить про нижчу чутливість цієї ланки клітинного

імунітету до стресових чинників і вищу потенційну прозапальну роль паличкоядерних нейтрофілів. Саме ця популяція лейкоцитів демонструвала підвищену кількість, особливо в осіб жіночої статі, котрі попередньо перехворіли на COVID-19, в період пандемії, а також в обстежених обох статей в період воєнного стану. Це, своєю чергою, на фоні зниження кількості лімфоцитів у 2023 році, призвело до зростання нейтрофільно-лімфоцитарного індексу у всіх обстежених студентів. Прозапальні явища у період пандемії мали більше вираження в осіб жіночої статі, чітко виражені ознаки стресу проявилися в обстежених обох статей. Для кращого розуміння особливостей реакції клітинного імунітету на хронічний стресовий вплив, зумовлений різними чинниками нашого часу, доцільно проаналізувати субпопуляційний склад лімфоцитів, як одного зі складників нейтрофільно-лімфоцитарного індексу.

Список використаних джерел

1. Гончаренко В., Соколенко С., Соколенко В. Особливості показників професійних фагоцитів в осіб віком 18–21 років в умовах стресових факторів сучасності. *Наукові записки. Біологічні науки (Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя)*, №3, 2024, С. 45-52. <https://doi.org/10.31654/2786-8478-2024-BN-3-45-52>.
2. Гончаренко В. В., Соколенко В. Л. Показники прозапальних клітинних факторів в осіб віком 18-21 років у віддалений період після захворювання на COVID-19. *Наукові записки. Біологічні науки (Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя)*. 2026. Вип. 1, С. 39-46. <https://doi.org/10.31654/2786-8478-2026-BN-1-39-46>.
3. Кобаль І. В., Соколенко С. В. Значення статевого фактора у формуванні ознак імуносенесценції в періоді тривалих стресових впливів «Український журнал природничих наук». 2026. №15. С. 59-71. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.15.2026.6>
4. Akuthota P. Wang H. B., Spencer L. A., Weller P. F. Immunoregulatory roles of eosinophils: a new look at a familiar cell. *Clin. Exp. Allergy*. 2008. Vol. 38(8). P. 1254-1263. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2222.2008.03037.x>
5. Alotiby A. Immunology of stress: A review article. *Journal of clinical medicine*. 2024. Vol. 13(21). P. 6394. <https://doi.org/10.3390/jcm13216394>
6. Austermann J., Roth J., Barczyk-Kahlert K. The good and the bad: monocytes' and macrophages' diverse functions in inflammation. *Cells*. 2022. Vol. 11(12). P. 1979. <https://doi.org/10.3390/cells11121979>
7. Bourdon O. et al. A time to be chronically stressed? Maladaptive time perspectives are associated with allostatic load. *Biological Psychology*. 2020. Vol. 152. P. 107871. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2020.107871>
8. Buonacera A., Stancanelli B., Colaci M., Malatino L. Neutrophil to lymphocyte ratio: an emerging marker of the relationships between the immune system and diseases. *International journal of molecular sciences*. 2022. Vol. 23(7). P. 3636. <https://doi.org/10.3390/ijms23073636>
9. Chávez Valencia V., Orizaga de la Cruz C., Lagunas-Rangel F. A. Association of neutrophil/lymphocyte and platelet/lymphocyte ratios with inflammation and survival in Mexican patients on chronic hemodialysis. *Therapeutic Apheresis and Dialysis*. 2024. Vol. 28(6). P. 880-885. <https://doi.org/10.1111/1744-9987.14175>
10. Derry H. M. et al. Sex differences in depression: does inflammation play a role?. *Current Psychiatry Reports*. 2015. Vol. 17. P. 1-10. <https://doi.org/10.1007/s11920-015-0618-5>
11. Hellebrekers P. et al. Recognizing the mobilization of neutrophils with banded nuclei early after trauma. *International Journal of Laboratory Hematology*. 2020. Vol. 42(5). P. e224. <https://doi.org/10.1111/ijlh.13272>
12. Jia H. et al. Chronic stress, gut microbiota, and immunity: interconnections and implications for health. *Molecular and Cellular Biochemistry*. 2025. Vol. 480(12). P. 5995-6014. <https://doi.org/10.1007/s11010-025-05376-y>
13. Katsampouris E., Turner-Cobb J. M., Barnett J. C., Arnold R. S. Can ancient and modern stressors be distinguished? A mixed-methods exploration of psychosocial characteristics and health symptoms in young and older adults. *Journal of health psychology*. 2022. Vol. 27(3). P. 624-636. <https://doi.org/10.1177/1359105320965654>

14. Kostikova I. et al. University Teachers' Psychological State During the Stress of Online Education After Pandemic in Wartime in Ukraine. *Int. J. Emerg. Technol. Learn.* 2023. Vol.18, №13. <https://doi.org/10.3991/ijet.v18i13.39825>
15. Koutsakos M. et al. Integrated immune dynamics define correlates of COVID-19 severity and antibody responses. *Cell Reports Medicine.* 2021. Vol. 2(3). P. 100208. <https://doi.org/10.1016/j.xcrm.2021.100208>
16. Labonté B. et al. Sex-specific transcriptional signatures in human depression. *Nature Medicine.* 2017. Vol. 23(9). P. 1102-1111. <https://doi.org/10.1038/nm.4386>
17. Lagunas-Rangel F. A. Neutrophil-to-lymphocyte ratio in aging: Trends and clinical implications. *Experimental Gerontology.* 2025. P. 112908. <https://doi.org/10.1016/j.exger.2025.112908>
18. Medda E. et al. The COVID-19 pandemic in Italy: Depressive symptoms immediately before and after the first lockdown. *J. Affect. Disord.* 2021. Vol. 298. P. 202–208. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2021.10.129>
19. Moieni M. et al. Sex differences in depressive and socioemotional responses to an inflammatory challenge: implications for sex differences in depression. *Neuropsychopharmacology.* 2015. Vol. 40(7). P. 1709-1716. <https://doi.org/10.1038/npp.2015.17>
20. Nadyukova I., Frenzel A. C. Ukrainian teachers' stress and coping during the war: Results from a mixed methods study. *Teach. Teach. Educ.* 2025. Vol. 157. P. 104941. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2025.104941>
21. Obeagu E. I. Stress, neutrophils, and immunity: a dynamic interplay. *Annals of Medicine and Surgery.* 2025. Vol. 87(6). P. 3573-3585. <https://doi.org/10.1097/MS9.0000000000003304>
22. O'Connor D. B., Thayer J. F., Vedhara K. Stress and health: A review of psychobiological processes. *Annual review of psychology.* 2021. Vol. 72(1). P. 663-688. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-062520-122331>
23. Seney M. L. et al. Opposite molecular signatures of depression in men and women. *Biological Psychiatry.* 2018. Vol. 84(1), P. 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2018.01.017>
24. Slavich G. M. Stressnology: The primitive (and problematic) study of life stress exposure and pressing need for better measurement. *Brain, Behavior, and Immunity.* 2019. Vol. 75. P. 3-5. <https://doi.org/10.1016/j.bbi.2018.08.011>
25. Sokolenko V. L. et al. Indicators of the skin microbiota and the phagocytic activity in meat and egg production workers. *Biotechnologia Acta.* 2022. 15(4). 41-43. <https://doi.org/10.15407/biotech15.04.041>
26. Song M., Graubard B. I., Rabkin C. S., Engels E. A. Neutrophil-to-lymphocyte ratio and mortality in the United States general population. *Scientific reports.* 2021. Vol. 11(1). P. 464. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79431-7>
27. Takahashi T. et al. Sex differences in immune responses that underlie COVID-19 disease outcomes. *Nature.* 2020. Vol. 588. P. 315–320. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2700-3>
28. Vlková M. et al. Pro-inflammatory role of neutrophils populations in trauma patients: monitoring neutrophil populations. *Frontiers in Immunology.* 2025. Vol. 16. P.1565606. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1565606>
29. Wang R. et al. The interaction of innate immune and adaptive immune system. *MedComm.* 2024. Vol. 5(10). P. e714. <https://doi.org/10.1002/mco2.714>
30. Zahorec P. Neutrophil-to-lymphocyte ratio, past, present and future perspectives. *Bratislava Medical Journal.* 2021, Vol. 122(7). P. 474-488. https://doi.org/10.4149/BLL_2021_078
31. Zhang N., Zhang Z. M., Wang X. F. The roles of basophils in mediating the immune responses. *European Journal of Inflammation.* 2021. Vol. 19. P. 20587392211047644. <https://doi.org/10.1177/20587392211047644>

References

1. Гончаренко, В., Соколенко, С., та Соколенко, В. (2024). Особливості показників професійних фагоцитів в осіб віком 18–21 років в умовах стресових факторів сучасності. *Наукові записки. Біологічні науки (Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя)*, 3, 45-52. <https://doi.org/10.31654/2786-8478-2024-BN-3-45-52>.
2. Гончаренко, В. В., Соколенко, В. Л. (2026). Показники прозапальних клітинних факторів в осіб віком 18-21 років у віддалений період після захворювання на COVID-19. *Наукові записки. Біологічні науки (Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя)*, 1, 39-46. <https://doi.org/10.31654/2786-8478-2026-BN-1-39-46>.
3. Кобаль, І. В., Соколенко, С. В. (2026). Значення статевого фактора у формуванні ознак імуносенесценції в періоди тривалих стресових впливів «Український журнал природничих наук». 2026, 15, 59-71. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.15.2026.6>
4. Akuthota, P., Wang, H. B., Spencer, L. A., & Weller, P. F. (2008). Immunoregulatory roles of eosinophils: a new look at a familiar cell. *Clinical & Experimental Allergy*, 38(8), 1254-1263. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2222.2008.03037.x>
5. Alotiby, A. (2024). Immunology of stress: A review article. *Journal of clinical medicine*, 13(21), 6394. <https://doi.org/10.3390/jcm13216394>
6. Austermann, J., Roth, J., & Barczyk-Kahlert, K. (2022). The good and the bad: monocytes' and macrophages' diverse functions in inflammation. *Cells*, 11(12), 1979. <https://doi.org/10.3390/cells11121979>
7. Bourdon, O., Raymond, C., Marin, M. F., Olivera-Figueroa, L., Lupien, S. J., & Juster, R. P. (2020). A time to be chronically stressed? Maladaptive time perspectives are associated with allostatic load. *Biological Psychology*, 152, 107871. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2020.107871>
8. Buonacera, A., Stancanelli, B., Colaci, M., & Malatino, L. (2022). Neutrophil to lymphocyte ratio: an emerging marker of the relationships between the immune system and diseases. *International journal of molecular sciences*, 23(7), 3636. <https://doi.org/10.3390/ijms23073636>
9. Chávez Valencia, V., Orizaga de la Cruz, C., & Lagunas-Rangel, F. A. (2024). Association of neutrophil/lymphocyte and platelet/lymphocyte ratios with inflammation and survival in Mexican patients on chronic hemodialysis. *Therapeutic Apheresis and Dialysis*, 28(6), 880-885. <https://doi.org/10.1111/1744-9987.14175>
10. Derry, H. M., Padin, A. C., Kuo, J. L., Hughes, S., & Kiecolt-Glaser J. K. (2015). Sex differences in depression: does inflammation play a role?. *Current Psychiatry Reports*, 17, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s11920-015-0618-5>
11. Hellebrekers, P., Hesselink, L., Huisman, A., Ten Berg, M., Koenderman, L., Leenen, L. P., & Hietbrink, F. (2020). Recognizing the mobilization of neutrophils with banded nuclei early after trauma. *International Journal of Laboratory Hematology*, 42(5), e224. <https://doi.org/10.1111/ijlh.13272>
12. Jia, H., Guo, X., Wei, Y., Can, C., He, N., Zhang, H., ... & Ma, D. (2025). Chronic stress, gut microbiota, and immunity: interconnections and implications for health. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 480(12), 5995-6014. <https://doi.org/10.1007/s11010-025-05376-y>
13. Katsampouris, E., Turner-Cobb, J. M., Barnett, J. C., & Arnold, R. S. (2022). Can ancient and modern stressors be distinguished? A mixed-methods exploration of psychosocial characteristics and health symptoms in young and older adults. *Journal of health psychology*, 27(3), 624-636. <https://doi.org/10.1177/1359105320965654>
14. Kostikova, I., Holubnycha, L., Sytnykova, Y., Shchokina, T., Soroka, N., & Tarasova, S. (2023). University Teachers' Psychological State During the Stress of Online Education After Pandemic in Wartime in Ukraine. *International Journal of Emerging Technologies in Learning*, 18(13). <https://doi.org/10.3991/ijet.v18i13.39825>
15. Koutsakos, M., Rowntree, L. C., Hensen, L., Chua, B. Y., van de Sandt, C. E., Habel, J. R., ... & Kedzierska, K. (2021). Integrated immune dynamics define correlates of COVID-19

severity and antibody responses. *Cell Reports Medicine*, 2(3), 100208. <https://doi.org/10.1016/j.xcrm.2021.100208>

16. Labonté, B., Engmann, O., Purushothaman, I., Menard, C., Wang, J., Tan, C., ... & Nestler, E. J. (2017). Sex-specific transcriptional signatures in human depression. *Nature Medicine*, 23(9), 1102-1111. <https://doi.org/10.1038/nm.4386>

17. Lagunas-Rangel, F. A. (2025). Neutrophil-to-lymphocyte ratio in aging: Trends and clinical implications. *Experimental Gerontology*, 112908. <https://doi.org/10.1016/j.exger.2025.112908>

18. Medda, E., Toccaceli, V., Gigantesco, A., Picardi, A., Fagnani, C., & Stazi, M. A. (2022). The COVID-19 pandemic in Italy: depressive symptoms immediately before and after the first lockdown. *Journal of affective disorders*, 298, 202-208. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2021.10.129>

19. Moieni, M., Irwin, M. R., Jevtic, I., Olmstead, R., Breen, E. C., & Eisenberger, N. I. (2015). Sex differences in depressive and socioemotional responses to an inflammatory challenge: implications for sex differences in depression. *Neuropsychopharmacology*, 40(7), 1709-1716. <https://doi.org/10.1038/npp.2015.17>

20. Nadyukova, I., & Frenzel, A. C. (2025). Ukrainian teachers' stress and coping during the war: Results from a mixed methods study. *Teaching and Teacher Education*, 157, 104941. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2025.104941>

21. Obeagu, E. I. (2025). Stress, neutrophils, and immunity: a dynamic interplay. *Annals of Medicine and Surgery*, 87(6), 3573-3585. <https://doi.org/10.1097/MS9.0000000000003304>

22. O'Connor, D. B., Thayer, J. F., & Vedhara, K. (2021). Stress and health: A review of psychobiological processes. *Annual review of psychology*, 72(1), 663-688. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-062520-122331>

23. Seney, M. L., Huo, Z., Cahill, K., French, L., Puralewski, R., Zhang, J., ... & Sibille, E. (2018). Opposite molecular signatures of depression in men and women. *Biological psychiatry*, 84(1), 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2018.01.017>

24. Slavich, G. M. (2019). Stressnology: The primitive (and problematic) study of life stress exposure and pressing need for better measurement. *Brain, Behavior, and Immunity*, 75, 3-5. <https://doi.org/10.1016/j.bbi.2018.08.011>

25. Sokolenko, V. L., Sokolenko, S. V., Honcharenko, V. V., Kucher, V. V., & Kobal, I. V. (2022). Indicators of the skin microbiota and the phagocytic activity in meat and egg production workers. *Biotechnologia Acta*, 15(4), 41-43. <https://doi.org/10.15407/biotech15.04.041>

26. Song, M., Graubard, B. I., Rabkin, C. S., & Engels, E. A. (2021). Neutrophil-to-lymphocyte ratio and mortality in the United States general population. *Scientific reports*, 11(1), 464. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79431-7>

27. Takahashi, T., Ellingson, M. K., Wong, P., Israelow, B., Lucas, C., Klein, J., ... & Iwasaki, A. (2020). Sex differences in immune responses that underlie COVID-19 disease outcomes. *Nature*, 588(7837), 315-320. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2700-3>

28. Vlková, M., Štichová, J., Surá, K., Dvořáková, K., Kunčický, V., Papatheodorou, I., ... & Hortová-Kohoutková, M. (2025). Pro-inflammatory role of neutrophils populations in trauma patients: monitoring neutrophil populations. *Frontiers in Immunology*, 16, 1565606. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1565606>

29. Wang, R., Lan, C., Benlagha, K., Camara, N. O. S., Miller, H., Kubo, M., ... & Liu, C. (2024). The interaction of innate immune and adaptive immune system. *MedComm*, 5(10), e714. <https://doi.org/10.1002/mco2.714>

30. Zahorec, P. (2021) Neutrophil-to-lymphocyte ratio, past, present and future perspectives. *Bratislava Medical Journal*. 2021, 122(7), 474-488. https://doi.org/10.4149/BLL_2021_078

31. Zhang, N., Zhang, Z. M., & Wang, X. F. (2021). The roles of basophils in mediating the immune responses. *European Journal of Inflammation*, 19, 20587392211047644. <https://doi.org/10.1177/20587392211047644>

Honcharenko V.

graduate student at the Department of biology,
Nizhyn Mykola Gogol State University
incrediblesmaug@gmail.com
orcid.org/0000-0002-0173-2655

Sokolenko S.

Candidate of Biology, Associate professor,
Associate professor at the Department
of Cell Biology and Methods of Teaching,
Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy
sokolenko@i.ua
orcid.org/0000-0002-7341-1762

**THE SIGNIFICANCE OF THE SEX FACTOR IN THE IMPLEMENTATION
OF THE NEUTROPHIL-TO-LYMPHOCYTE RATIO AND OTHER INDICATORS
OF THE LEUKOCYTE FORMULA IN THE CONDITIONS OF STRESS
FACTORS OF THE PRESENT**

Among the factors that can influence stress-induced changes in immune responses, in particular, inflammatory processes, a person's gender is indicated. An important characteristic that combines stress response and inflammatory phenomena is the neutrophil-to-lymphocyte ratio (NLR), which demonstrates a dynamic relationship between the innate and adaptive cellular immune response and depends on many factors. However, the neutrophil-to-lymphocyte ratio cannot be considered in isolation from the stress response of the immune system as a whole. The components of the immune system act on challenges of different nature in an integrated manner. The purpose of our study is to analyze the significance of the gender factor in the reactions of the neutrophil-to-lymphocyte ratio and other indicators of the leukocyte formula to the stress challenges of modern times in students aged 18-21. Leukocyte populations were assessed in 47 students. Among the examined people, there were 11 males and 36 females. For female students, the analysis was carried out in the follicular phase of the menstrual cycle. Some of the examined people had not previously been ill with COVID-19, some had been ill 6-9 months before the first examination in 2021. A second assessment of the indicators in these same students was made in 2023, during the period of martial law. It was found that among students aged 18-21, in the case of COVID-19 infection, the female sex is more prone to general mobilization of leukopoiesis, however, in the future it causes a lower response to subsequent stress factors. Such mobilization was reflected in an increase in the number of lymphocytes and monocytes in individuals of this cohort during the pandemic. The stressful conditions of martial law in 2023 caused a decrease in the number of lymphocytes, regardless of gender and previous COVID-19 disease, which confirms the susceptibility of lymphocytes to stress-induced apoptosis. The return of the number of monocytes in 2023 to the norm indicates a lower sensitivity of this link of cellular immunity to stress factors and a higher potential pro-inflammatory role of band neutrophils. It was this population of leukocytes that demonstrated an increased number, especially in females who had previously contracted COVID-19, during the pandemic, as well as in those examined of both sexes during martial law. This, in turn, against the background of a decrease in the number of lymphocytes in 2023, led to an increase in the neutrophil-to-lymphocyte ratio in all examined students. Pro-inflammatory phenomena during the pandemic were more pronounced in females, and clearly expressed signs of stress were evident in both sexes.

Keywords: gender, leukocytes, neutrophil-to-lymphocyte ratio, pro-inflammatory factors, monocytes, eosinophils, basophils, emotional stress, COVID-19 pandemic, martial law.

*Стаття до редакції надійшла 02.04.2026 року
Рецензія на статтю надійшла 11.04.2026 року*

УДК 616.5-002.25-02:577.112.385

DOI 10.31654/2786-8478-2026-BN-2-114-125

Мохонь Л. І.

аспірантка кафедри біології,
Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя
mohon.ludmila@gmail.com
orcid.org/0009-0000-1826-7545

**СУЧАСНІ УЯВЛЕННЯ ПРО РОЛЬ ОКСИДАТИВНОГО СТРЕСУ
В ПАТОГЕНЕЗІ АКНЕ**

Акне є одним із найпоширеніших дерматологічних захворювань у пізньому дитячому та підлітковому віці. Акне – патологічний стан зі складною патофізіологією, зумовлений імунологічними та запальними процесами, гіперплазією сальних залоз, гіперколонізацією мікроорганізмів, а також фолікулярним гіперкератозом. Cutibacterium acnes синтезують ліпази та протеолітичні ферменти, які можуть виконувати ключову функцію у фазі запалення. Крім того, акне характеризується формуванням комедонів, запальних вогнищ із наступним розвитком диспігментації. На сьогодні запропоновано кілька гіпотез, проте жодна з них повністю не розкриває патофізіологічні механізми та весь спектр етіологічних чинників. При акне склад себуму, що секретується сально-волосяними фолікулами, зазнає змін, а з деструктивно змінених стінок фолікулів можуть вивільнятися активні форми кисню. Цей процес розглядається як тригер прогресування запальної відповіді в етіології даного захворювання. Оксидативний стрес, який часто розглядають виключно як деструктивний чинник, може додатково виконувати потенційно корисні функції в організмі, зокрема в контексті редокс-сигналізації, коли АФК функціонують як сигнальні молекули в біологічних процесах; цей механізм включає реакції переносу електронів, що потребують участі вільних радикалів, редокс-активних металів або відновних еквівалентів. За фізіологічних концентрацій АФК здатні запускати сигнальні каскади, що модулюють функції клітин. Зокрема, перекис водню та супероксидний аніон-радикал можуть впливати на активність факторів транскрипції NF-κB, AP-1, які контролюють експресію генів, пов'язаних із ростом, диференціацією та запаленням клітин. Ці редокс-чутливі сигнальні системи залучені до процесів регенерації тканин, імунної відповіді та адаптації до стресу. Метою дослідження був комплексний аналіз наукових даних щодо ролі оксидативного стресу в патогенезі акне та підходів до оцінки його перебігу. В результаті проведеного дослідження було доведено, що інтенсифікація оксидативного стресу та хронічне запалення відіграють важливу роль в патогенезі акне. Крім того, дія різних гормонів впливає на виникнення та прогресування цієї патології. Допоміжна терапія, зокрема застосування сполук рослинного походження (фітопрепаратів), демонструє позитивні результати. Фітосполуки в більшості випадків мають виражену антиоксидантну та антизапальну активність, знижуючи рівні окислювального стресу і запалення. Перспективним напрямком подальших досліджень є вивчення молекулярних механізмів патофізіологічних процесів за акне, розробка більш ефективних терапевтичних підходів, зокрема, використання фітопрепаратів.
Ключові слова: акне, оксидативний стрес, запалення, маркери оксидативного стресу.

Постановка проблеми. Акне є одним із найпоширеніших дерматологічних захворювань у пізньому дитячому та підлітковому віці. Акне – патологічний стан зі складною патофізіологією, зумовлений імунологічними та запальними процесами,

гіперплазією сальних залоз, гіперколонізацією мікроорганізмів, а також фолікулярним гіперкератозом [1]. *Cutibacterium acnes* синтезують ліпази та протеолітичні ферменти, які можуть виконувати ключову функцію у фазі запалення. Крім того, акне характеризується формуванням комедонів, запальних вогнищ із наступним розвитком диспігментації. На сьогодні запропоновано кілька гіпотез, проте жодна з них повністю не розкриває патофізіологічні механізми та весь спектр етіологічних чинників. При акне склад себуму, що секретується сально-волосяними фолікулами, зазнає змін, а з деструктивно змінених стінок фолікулів можуть вивільнятися активні форми кисню (АФК). Цей процес розглядається як тригер прогресування запальної відповіді в етіології даного захворювання. Доведено, що певні лікарські засоби, зокрема метронідазол, міноциклін, еритроміцин та тетрациклін, зазвичай застосовуються для терапії акне завдяки здатності знижувати рівні перекису водню та супероксидного аніон-радикалу [2]. В патогенезі акне оксидативний стрес може відігравати суттєву роль [1, 2]. Оксидативний стрес, який часто розглядають виключно як деструктивний чинник, може додатково виконувати потенційно корисні функції в організмі, зокрема в контексті редокс-сигналізації, коли АФК функціонують як сигнальні молекули в біологічних процесах; цей механізм включає реакції переносу електронів, що потребують участі вільних радикалів, редокс-активних металів або відновних еквівалентів [3]. Фосфорилування білків, імунологічні процеси, активація факторів транскрипції, диференціація та апоптоз взаємопов'язані з генерацією та наявністю АФК у клітинах, рівень яких має підтримуватися на низьких фізіологічних значеннях [1]. У той час як надмірний оксидативний стрес здатний викликати пошкодження клітин, що призводить до розвитку різноманітних патологій, контрольована та помірною генерація АФК забезпечують виконання важливих фізіологічних функцій [1]. Крім того, за розвитку оксидативного стресу можуть індукуватися механізми антиоксидантного захисту організму. За умов помірної інтенсифікації оксидативного стресу в клітинах активуються їхні ендогенні антиоксидантні системи для протидії інтенсифікованій продукції АФК. Ця адаптивна відповідь підвищує антиоксидантний потенціал клітини та забезпечує її захист від подальших пошкоджень, зумовлених окисненням [3]. Протягом останнього десятиліття інтенсифікувався пошук ефективних і безпечних природних сполук з антиоксидантною активністю. У поєднанні з ендогенними механізмами антиоксидантного захисту антиоксиданти рослинного походження є прийнятною альтернативою [4]. За фізіологічних концентрацій АФК здатні запускати сигнальні каскади, що модулюють функції клітин. Зокрема, перекис водню та супероксидний аніон-радикал можуть впливати на активність факторів транскрипції NF-κB, AP-1, які контролюють експресію генів, пов'язаних із ростом, диференціацією та запаленням клітин. Ці редокс-чутливі сигнальні системи залучені до процесів регенерації тканин, імунної відповіді та адаптації до стресу.

Мета роботи – комплексний аналіз наукових даних щодо ролі оксидативного стресу в патогенезі акне та підходів до оцінки його перебігу.

Виклад основного матеріалу. Такі форми АФК, як перекис водню, оксид азоту (II), гідроксильний радикал та супероксидний аніон-радикал здатні синтезуватися кератиноцитами та практично всіма клітинними компонентами шкіри у відповідь на сигнали від медіаторів, факторів росту, політантів, ультрафіолетового випромінювання, цитокінів, харчових добавок, косметичних засобів, фармацевтичних препаратів та інших подразників. Шкіра володіє антиоксидантними властивостями, які забезпечуються як ферментною, так і неферментною системами. До ферментних антиоксидантів належать глутатіонпероксидаза, каталаза, глутатіон-S-трансфераза, глутатіонредуктаза та супероксиддисмутаза [3, 4]. До ендогенних неферментних антиоксидантів можна віднести поліфеноли, коензим Q10, селен, альфа-ліпоеву кислоту тощо. Крім того, антиоксиданти можуть надходити в організм екзогенно з їжею (зокрема лікопін, ресвератрол, екстракт винограду кісточок, куркумін, пікногенол, силімарин, ізофлавоноїди, гранат, зелений чай, прополіс, сквален тощо) [1, 5]. Структура епідермісу

характеризується вищим рівнем антиоксидантів порівняно з дермальним шаром. Антиоксидантна система найчастіше розподілена у вигляді градієнта з підвищенням концентрації в глибоких шарах рогового шару (*stratum corneum*). За дисбалансу про- і антиоксидантної системи можуть розвиватися різноманітні дерматологічні захворювання [1].

Такі форми АФК як перекис водню, оксид азоту (II), гідроксильний радикал та супероксидний аніон-радикал є молекулами, які виконують важливі функції при багатьох запальних дерматозах. *Cutibacterium acnes*, що є етіологічним чинником акне, індукують продукцію хемотаксичних білків, що призводить до агрегації нейтрофілів. Цей процес порушує цілісність фолікулярного епітелію внаслідок вивільнення прозапальних молекул, зокрема лізосомальних протеаз, шляхом фагоцитозу. Вони продукуються активованими нейтрофілами у вогнищах запалення та пошкоджують ДНК і мембранні ліпіди, що може спричинити деструктивні зміни навіть у здорових тканинах [6]. Сквален, що є важливим компонентом себуму людини, захищає зовнішній шар шкіри від оксидативного пошкодження, тоді як проміжні продукти його перекисного окиснення індукують комедогенні реакції та виявляються у значно більшій кількості в закритих або відкритих комедонах [7]. Шкіра є особливо чутливою до оксидативного пошкодження через постійний вплив оксидативного стресу, індукованого ендогенними та екзогенними АФК. До ендогенних джерел АФК у шкірі належать процеси автоокиснення та ферментативного окиснення. Ферментативна деградація є додатковим ендогенним шляхом утворення ліпідних пероксидів. Ліпоксигеназа каталізує окиснення поліненасичених жирних кислот, зокрема арахідонової та лінолевої. Циклооксигенази прискорюють перетворення поліненасичених жирних кислот на ендопероксиди, які є попередниками простагландинів. Отже, інтенсифікація реакції окиснення може призвести до утворення АФК у сальних залозах і зумовити появу атипичних ознак, характерних для акне.

З-поміж інших ліпідів, значення яких у формуванні комедонів було доведено, дедалі більший інтерес викликають продукти перекисного окиснення ліпідів. Згідно з попередніми дослідженнями, висока концентрація ліпідних пероксидів може бути залучена до розвитку запальних змін у комедонах. Зокрема, було встановлено, що у вогнищах запалення спостерігалися вищі рівні ліпопероксидації, NF-κB та IL-1α порівняно із незапальними елементами ураження [8].

З огляду на те, що сквален, поряд із похідними воску, є типовим продуктом секреції сальних залоз, сполуки перекисного окиснення сквалену залишаються вкрай важливими. По суті, похідні воску та сквален містяться у високій концентрації в себумі, але відсутні в ліпідах епідермальної поверхні. Біосинтетичний шлях ефірів воску є критично важливим для функціонування сальної залози. Діацилгліцерол-ацилтрансферази (DGAT) є важливими ферментами, активними в процесі себогенезу. DGAT1 каталізує синтез воскових сполук, тоді як DGAT2 каталізує синтез триацилгліцеролів [9]. Сквален є проміжним продуктом біосинтезу, який передує холестерину на шляху його синтезу. Перетворення сквалену на ланостерин і холестерин у сальній залозі є мінімальним. Механізм, за допомогою якого себоцити накопичують сквален, потребує додаткового вивчення. Існує кілька потенційних причин високої концентрації сквалену в себумі. По-перше, скваленсинтаза може виявляти підвищену експресію та активність у себоцитах, тоді як каталізатори, відповідальні за перетворення сквалену на холестерин – оксидоскваленциклаза та сквален-2,3-епоксидаза – можуть бути пригнічені. Зважаючи на те, що сальна залоза має унікальне мікросередовище, яке визначається анаеробними умовами, а сквален-2,3-епоксидаза потребує кисню для своєї активації, правомірною є гіпотеза, що відкладення сквалену в себоцитах зумовлене саме специфікою середовища сальної залози [10]. За окиснення ліпідів поверхні шкіри дорослих людей утворюється моногідропероксид сквалену як первинний побічний продукт. Було виявлено численні ізоформи моногідропероксиду сквалену, а також доведено можливість його подальшого перекисного окиснення. Ці сполуки у

кератиноцитах проявляти цитотоксичність, могли викликати гістологічні аномалії та імуносупресію [1]. Зміни в структурі себуму, викликані ліпопероксидацією, та аномальний розподіл жирних кислот впливають на ріст і розвиток кератиноцитів. Продукти перекисного окиснення ліпідів також можуть індукувати генерацію прозапальних цитокінів та стимулювати рецептори, активовані проліфератором пероксисом (PPAR). PPAR є ядерними факторами транскрипції, залученими як до регуляції метаболізму ліпідів, так і до запальних процесів. Пригнічення активації NF- κ B та стимуляція катаболізму прозапальних ейкозаноїдів беруть участь у регуляції сигнальних шляхів. Серед багатьох ізоформ PPAR- γ та PPAR- α відіграють найважливішу роль у фізіології себоцитів. PPAR- α , очевидно, пов'язаний із β -окисненням насичених жирів і катаболізмом ліпідів, тоді як активація PPAR- γ асоціюється з адипогенезом та акумуляцією ліпідів. Крім того, лейкотрієн B₄ та 15-гідроксиейкозатетраєнова кислота є метаболітами ейкозаноїдів, що утворюються в результаті метаболізму арахідонової кислоти, і були ідентифіковані як ліганди PPAR- γ та PPAR- α [11].

5-ліпоксигеназа (5-LOX) та інші білки, що сприяють їх генерації, експресуються у більшій кількості в ураженій акне шкірі порівняно зі здоровою. Крім того, в ураженій акне шкірі було виявлено надмірну експресію IL-8 та IL-6. Молекули LOX залучені до хронічних запальних захворювань шкіри, що характеризуються гіперпроліферацією кератиноцитів [12]. Було продемонстровано, що субклінічні запальні процеси передують гіперпроліферації та абератному диференціюванню у схильній до акне шкірі. Механізм підвищення рівнів прозапальних цитокінів, таких як IL-1, у клінічно нормальних сально-волосяних фолікулах пацієнтів з акне залишається не до кінця з'ясованим. Крім цієї фази продукція запальних сполук є одним із початкових етапів у процесі розвитку акне. Більше того, оксидативний стрес у межах сально-волосяного апарату змінює мікросередовище з несприятливого для анаеробних бактерій на ідеальне для колонізації таких мікроорганізмів [13].

Cutibacterium acnes, які раніше вважалися першопричиною запального акне, можливо, не обрали б сально-волосяний фолікул своїм середовищем існування, якби не гостре запальне пошкодження себуму. До того ж, окиснення шкірного сала змінює парціальний тиск кисню у фолікулі, створюючи мікроаерофільні умови, необхідні для підтримання життєдіяльності *Cutibacterium acnes*. Відповідно, оксидативний стрес і запалення можуть виступати попередниками для всіх наступних патогенетичних чинників акне [14].

У лейкоцитах пацієнтів з акне спостерігається зниження активності супероксиддисмутази та глутатіонпероксидази, хоча рівні речовин, що реагують із тіобарбітуровою кислотою, та МДА в сироватці крові підвищені. У тканинних зразках вогнищ акне активність каталази, супероксиддисмутази, рівні МДА та відновленого глутатіону є підвищеними [15]. Вміст вітамінів А та Е у плазмі крові пацієнтів з акне знижені. Себум при акне містить підвищену кількість пероксидів сквалену, які виснажують запаси відновленого глутатіону та знижують рівень вітаміну D. Крім того, у плазмі крові пацієнтів з акне було суттєво знижено вміст вітаміну А, цинку та вітаміну Е, причому між рівнями цинку й вітаміну Е та тяжкістю перебігу акне існував зворотний значущий кореляційний зв'язок [16]. Показано що попередник вітаміну С (натрію аскорбілфосфат), нікотинамід і цинк є ефективними при лікуванні акне. Також переваги в терапії акне продемонструвала мультинутриєнтна антиоксидантна система (що містить каротиноїди, цинк, вітамін С, D-альфа-токоферолу ацетат, хром, вітамін Е, селен і лактоферин) [17]. Пероральний прийом ізотретиноїну для лікування тяжких форм акне шляхом посилення оксидативного стресу підвищує рівень відновленого глутатіону і активність глутатіонпероксидази, водночас знижуючи активність в сироватці крові параоксонази-1. Припускають, що саме ця активність є патофізіологічним механізмом, який лежить в основі побічних ефектів ізотретиноїну [18].

В дослідженні [19] було продемонстровано, що після 3 місяців терапії ізотретиноїном спостерігалася статистично значуща зміна сироваткового рівня МДА.

Зокрема, було зафіксовано суттєве зростання рівнів МДА в сироватці крові при помірному ступені та дуже виражене збільшення МДА при тяжкому перебігу. У кожному випадку активність аланінамінотрансферази, лужної фосфатази, рівні сироваткового холестерину та тригліцеридів швидко та суттєво зростали. Усередині вогнищ ураження при запальній формі акне було виявлено, що нейтрофіли, які інфільтрують волосяні фолікули, продукують значну кількість перекису водню, оксиду азоту (II) та супероксидного аніон-радикалу, тоді як активність супероксиддисмутази була зниженою. Крім того, співвідношення лінолевої кислоти до пальмітинової було низьким. Лінолева кислота знижувала рівні АФК, тоді як пальмітинова кислота такого ефекту не виявляла. Таким чином, у вогнищах ураження шкіри при акне посилювалося деструктивне uszkodження тканин.

Cutibacterium acnes генерують порфірини в сальних залозах, що свідчить про здатність видимого світла індукувати утворення гідроксильного радикалу та супероксидного аніон-радикалу. Сквален – ліпід, сконцентрований у сальних залозах, – пригнічує перекисне окиснення інших ліпідних і білкових структур шкіри; відтак, окиснення самого сквалену загострює патологічні процеси при акне [20]. Кількість вітаміну Е та сквалену в сальних залозах є достатньою для захисту життєво важливих ліпідів, ДНК і білків від деструктивних наслідків впливу світла [21].

Патофізіологія акне є складним процесом, що детермінується різними чинниками, що пов'язані із запальними та гормональними механізмами. Гормони, що секретуються наднирковими залозами, підшлунковою залозою та яєчниками, разом із запальними процесами різної етіології та стресом, можуть призводити до окиснення себуму, зумовлюючи потенційний вплив на розвиток акне [22-26].

Загальний антиоксидантний статус (TAS), загальний оксидантний статус (TOS) та індекс оксидативного стресу (OSI) є основними маркерами, що використовуються для комплексної оцінки оксидативного стресу. За результатами різних досліджень, величина показників TOS та TAS у пацієнтів з акне є вищими, нижчими або без суттєвих відмінностей порівняно з контрольною групою. Лише в одному дослідженні оцінювали зв'язок між величинами показників TAS, TOS та OSI і тяжкістю та тривалістю захворювання. В дослідженні [27] виявили статистично значуще вищі рівні TAS, TOS та OSI у пацієнтів з акне порівняно зі здоровими особами, проте не було вичвлено жодних значущих кореляцій між сироватковими рівнями цих параметрів та тривалістю захворювання або тяжкістю елементів акне. Варто зазначити, що у це дослідження були включені пацієнти з легким та помірним ступенем акне. Підвищений рівень TAS можна вважати компенсаторною відповіддю на оксидативний стрес. Рівень TOS був значуще вищим за рівень TAS, тому індекс OSI також був вищим у пацієнтів з акне порівняно з групою контролю.

Перекисне окиснення ліпідів оцінювали шляхом вимірювання сироваткових рівнів МДА, за винятком одного дослідження, де визначали рівень ліпідних пероксидів у себумі. В усіх проаналізованих роботах сироватковий рівень МДА був статистично значуще вищим у пацієнтів з акне порівняно з контрольною групою. Крім того, у себумі було ідентифіковано вищі рівні ліпідних пероксидів та окисненого сквалену. Відомо, що акне асоціюється з посиленою секрецією шкірного сала та збільшенням кількості сквалену. У разі дефіциту антиоксидантної системи відбувається пероксидація жирних кислот у себумі, що призводить до активації запального процесу [28]. Дослідження вказують на те, що ліпіди залучені до запуску запального процесу при кількох дерматологічних захворюваннях, таких як звичайний псоріаз, червоний плаский лишай тощо [29]. Належний баланс між продуктами перекисного окиснення ліпідів із прозапальними ефектами та сполуками з антизапальними властивостями є критично важливим для регуляції запального процесу [30]. Відомо, що МДА індукує вивільнення прозапальних цитокінів. Проте не було виявлено помітної кореляції між індексами перекисного окиснення ліпідів у себумі та концентрацією IL-1 α у роговому шарі (stratum corneum), отриманому як з ураженої, так і з неуразеної шкіри [31].

Окиснення ДНК оцінювали за рівнями 8-OHdG (8-гідрокси-2'-дезоксигуанозину) в сироватці крові, які були вищими у пацієнтів з акне порівняно з контрольною групою. Високі концентрації 8-OHdG часто асоційовані з хронічним запальним процесом. В роботі [32] виявили відсутність кореляції між вмістом 8-OHdG в сироватці крові та величинами показників TAS і TOS. Водночас спостерігалась наявність позитивного кореляційного зв'язку між рівнем 8-OHdG та тяжкістю перебігу акне. Проте в роботі [33] не продемонстровано зв'язку між ушкодженням ДНК та тяжкістю акне. Варто зазначити, що в цьому дослідженні порівнювали пацієнтів із вітиліго та акне в контексті наявності оксидативного стресу, оскільки дисбаланс між оксидантами та антиоксидантами при вітиліго є загальновідомим. Вони помітили, що рівень оксидативного стресу був подібним у пацієнтів із тяжким ступенем акне та вітиліго, що свідчить про потенційну доцільність застосування антиоксидантної терапії.

Для оцінки модифікації білкових молекул у пацієнтів з акне найбільшу увагу приділяють модифікованому ішемію альбуміну (IMA). Крім того, з цією метою також вимірюють показники тіол-дисульфідного гомеостазу та вміст в сироватці крові симетричного диметиларгініну (SDMA) і асиметричного диметиларгініну (ADMA). IMA використовується як маркер ішемії при серцево-судинних захворюваннях. Проте підвищені рівні величини цього показника були продемонстровані за численних патологій, включаючи такі дерматози, як atopічний дерматит, псоріаз, вітиліго тощо [34]. В усіх дослідженнях вміст в сироватці крові IMA був статистично значуще вищим у пацієнтів з акне порівняно з контрольною групою.

Перетворення тіолів на дисульфіди є маркером окиснення білків. Останнім часом тіол-дисульфідний гомеостаз активно вивчається при кількох запальних захворюваннях шкіри. Баланс між тіолами та дисульфідами відображає рівновагу між оксидантами та антиоксидантами. Посттрансляційні модифікації білків є ще однією важливою подією, яка відбувається в умовах оксидативного стресу. SDMA та ADMA є молекулами, що утворюються в результаті посттрансляційних модифікацій аргініну. ADMA виступає основним інгібітором NO-синтази, тоді як SDMA опосередковано пригнічує синтез NO, викликаючи дефіцит аргініну. SDMA та ADMA відіграють важливу роль у багатьох біологічних процесах, зокрема в розвитку оксидативного стресу, запалення та ендотеліальної дисфункції [35]. В умовах оксидативного стресу спостерігається підвищення активності ферментів, відповідальних за генерацію SDMA та ADMA, а також зниження активності ферментів, залучених до їх метаболізму [36]. Єдине дослідження, у якому оцінювали рівні SDMA та ADMA у пацієнтів з акне, продемонструвало зростання вмісту цих сполук в сироватці крові [37]. Антиоксиданти можуть підвищувати експресію редокс-залежних факторів транскрипції, таких як Nrf2, NF-κB, AP-1, та мітоген-активованих протеїнкіназ (MAPK) [38]. У пацієнтів з акне було протестовано широкий спектр молекул з антиоксидантною активністю, зокрема ферменти, вітаміни, мікроелементи та глутатіон. В більшості досліджень виявили низькі рівні антиоксидантів в сироватці крові. В дослідженні [39] продемонстровано, що активність супероксиддисмутази була статистично нижча у пацієнтів із тяжким ступенем акне порівняно з особами з помірним або легким ступенем, що свідчить о перевищенні потужності систем антиоксидантного захисту на пізніх стадіях захворювання. В дослідженні [40] продемонстровано суттєво нижчі рівні активності антиоксидантних ферментів супероксиддисмутази та каталази у пацієнтів із тяжкими формами акне порівняно з помірними формами. Крім того, в дослідженні [41] продемонстрована наявність зворотного кореляційного зв'язку між рівнями вітаміну А і цинку в сироватці крові та тяжкістю перебігу акне. В дослідженні [28] було зроблене припущення, що зниження активності глюкозо-6-фосфат-дегідрогенази у пацієнтів з акне може впливати на рівні антиоксидантів в епідермісі. Фермент глюкозо-6-фосфат-дегідрогеназа є лімітуючим ферментом пентозофосфатного шляху, який відповідає за продукцію NADPH. Більше того, NADPH є критично важливим для синтезу відновлених форм

глутатіону та тіоредоксину. Ці відновлені форми антиоксидантів відіграють життєво важливу роль у регенерації та підтриманні оптимального антиоксидантного статусу.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Інтенсифікація оксидативного стресу та хронічне запалення відіграють важливу роль в патогенезі акне. Крім того, дія різних гормонів впливає на виникнення та прогресування цієї патології. Допоміжна терапія, зокрема застосування сполук рослинного походження (фітопрепаратів), демонструє позитивні результати. Фітосполуки в більшості випадків мають виражену антиоксидантну та антизапальну активність, знижуючи рівні окислювального стресу і запалення. Перспективним напрямком подальших досліджень є вивчення молекулярних механізмів патофізіологічних процесів за акне, розробка більш ефективних терапевтичних підходів, зокрема, використання фітопрепаратів.

Список використаних джерел

1. Bungau A. F., Radu A. F., Bungau S. G., Vesa C. M., Tit D. M., Endre L. M. Oxidative stress and metabolic syndrome in acne vulgaris: Pathogenetic connections and potential role of dietary supplements and phytochemicals. *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2023. 164. P. 115003. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2023.115003>
2. Dréno B. What is new in the pathophysiology of acne, an overview. *J Eur Acad Dermatol Venereol*. 2017. 31. Suppl 5. P. 8-12. <https://doi.org/10.1111/jdv.14374>
3. Pizzino G., Irrera N., Cucinotta M., Pallio G., Mannino F., Arcoraci F., Squadrito F., Altavilla D., Bitto A. Oxidative Stress: Harms and Benefits for Human Health. *Oxid. Med Cell Longev*. 2017. 2017. P. 8416763. <https://doi.org/10.1155/2017/8416763>
4. Abdel-Daim M. M., Abo-El-Sooud K., Aleya L., Bungau S. G., Najda A., Saluja R. Alleviation of Drugs and Chemicals Toxicity: Biomedical Value of Antioxidants. *Oxid. Med Cell Longev*. 2018. 2018. P. 6276. <https://doi.org/10.1155/2018/6276438>
5. Pai V.V., Shukla P., Kikkeri N.N. Antioxidants in dermatology. *Indian Dermatol. Online J*. 2014. 5 (2). P. 210–214. <https://doi.org/10.4103/2229-5178.131127>
6. Mayslich C., Grange P. A., Dupin N. Cutibacterium acnes as an opportunistic pathogen: an update of its virulence-associated factors. *Microorganisms*. 2021. 9 (2). P. 303. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9020303>
7. Briganti S., Picardo M. Antioxidant activity, lipid peroxidation and skin diseases. What's new. *J. Eur. Acad. Dermatol. Venereol*. 2003. 17 (6). P. 663-669. <https://doi.org/10.1046/j.1468-3083.2003.00751.x>
8. Tochio T., Tanaka H., Nakata S., Ikeno H. Accumulation of lipid peroxide in the content of comedones may be involved in the progression of comedogenesis and inflammatory changes in comedones. *J. Cosmet. Dermatol*. 2009. 8 (2). P.152-158. <https://doi.org/10.1111/j.1473-2165.2009.00437.x>
9. Yen C.L., Monetti M., Burri B. J., Farese Jr. R. V. The triacylglycerol synthesis enzyme DGAT1 also catalyzes the synthesis of diacylglycerols, waxes, and retinyl esters. *J. Lipid Res*. 2005. 46 (7). P. 1502–1511. <https://doi.org/10.1194/jlr.M500036-JLR200>
10. Smith K.R., Thiboutot D.M. Thematic review series: skin lipids. Sebaceous gland lipids: friend or foe? *J. Lipid Res*. 2008. 49 (2). P. 271–281. <https://doi.org/10.1194/jlr.R700015-JLR200>
11. Thuillier P., Brash A. R., Kehrer J. P., Stimmel J. B., Leesnitzer L. M., Yang P., Newman R. A., Fischer S M. Inhibition of peroxisome proliferator-activated receptor (PPAR)-mediated keratinocyte differentiation by lipoxygenase inhibitors. *Biochem J*. 2002. 366 (Pt 3). P. 901-910. <https://doi.org/10.1042/bj20020377>
12. Zouboulis C. C., Nestoris S., Adler Y. D., Orth M., Orfanos C. E., Picardo M., Camera E., Cunliffe W. J. A new concept for acne therapy: a pilot study with zileuton, an oral 5-lipoxygenase inhibitor. *Arch. Dermatol*. 2003. 139 (5). P. 668-670. <https://doi.org/10.1001/archderm.139.5.668>
13. Holland D.B., Jeremy A.H. The role of inflammation in the pathogenesis of acne and acne scarring. *Semin Cutan. Med Surg*. 2005. 24 (2). P. 79-83.
14. Jeremy A. H., Holland D. B., Roberts S. G., Thomson K. F., Cunliffe W. J. Inflammatory events are involved in acne lesion initiation. *J. Invest Dermatol*. 2003. 121 (1). P. 20-27. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1747.2003.12321.x>

15. Perihan O., Ergul K. B., Neslihan D., Filiz A. The activity of adenosine deaminase and oxidative stress biomarkers in scraping samples of acne lesions. *J. Cosmet. Dermatol.* 2012. 11 (4). P. 323-328. <https://doi.org/10.1111/jocd.12011>
16. Ozuguz P., Dogruk Kacar S., Ekiz O., Takci Z., Balta I., Kalkan G. Evaluation of serum vitamins A and E and zinc levels according to the severity of acne vulgaris. *Cutan. Ocul. Toxicol.* 2014. 33 (2). P. 99-102. <https://doi.org/10.3109/15569527.2013.808656>
17. Gori A., Fabroni C., Prignano F., Lotti T. Unusual presentation of tuberculosis in an infliximab-treated patient—which is the correct TB screening before starting a biologic? *Dermatol. Ther.* 2010. 23 (Suppl 1). P. S1-S3. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8019.2009.01278.x>
18. Erturan I., Naziroglu M., Akkaya V. B. Isotretinoin treatment induces oxidative toxicity in blood of patients with acne vulgaris: a clinical pilot study. *Cell Biochem Funct.* 2012. 30 (7). P. 552-557. <https://doi.org/10.1002/cbf.2830>
19. Saleh H. M. A., Alzawahry K. M. A., Gad R. E. M. Assessment of Plasma Malondialdehyde in Acne Patients on Isotretinoin Therapy. *QJM: Int. J. Med.* 2020. 113 (Supplement_1). hcaa046.007. <https://doi.org/10.1093/qjmed/hcaa046.007>
20. Ottaviani M., Alestas T., Flori E., Mastrofrancesco A., Zouboulis C. C., Picardo M. Peroxidated squalene induces the production of inflammatory mediators in HaCaT keratinocytes: a possible role in acne vulgaris. *J. Invest Dermatol.* 2006. 126 (11). P. 243–2437. <https://doi.org/10.1038/sj.jid.5700434>
21. Borelli C., Merk K., Schaller M., Jacob K., Vogeser M., Weindl G., Berger U., Plewig G. *In vivo* porphyrin production by *P. acnes* in untreated acne patients and its modulation by acne treatment. *Acta Derm. Venereol.* 2006. 86 (4). P. 316-31. <https://doi.org/10.2340/00015555-0088>
22. Nickles M. A., Sharma D., Tsoukas M. M., Ashack K. A. Acne and insulin resistance: a systematic review and meta-analysis. *J. Am. Acad. Dermatol.* 2022. 87 (3). P. 687-688. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2021.12.033>
23. Chuan S. S., Chang R. J. Polycystic ovary syndrome and acne. *Ski. Ther. Lett.* 2010. 15 (10). P. 1-4. EID: 2-s2.0-79952113684
24. Krutmann J., Moyal D., Liu W., Kandahari S., Lee G.S., Nopadon N., Xiang L. F., Seit'e S.. Pollution and acne: is there a link? *Clin. Cosmet. Invest. Dermatol.* 2017. 10. P. 199-204. <https://doi.org/10.2147/CCID.S131323>
25. Meixiong J., Ricco C., Vasavda C., Ho B. K. Diet and acne: a systematic review. *JAAD.* 2022. Int 7. P. 95-112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jdin.2022.02.012>
26. Lee Y. B., Byun E. J., Kim H. S.. Potential role of the microbiome in acne: a comprehensive review. *J. Clin. Med.* 2019. 8 (7). P. 987. <https://doi.org/10.3390/jcm8070987>
27. Acer E., Erdogan H. K., Kocaturk, E., Agaoglu E., Saracoglu N., Bilgin M. Evaluation of Total Oxidant and Total Antioxidant Status in Patients with Acne Vulgaris. *Osman. J. Med.* 2022. 44. P. 654-658. <https://doi.org/10.20515/otd.1054335>
28. Ibrahim M.A., Helmy M.E., Sabry H.H., Farouk S.M., Ebrahim L.Y., Amer E.R. Evaluation of Biomarkers of Oxidant–Antioxidant Balance in Patients with Acne Vulgaris. *J. Egypt. Womens Dermatol. Soc.* 2015. 12. P. 136-141. <https://doi.org/10.3390/life13071433>
29. Wroński A., Wójcik P. Impact of ROS-Dependent Lipid Metabolism on Psoriasis Pathophysiology. *Int. J. Mol. Sci.* 2022. 23. P. 12137. <https://doi.org/10.3390/ijms232012137>
30. Popa G. L., Mitran C. I., Mitran M. I., Tampa M., Matei C., Popa M. I., Georgescu S. R. Markers of Oxidative Stress in Patients with Acne: A Literature Review. *Life.* 2023. 13. P. 1433. <https://doi.org/10.3390/life13071433>
31. Capitanio B., Lora V., Ludovici M., Sinagra J.-L., Ottaviani M., Mastrofrancesco A., Ardigo M., Camera E. Modulation of Sebum Oxidation and Interleukin-1 α Levels Associates with Clinical Improvement of Mild Comedonal Acne. *J. Eur. Acad. Dermatol. Venereol.* 2014. 28. P. 1792-1797. <https://doi.org/10.1111/jdv.12431>
32. Korkmaz S., Ozgun E. Elevated Serum Levels of 8-Hydroxy-2-Deoxyguanosine in Mild-Moderate Acne Vulgaris. *Med.-Sci.* 2018. 7. P. 319-321. <https://doi.org/10.5455/medscience.2017.06.8705>
33. El Hadidia H. H., Mashaly H. M., Mohamed G. S., Emam H., El Fawy S. Comparison between Serum Level of Superoxide Dismutase, Malondialdehyde, and DNA Damage in Acne Vulgaris and Vitiligo Patients. *J. Egypt. Womens Dermatol. Soc.* 2016. 13. P. 173-179. <https://doi.org/10.1097/01.EWX.0000482792.76474.f3>

34. Tampa M., Mitran C. I., Mitran, M. I., Amuzescu A., Matei C., Georgescu S. R. Ischemia-Modified Albumin—A Potential New Marker of Oxidative Stress in Dermatological Diseases. *Medicina* 2022. 58. P. 669. <https://doi.org/10.3390/medicina58050669>
35. Tain Y.-L., Hsu C.-N. Toxic Dimethylarginines: Asymmetric Dimethylarginine (ADMA) and Symmetric Dimethylarginine (SDMA). *Toxins*. 2017. 9. P. 92. <https://doi.org/10.3390/toxins9030092>
36. Zinellu A., Fois A. G., Sotgia S., Sotgiu E., Zinellu E., Bifulco F., Mangoni A. A., Pirina P., Carru C. Arginines Plasma Concentration and Oxidative Stress in Mild to Moderate COPD. *PLoS ONE*. 2016. 11. P. e0160237. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160237>
37. Tunçez Akyürek F., Saylam Kurtipek G., Kurku H., Akyurek F., Unlu A., Abusoglu S., Ataseven A. Assessment of ADMA, IMA, and Vitamin A and E Levels in Patients with Acne Vulgaris. *J. Cosmet. Dermatol.* 2020. 19. P. 3408-3413. <https://doi.org/10.1111/jocd.13590>
38. Mitran C. I., Mitran M. I., Popa M. I. Antioxidants as Defense Mechanisms Against Viral Pathogens. *Proc. Rom. Acad. Ser. B.* 2021. 23. P. 189-195.
39. Garem Y., Ahmed R., Ragab M., AbouZeid A. Study of Oxidative Stress in Different Clinical Severities of Acne Vulgaris. *Egypt J. Derm. Venerol.* 2014. 34. P. 53. <https://doi.org/10.4103/1110-6530.137313>
40. Al-Shobaili H. A. Oxidants and Anti-Oxidants Status in Acne Vulgaris Patients with Varying Severity. *Ann. Clin. Lab. Sci.* 2014. 44. P. 202-207.
41. Ozuguz P., Dogruk Kacar S., Ekiz O., Takci Z., Balta I., Kalkan G. Evaluation of Serum Vitamins A and E and Zinc Levels According to the Severity of Acne Vulgaris. *Cutan. Ocul. Toxicol.* 2014. 33. P. 99-102. <https://doi.org/10.3109/15569527.2013.808656>

References

1. Bungau, A. F., Radu, A. F., Bungau, S. G., Vesa, C. M., Tit, D. M., Endre, L. M. (2023). Oxidative stress and metabolic syndrome in acne vulgaris: Pathogenetic connections and potential role of dietary supplements and phytochemicals. *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 164. P. 115003 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2023.115003>
2. Dréno, B. (2017). What is new in the pathophysiology of acne, an overview. *J Eur Acad Dermatol Venereol.* 31. Suppl 5. P. 8-12 [in English]. <https://doi.org/10.1111/jdv.14374>
3. Pizzino, G., Irrera, N., Cucinotta, M., Pallio, G., Mannino, F., Arcoraci, F., Squadrito, F., Altavilla, D., Bitto, A. (2017). Oxidative Stress: Harms and Benefits for Human Health. *Oxid. Med Cell Longev.* 2017. P. 8416763 [in English]. <https://doi.org/10.1155/2017/8416763>
4. Abdel-Daim, M. M., Abo-El-Sooud, K., Aleya, L., Bungau, S. G., Najda, A., Saluja, R. (2018). Alleviation of Drugs and Chemicals Toxicity: Biomedical Value of Antioxidants. *Oxid. Med Cell Longev.* 2018. P. 6276 [in English]. <https://doi.org/10.1155/2018/6276438>
5. Pai, V.V., Shukla, P., Kikkeri, N.N. (2014). Antioxidants in dermatology. *Indian Dermatol. Online J.* 5 (2). P. 210–214 [in English]. <https://doi.org/10.4103/2229-5178.131127>
6. Mayslich, C., Grange, P. A., Dupin, N. (2021). Cutibacterium acnes as an opportunistic pathogen: an update of its virulence-associated factors. *Microorganisms.* 9 (2). P. 303 [in English]. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9020303>
7. Briganti, S., Picardo, M. (2003). Antioxidant activity, lipid peroxidation and skin diseases. What's new. *J. Eur. Acad. Dermatol. Venereol.* 17 (6). P. 663-669 [in English]. <https://doi.org/10.1046/j.1468-3083.2003.00751.x>
8. Tochio, T., Tanaka, H., Nakata, S., Ikeno, H. (2009). Accumulation of lipid peroxide in the content of comedones may be involved in the progression of comedogenesis and inflammatory changes in comedones. *J. Cosmet. Dermatol.* 8 (2). P.152-158 [in English]. <https://doi.org/10.1111/j.1473-2165.2009.00437.x>
9. Yen, C.L., Monetti, M., Burri, B. J., Farese, Jr. R. V. (2005). The triacylglycerol synthesizing enzyme DGAT1 also catalyzes the synthesis of diacylglycerols, waxes, and retinyl esters. *J. Lipid Res.* 46 (7). P. 1502–1511 [in English]. <https://doi.org/10.1194/jlr.M500036-JLR200>
10. Smith, K.R., Thiboutot, D.M. (2008). Thematic review series: skin lipids. Sebaceous gland lipids: friend or foe? *J. Lipid Res.* 49 (2). P. 271–281 [in English]. <https://doi.org/10.1194/jlr.R700015-JLR200>

11. Thuillier, P., Brash, A. R., Kehrer, J. P., Stimmel, J. B., Leesnitzer, L. M., Yang, P., Newman, R. A., Fischer, S. M. (2002). Inhibition of peroxisome proliferator-activated receptor (PPAR)-mediated keratinocyte differentiation by lipoxygenase inhibitors. *Biochem J.* 366 (Pt 3). P. 901-910 [in English]. <https://doi.org/10.1042/bj20020377>
12. Zouboulis, C. C., Nestoris, S., Adler, Y. D., Orth, M., Orfanos, C. E., Picardo, M., Camera, E., Cunliffe, W. J. (2003). A new concept for acne therapy: a pilot study with zileuton, an oral 5-lipoxygenase inhibitor. *Arch. Dermatol.* 139 (5). P. 668-670 [in English]. <https://doi.org/10.1001/archderm.139.5.668>
13. Holland, D. B., Jeremy, A. H. (2005). The role of inflammation in the pathogenesis of acne and acne scarring. *Semin Cutan. Med Surg.* 24 (2). P. 79-83 [in English].
14. Jeremy, A. H., Holland, D. B., Roberts, S. G., Thomson, K. F., Cunliffe, W. J. (2003). Inflammatory events are involved in acne lesion initiation. *J. Invest Dermatol.* 121 (1). P. 20-27 [in English]. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1747.2003.12321.x>
15. Perihan, O., Ergul, K. B., Neslihan, D., Filiz, A. (2012). The activity of adenosine deaminase and oxidative stress biomarkers in scraping samples of acne lesions. *J. Cosmet. Dermatol.* 11 (4). P. 323-328 [in English]. <https://doi.org/10.1111/jocd.12011>
16. Ozuguz, P., Dogruk Kacar, S., Ekiz, O., Takci, Z., Balta, I., Kalkan, G. (2014). Evaluation of serum vitamins A and E and zinc levels according to the severity of acne vulgaris. *Cutan. Ocul. Toxicol.* 33 (2). P. 99-102 [in English]. <https://doi.org/10.3109/15569527.2013.808656>
17. Gori, A., Fabroni, C., Prignano, F., Lotti, T. (2010). Unusual presentation of tuberculosis in an infliximab-treated patient—which is the correct TB screening before starting a biologic? *Dermatol. Ther.* 23 (Suppl 1). P. S1-S3 [in English]. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8019.2009.01278.x>
18. Erturan, I., Naziroglu, M., Akkaya, V. B. (2012). Isotretinoin treatment induces oxidative toxicity in blood of patients with acne vulgaris: a clinical pilot study. *Cell Biochem Funct.* 30 (7). P. 552-557 [in English]. <https://doi.org/10.1002/cbf.2830>
19. Saleh, H. M. A., Alzawahry, K. M. A., Gad, R. E. M. (2020). Assessment of Plasma Malondialdehyde in Acne Patients on Isotretinoin Therapy. *QJM: Int. J. Med.* 113 (Supplement_1). hcaa046.007 [in English]. <https://doi.org/10.1093/qjmed/hcaa046.007>
20. Ottaviani, M., Alestas, T., Flori, E., Mastrofrancesco, A., Zouboulis, C. C., Picardo, M. (2006). Peroxidated squalene induces the production of inflammatory mediators in HaCaT keratinocytes: a possible role in acne vulgaris. *J. Invest Dermatol.* 126 (11). P. 243-2437 [in English]. <https://doi.org/10.1038/sj.jid.5700434>
21. Borelli, C., Merk, K., Schaller, M., Jacob, K., Vogeser, M., Weindl, G., Berger, U., Plewig, G. (2006). *In vivo* porphyrin production by *P. acnes* in untreated acne patients and its modulation by acne treatment. *Acta Derm. Venereol.* 86 (4). P. 316-31 [in English]. <https://doi.org/10.2340/00015555-0088>
22. Nickles, M. A., Sharma, D., Tsoukas, M. M., Ashack, K. A. (2022). Acne and insulin resistance: a systematic review and meta-analysis. *J. Am. Acad. Dermatol.* 87 (3). P. 687-688 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.jaad.2021.12.033>
23. Chuan, S. S., Chang, R. J. (2010). Polycystic ovary syndrome and acne. *Ski. Ther. Lett.* 15 (10). P. 1-4. EID: 2-s2.0-79952113684 [in English].
24. Krutmann, J., Moyal, D., Liu, W., Kandahari, S., Lee, G. S., Nopadon, N., Xiang, L. F., Seité, S. (2017). Pollution and acne: is there a link? *Clin. Cosmet. Invest. Dermatol.* 10. P. 199-204 [in English]. <https://doi.org/10.2147/CCID.S131323>
25. Meixiong, J., Ricco, C., Vasavda, C., Ho, B. K. (2022). Diet and acne: a systematic review. *JAAD. Int* 7. P. 95-112 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.jdin.2022.02.012>
26. Lee, Y. B., Byun, E. J., Kim, H. S. (2019). Potential role of the microbiome in acne: a comprehensive review. *J. Clin. Med.* 8 (7). P. 987 [in English]. <https://doi.org/10.3390/jcm8070987>
27. Acer, E., Erdogan, H. K., Kocaturk, E., Agaoglu, E., Saracoglu, N., Bilgin, M. (2022). Evaluation of Total Oxidant and Total Antioxidant Status in Patients with Acne Vulgaris. *Osman. J. Med.* 44. P. 654-658 [in English]. <https://doi.org/10.20515/otd.1054335>
28. Ibrahim, M. A., Helmy, M. E., Sabry, H. H., Farouk, S. M., Ebrahim, L. Y., Amer, E. R. (2015). Evaluation of Biomarkers of Oxidant–Antioxidant Balance in Patients with Acne Vulgaris. *J. Egypt. Womens Dermatol. Soc.* 12. P. 136-141 [in English]. <https://doi.org/10.3390/life13071433>

29. Wroński, A., Wójcik, P. (2022). Impact of ROS-Dependent Lipid Metabolism on Psoriasis Pathophysiology. *Int. J. Mol. Sci.* 23. P. 12137 [in English]. <https://doi.org/10.3390/ijms232012137>
30. Popa, G. L., Mitran, C. I., Mitran, M. I., Tampa, M., Matei, C., Popa, M. I., Georgescu, S. R. (2023). Markers of Oxidative Stress in Patients with Acne: A Literature Review. *Life*. 13. P. 1433 [in English]. <https://doi.org/10.3390/life13071433>
31. Capitanio, B., Lora, V., Ludovici, M., Sinagra, J.-L., Ottaviani, M., Mastrofrancesco, A., Ardigò, M., Camera, E. (2014). Modulation of Sebum Oxidation and Interleukin-1 α Levels Associates with Clinical Improvement of Mild Comedonal Acne. *J. Eur. Acad. Dermatol. Venereol.* 28. P. 1792-1797 [in English]. <https://doi.org/10.1111/jdv.12431>
32. Korkmaz, S., Ozgun, E. (2018). Elevated Serum Levels of 8-Hydroxy-2-Deoxyguanosine in Mild-Moderate Acne Vulgaris. *Med.-Sci.* 7. P. 319-321 [in English]. <https://doi.org/10.5455/medscience.2017.06.8705>
33. El Hadidia, H. H., Mashaly, H. M., Mohamed, G. S., Emam, H., El Fawy, S. (2016). Comparison between Serum Level of Superoxide Dismutase, Malondialdehyde, and DNA Damage in Acne Vulgaris and Vitiligo Patients. *J. Egypt. Womens Dermatol. Soc.* 13. P. 173-179 [in English]. <https://doi.org/10.1097/01.EWX.0000482792.76474.f3>
34. Tampa, M., Mitran, C. I., Mitran, M. I., Amuzescu, A., Matei, C., Georgescu, S. R. (2022). Ischemia-Modified Albumin—A Potential New Marker of Oxidative Stress in Dermatological Diseases. *Medicina* 58, P. 669 [in English]. <https://doi.org/10.3390/medicina58050669>
35. Tain, Y.-L., Hsu, C.-N. (2017). Toxic Dimethylarginines: Asymmetric Dimethylarginine (ADMA) and Symmetric Dimethylarginine (SDMA). *Toxins*. 9. P. 92 [in English]. <https://doi.org/10.3390/toxins9030092>
36. Zinellu, A., Fois, A. G., Sotgia, S., Sotgiu, E., Zinellu, E., Bifulco, F., Mangoni, A. A., Pirina, P., Carru, C. (2016). Arginines Plasma Concentration and Oxidative Stress in Mild to Moderate COPD. *PLoS ONE*. 11. P. e0160237 [in English]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160237>
37. Tunçez Akyürek, F., Saylam Kurtipek, G., Kurku, H., Akyurek, F., Unlu, A., Abusoglu, S., Ataseven, A. (2020). Assessment of ADMA, IMA, and Vitamin A and E Levels in Patients with Acne Vulgaris. *J. Cosmet. Dermatol.* 19. P. 3408-3413 [in English]. <https://doi.org/10.1111/jocd.13590>
38. Mitran, C. I., Mitran, M. I., Popa, M. I. (2021). Antioxidants as Defense Mechanisms Against Viral Pathogens. *Proc. Rom. Acad. Ser. B.* 23. P. 189-195 [in English].
39. Gareem, Y., Ahmed, R., Ragab, M., AbouZeid, A. (2014). Study of Oxidative Stress in Different Clinical Severities of Acne Vulgaris. *Egypt J. Derm. Venerol.* 34. P. 53 [in English]. <https://doi.org/10.4103/1110-6530.137313>
40. Al-Shobaili, H. A. (2014). Oxidants and Anti-Oxidants Status in Acne Vulgaris Patients with Varying Severity. *Ann. Clin. Lab. Sci.* 44. P. 202-207 [in English].
41. Ozuguz, P., Dogruk Kacar, S., Ekiz, O., Takci, Z., Balta, I., Kalkan, G. (2014). Evaluation of Serum Vitamins A and E and Zinc Levels According to the Severity of Acne Vulgaris. *Cutan. Ocul. Toxicol.* 33. P. 99-102 [in English]. <https://doi.org/10.3109/15569527.2013.808656>

Mohon L.

PhD student, Department of Biology,
Nizhyn Mykola Gogol State University
mohon.ludmila@gmail.com
orcid.org/0009-0000-1826-7545

**MODERN CONCEPTS OF THE ROLE OF OXIDATIVE STRESS
IN THE PATHOGENESIS OF ACNE**

Acne is one of the most common dermatological diseases in late childhood and adolescence. Acne is a pathological condition with a complex pathophysiology driven by immunological

and inflammatory processes, sebaceous gland hyperplasia, microbial hypercolonization, and follicular hyperkeratosis. Cutibacterium acnes synthesizes lipases and proteolytic enzymes, which may play a key role in the inflammatory phase. Additionally, acne is characterized by the formation of comedones and inflammatory lesions, followed by the development of dyspigmentation. To date, several hypotheses have been proposed, yet none fully elucidates the pathophysiological mechanisms and the entire spectrum of etiological factors. In acne, the composition of sebum secreted by pilosebaceous follicles undergoes changes, and reactive oxygen species (ROS) can be released from the destructively altered follicular walls. This process is considered a trigger for the progression of the inflammatory response in the etiology of this disease. Oxidative stress, often viewed exclusively as a destructive factor, may additionally perform potentially beneficial functions in the body, particularly in the context of redox signaling, where ROS function as signaling molecules in biological processes; this mechanism involves electron transfer reactions requiring the participation of free radicals, redox-active metals, or reducing equivalents. At physiological concentrations, ROS are capable of triggering signaling cascades that modulate cellular functions. In particular, hydrogen peroxide and the superoxide anion radical can influence the activity of transcription factors NF- κ B and AP-1, which control the expression of genes associated with cell growth, differentiation, and inflammation. These redox-sensitive signaling systems are involved in tissue regeneration, immune response, and stress adaptation. The aim of the study was a comprehensive analysis of scientific data regarding the role of oxidative stress in the pathogenesis of acne and approaches to assessing its clinical course. As a result of the study, it was proven that the intensification of oxidative stress and chronic inflammation play an important role in the pathogenesis of acne. Furthermore, the action of various hormones influences the onset and progression of this pathology. Adjuvant therapy, specifically the use of plant-derived compounds (phytopharmaceuticals), demonstrates positive results. Phytocompounds in most cases exhibit pronounced antioxidant and anti-inflammatory activity, reducing levels of oxidative stress and inflammation. A promising direction for future research is the study of the molecular mechanisms of pathophysiological processes in acne and the development of more effective therapeutic approaches, particularly the use of phytopharmaceuticals.

Keywords: *acne, oxidative stress, inflammation, oxidative stress markers.*

*Стаття до редакції надійшла 02.04.2026 року
Рецензія на статтю надійшла 20.04.2026 року*

УДК 616.12-008.331.1:577.112.083

DOI 10.31654/2786-8478-2026-BN-2-126-131

Мхітарян Л. С.

доктор медичних наук, професор,
професор кафедри біології
Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя
laurasmkhitaryan@gmail.com
orcid.org/0000-0002-2347-0107

Музиченко П. Ф.

доктор медичних наук, професор,
професор кафедри біології
Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя
metost@ukr.net
orcid.org/0000-0001-7876-106X

Плахотін В. Я.

кандидат біологічних наук, професор,
професор кафедри біології
Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя
tretia40@ukr.net
orcid.org/0000-0002-4994-5932

**РОЛЬ ОКИСНИХ МОДИФІКАЦІЙ В ПАТОГЕНЕЗІ
АРТЕРІАЛЬНОЇ ГІПЕРТЕНЗІЇ**

Енергетичне забезпечення людського організму повністю залежить від комплексних окисно-відновних перетворень, що становлять основу клітинного метаболізму. У цих біохімічних циклах активну участь беруть вільні радикали – високореакційні молекулярні структури з неспареними електронами. За умов надмірного накопичення та дефіциту ендогенних систем захисту вони провокують розвиток оксидативного стресу, який дестабілізує клітинний гомеостаз і запускає низку патологічних станів. На сьогодні дисбаланс редокс-процесів визнано одним із провідних механізмів формування серцево-судинних патологій, серед яких особливе місце посідає артеріальна гіпертензія. Цей синдром набув характеру глобальної неінфекційної пандемії, виступаючи головним тригером таких небезпечних судинних катастроф, як гострий інфаркт міокарда, інсульт та хронічна ішемія серця. Вагомим проявом деструктивного впливу вільних радикалів є окисна модифікація протеїнів. Порушення первинної та просторової структури білкових молекул під дією редокс-агентів призводить до втрати їхніх функціональних властивостей, що блокує нормальний перебіг внутрішньоклітинного обміну та суттєво знижує життєздатність тканин. Глибоке розуміння молекулярних закономірностей оксидативного стресу та його патогенетичної ролі в деструкції кардіоваскулярної системи є базою для створення інноваційних лікувально-профілактичних програм. Визначення маркерів оксидативного стресу дозволяє ідентифікувати патологічні зміни на доклінічному етапі, що є критично важливим для розробки ефективних стратегій профілактики. Деталізація цих біохімічних тригерів дозволить впровадити в клінічну практику нові терапевтичні мішені та стратегії спрямованого редокс-контролю, що допоможе мінімізувати судинні ускладнення й покращити прогноз для пацієнтів із кардіоваскулярним профілем.

Ключові слова: окисні модифікації, оксидативний стрес, продукти окислення ліпідів, продукти окислення білків, артеріальна гіпертензія, серцево-судинні захворювання.

Постановка проблеми. Життєдіяльність людського організму ґрунтується на складних окисно-відновних процесах, які постачають енергію клітинам. Ці метаболічні реакції супроводжуються утворенням вільних радикалів – агресивних молекул з неспареним електроном, які прагнуть «відібрати» електрон у сусідніх структурах, що веде до формування перекисних сполук. У нормальних умовах організм регулює ці процеси завдяки системі антиоксидантного захисту. Проте, коли баланс між оксидами та антиоксидантами порушується, це призводить до оксидативного стресу, який може мати серйозні наслідки.

Сучасні дослідження підтверджують, що оксидативний стрес має вирішальне значення у розвитку кардіоваскулярних захворювань, зокрема артеріальної гіпертензії. Це захворювання стало глобальною епідемією, яке вражає понад 40% населення України, і є ключовим фактором ризику для багатьох тяжких кардіоваскулярних ускладнень. Оксидативний стрес виступає основним пусковим механізмом у розвитку атеросклерозу, що, своєю чергою, погіршує роботу серцево-судинної системи. Важливо також зазначити роль окисної модифікації білків, яка є не лише наслідком метаболічних розладів, а й первинним патогенетичним механізмом, що може призвести до серйозних функціональних порушень у клітинах. Отже, дослідження оксидативного стресу та його впливу на серцево-судинну систему є надзвичайно важливими для розробки нових стратегій профілактики та лікування артеріальної гіпертензії та супутніх захворювань.

Мета досліджень – проаналізувати сучасні уявлення про роль окисних модифікацій в патогенезі артеріальної гіпертензії.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сучасні наукові дослідження підтверджують, що оксидативний стрес відіграє фундаментальну роль у патогенезі кардіоваскулярних порушень. Його розглядають не просто як супутній фактор, а як ключову первинну ланку, що запускає хворобу, або вторинний механізм, який значно обтяжує перебіг уже наявних патологій. Особливе місце оксидативний стрес посідає у розвитку артеріальної гіпертензії [1].

На сьогодні артеріальна гіпертензія (АГ) набула масштабів глобальної епідемії, будучи одним із найпоширеніших захворювань у світі. В Україні ця проблема стоїть особливо гостро, адже на високий артеріальний тиск страждає понад 40 % населення. Небезпека АГ полягає не лише у самому підвищенні тиску, а й у тому, що вона є фундаментальним фактором ризику для розвитку тяжких кардіоваскулярних катастроф. Зокрема, гіпертензія стає підґрунтям для виникнення ішемічної хвороби серця, інфаркту міокарда, гострого мозкового інсульту та може призвести до раптової зупинки серця [2, 3].

Важливою ланкою у виникненні артеріальної гіпертензії є розвиток судинного атеросклерозу, де оксидативний стрес виступає основним пусковим механізмом. Порушуються всі види обмінних процесів, зокрема клітинне (тканинне) дихання, що позбавляє органи необхідної енергії.

У тканинах стрімко зростає концентрація агресивних продуктів розпаду – перекисів ліпідів та окисно модифікованих білків. Ці токсичні сполуки безпосередньо пошкоджують стінки судин, сприяючи утворенню атеросклеротичних бляшок та подальшому закріпленню стійкої гіпертензії.

При інтенсифікації вільнорадикальних процесів, коли швидкість генерування радикалів перевищує потужність детоксикаційних систем, виникає глибока дестабілізація метаболізму, включаючи пригнічення тканинного дихання. Наслідком цього дисбалансу є масивне накопичення продуктів ліпопероксидації та окиснювальної деструкції білків, що спричиняє токсичне ураження клітин [4].

Сучасні біохімічні дослідження вказують на те, що за умов інтенсифікації вільнорадикальних процесів первинними мішенями для агресивної дії активних форм кисню (АФК) стають білкові компоненти плазматичних мембран. Хоча тривалий час увага дослідників була зосереджена на пероксидному окисненні ліпідів (ПОЛ), останні

дані підтверджують, що окисна модифікація білків (ОМБ) є не лише паралельним, а часто й випереджальним процесом, що детермінує життєздатність клітини [5].

Висока чутливість мембранних білків до окиснення зумовлена специфікою їхньої структури та локалізацією. АФК атакують поліпептидний ланцюг, що призводить до низки структурних трансформацій. Окиснення бічних ланцюгів амінокислот (проліну, аргініну, лізину, треоніну) супроводжується утворенням карбонільних похідних. Збільшення концентрації карбонільних груп є верифікованим маркером інтенсивності окислативного пошкодження тканин. Радикальна атака ініціює як фрагментацію поліпептидних зв'язків, так і утворення міжмолекулярних «зшивок» (агрегатів). Це призводить до накопичення функціонально неактивних білкових конгломератів, резистентних до протеолітичного розщеплення. Окиснення тіолових груп (-SH) цистеїну критично змінює конформацію активних центрів ферментів та іонних каналів, нівелюючи їхню каталітичну та транспортну активність [6].

З огляду на складну ієрархічну архітектуру та гетерогенність хімічного складу протеїнів, процес їхньої окисної модифікації (ОМБ) характеризується багатофакторністю та формуванням широкого спектра дериватів. На відміну від пероксидного окиснення ліпідів, ОМБ ініціює утворення великої кількості продуктів як радикальної, так і нерадикальної природи, що призводить до стрімкої мобілізації та подальшого виснаження ендogenous антиоксидантних систем клітини [7].

Завдяки наявності різноманітних функціональних груп у бічних ланцюгах амінокислот, атака активними формами кисню призводить до незворотних конформаційних змін. Це супроводжується утворенням карбонільних сполук, білковідцентрованих радикалів та гідропероксидів, що створює умови для неконтрольованого ланцюгового пошкодження внутрішньоклітинних структур. Окиснення білків виступає не просто наслідком метаболічного збою, а первинним патогенетичним ешеленом. Оскільки білки є основними каталізаторами (ферментами) та структурними компонентами мембран, їхня модифікація «вимикає» життєво важливі функції клітини ще до появи видимих ознак деструкції ліпідного бішару. У сучасній біохімії ОМБ розглядається як найбільш ранній та чутливий індикатор розвитку окислативного стресу. Це зумовлено високою швидкістю взаємодії білків з радикалами та відносною стабільністю утворених карбонільних груп порівняно з нестійкими продуктами ліпопероксидації. Це дозволяє ідентифікувати патологічні зміни на доклінічному етапі, особливо при серцево-судинних та метаболічних захворюваннях. Масивна ОМБ призводить до деградації протеосом та порушення енергетичного метаболізму, що робить процес виснаження антиоксидантних ресурсів незворотним за відсутності терапевтичної корекції [8].

Окисна деструкція протеїнів ініціює каскад функціональних порушень, включаючи інактивацію ферментів, втрату зв'язувальної здатності рецепторів, а також зростання схильності білків до агрегації, протеолізу та зміни їхніх імуногенних властивостей [9].

Важливою перевагою оцінки окисної модифікації білків як біомаркера є її висока верифікаційна здатність. На відміну від продуктів перекисного окиснення ліпідів, які піддаються швидкій деградації під впливом пероксидаз та антиоксидантного захисту, окиснені білкові деривати характеризуються значною стабільністю. Це робить деструкцію білків надійнішим та інформативнішим показником при моніторингу окислативного пошкодження тканин, ніж аналіз ліпідних пероксидів [10].

Атака радикалів на пептидний зв'язок призводить до розриву ланцюга до утворення ковалентних «зшивок» між білками. Це створює нерозчинні конгломерати, які забивають клітину. Окиснені білки розпізнаються імунною системою як «чужорідні» Це запускає автоімунні відповіді та хронічне запалення, що є критичним при атеросклерозі та гіпертензії. Продукти перекисного окиснення ліпідів (наприклад, малоновий діальдегід – МДА) є надзвичайно реактивними та швидко метаболізуються (зникають за хвилини) [11]. Натомість карбонільні групи білків є хімічно стабільними

кінцевими продуктами. Вони можуть зберігатися в крові та тканинах від декількох годин до декількох діб. Білки містять амінокислоти (цистеїн, метіонін), які діють як «пастки» для вільних радикалів, поглинаючи до 50–70 % усіх активних форм кисню (АФК), що генеруються в клітині. Це робить білки «першою лінією оборони» і найранішим показником удару. Окиснення цього білка призводить до того, що клітина не може викачувати натрій. Це викликає набряк клітини, втрату електричного потенціалу та загибель (некроз). Модифікація білків-рецепторів на поверхні клітин судин робить їх нечутливими до сигналів розслаблення (наприклад, до оксиду азоту NO), що безпосередньо веде до зростання артеріального тиску [12].

Висновки. Окисно-відновні процеси, що забезпечують організм енергією, за певних умов спричиняють надмірне утворення вільних радикалів і розвиток оксидативного стресу. Цей стан є фундаментальним чинником виникнення кардіоваскулярних патологій, зокрема артеріальної гіпертензії, яка в Україні набула масштабів епідемії, вражаючи понад 40% населення. Окисна модифікація білків у цьому контексті виступає не лише наслідком метаболічних збоїв, а й ключовим механізмом пошкодження судин і розвитку атеросклерозу, що значно підвищує ризик інфарктів та інсультів.

Глибоче вивчення молекулярних механізмів окисного пошкодження білків відкриває нові перспективи для ранньої діагностики та персоналізованої терапії серцево-судинних захворювань. Визначення маркерів оксидативного стресу дозволяє ідентифікувати патологічні зміни на доклінічному етапі, що є критично важливим для розробки ефективних стратегій профілактики. Розуміння цих процесів дає можливість створювати новітні терапевтичні підходи, спрямовані на стабілізацію стану пацієнтів та покращення якості їхнього життя.

Список використаних джерел

1. Sies H., Jones D. P. Reactive oxygen species (ROS) as pleiotropic physiological signalling agents. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*. 2020. Vol. 21(7). P. 363–383. <https://doi.org/10.1038/s41580-020-0230-3>
2. Incalza M. A., D'Oria R., Natalicchio A. Oxidative stress and reactive oxygen species in endothelial dysfunction associated with cardiovascular and metabolic diseases. *Vascular Pharmacology*. 2018. Vol. 100. P. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.vph.2017.05.005>
3. Dubois-Deruy E., Peugnet V., Turkieh A. Oxidative Stress in Cardiovascular Diseases. *Antioxidants*. 2020. Vol. 9(9). P. 864. <https://doi.org/10.3390/antiox9090864>
4. Eskandarian R., Memarian M. Immune aspects of systemic hypertension; a short-review to recent concepts. *Journal of Nephropathology*. 2025. Vol. 14(3). P. 26570. <https://doi.org/10.34172/jnp.2025.26570>
5. Loperena R., Harrison D. G. Oxidative Stress and Inflammation in Hypertension. *Medical Clinics of North America*. 2021. Vol. 105(6). P. 1083–1094. <https://doi.org/10.1016/j.mcna.2021.06.004>
6. Tahrir F. G. Protein Carbonylation and Its Role in Cardiovascular Diseases. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 2021. Vol. 2021. P. 5531477. <https://doi.org/10.1155/2021/5531477>
7. Butterfield D. A., Boyd-Kimball D. Oxidative Stress, Amyloid- β Peptide, and Altered Key. Molecular Pathways in the Pathogenesis and Progression of Alzheimer's Disease. *Journal of Alzheimer's Disease*. 2018. Vol. 62(3). P. 1345–1367. <https://doi.org/10.3233/JAD-170543>
8. Butterfield D. A., Halliwell B. Oxidative stress, dysfunctional glucose metabolism and Alzheimer disease. *Nature Reviews Neuroscience*. 2019. Vol. 20(3). P. 148–160. <https://doi.org/10.1038/s41583-019-0132-6>
9. Tahrir F. G. Protein Carbonylation and Its Role in Cardiovascular Diseases. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 2021. Vol. 2021. P. 5531477. <https://doi.org/10.1155/2021/5531477>

10. Martínez-Orgado J., Martínez-Vega M., Silva L. Protein Carbonylation as a Biomarker of Oxidative Stress and a Therapeutic Target in Neonatal Brain Damage. *Antioxidants*. 2023. Vol. 12(10). P. 1839. <https://doi.org/10.3390/antiox12101839>.
11. Sies H. Oxidative Stress: Concept and Some Practical Aspects. *Antioxidants*. 2020. Vol. 9(9). P. 852. <https://doi.org/10.3390/antiox9090852>.
12. Горбач Т. В. Маркери окисного стресу та стан антиоксидантного захисту у пацієнтів з артеріальною гіпертензією. *Медична та клінічна хімія*. 2022. Т. 24, № 3. С. 34–40.
13. Edet O. O., Omon E. A., Odewusi O. O. The role of protein carbonylation in various diseases: A review. *Integrated Health Research Journal*. 2025. Vol. 2(1). P. 14–26. <https://doi.org/10.47963/ihrj.v2i1.2061>

References

1. Sies, H., Jones, D. P. (2020). Reactive oxygen species (ROS) as pleiotropic physiological signalling agents. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*. Vol. 21, № 7. P. 363–383. <https://doi.org/10.1038/s41580-020-0230-3> [in English].
2. Incalza, M. A., D'Oria, R., Natalicchio, A. (2018). Oxidative stress and reactive oxygen species in endothelial dysfunction associated with cardiovascular and metabolic diseases. *Vascular Pharmacology*. Vol. 100. P. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.vph.2017.05.005> [in English].
3. Dubois-Deruy, E., Peugnet, V., Turkieh, A. (2020). Oxidative Stress in Cardiovascular Diseases. *Antioxidants*. Vol. 9, № 9. P. 864. <https://doi.org/10.3390/antiox9090864> [in English].
4. Eskandarian, R., Memarian, M. (2025). Immune aspects of systemic hypertension; a short-review to recent concepts. *Journal of Nephropathology*. Vol. 14, № 3. P. 26570. <https://doi.org/10.34172/jnp.2025.26570> [in English].
5. Loperena, R., Harrison, D., G. (2021). Oxidative Stress and Inflammation in Hypertension. *Medical Clinics of North America*. Vol. 105, № 6. P. 1083–1094. <https://doi.org/10.1016/j.mcna.2021.06.004> [in English].
6. Tahrir, F. G. (2021). Protein Carbonylation and Its Role in Cardiovascular Diseases. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. Vol. 2021. P. 5531477. <https://doi.org/10.1155/2021/5531477> [in English].
7. Butterfield, D. A., Boyd-Kimball, D. (2018). Oxidative Stress, Amyloid- β Peptide, and Altered Key. Molecular Pathways in the Pathogenesis and Progression of Alzheimer's Disease. *Journal of Alzheimer's Disease*. Vol. 62, № 3. P. 1345–1367. <https://doi.org/10.3233/JAD-170543> [in English].
8. Butterfield, D. A., Halliwell, B. (2019). Oxidative stress, dysfunctional glucose metabolism and Alzheimer disease. *Nature Reviews Neuroscience*. Vol. 20, № 3. P. 148–160. <https://doi.org/10.1038/s41583-019-0132-6> [in English].
9. Tahrir, F. G. (2021). Protein Carbonylation and Its Role in Cardiovascular Diseases. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. Vol. 2021. P. 5531477. <https://doi.org/10.1155/2021/5531477> [in English].
10. Martínez-Orgado, J., Martínez-Vega, M., Silva, L. (2023). Protein Carbonylation as a Biomarker of Oxidative Stress and a Therapeutic Target in Neonatal Brain Damage. *Antioxidants*. Vol. 12, № 10. P. 1839. <https://doi.org/10.3390/antiox12101839> [in English].
11. Sies, H. (2020). Oxidative Stress: Concept and Some Practical Aspects. *Antioxidants*. Vol. 9, № 9. P. 852. <https://doi.org/10.3390/antiox9090852> [in English].
12. Horbach, T. V. (2022). Markery okysnoho stresu ta stan antyoksydantnoho zakhystu u patsientiv z arterialnoiu hipertenziieiu. *Medychna ta klinichna khimiia*. Т. 24, № 3. С. 34–40 [in Ukrainian].
13. Edet, O. O., Omon, E., A., Odewusi, O., O., Nze, A., N., Oyetunde, A., B., Agwu, M., C. (2025). The role of protein carbonylation in various diseases: A review. *Integrated Health Research Journal*. Vol. 2, № 1. P. 14–26. <https://doi.org/10.47963/ihrj.v2i1.2061> [in English].

Mkhitaryan L.

doctor of medical sciences, professor,
Professor of the Department of Biology
Nizhyn Mykola Gogol State University
laurasmkhitaryan@gmail.com
orcid.org/0000-0002-2347-0107

Muzychenko P.

doctor of medical sciences, professor,
Professor of the Department of Biology
Nizhyn Mykola Gogol State University
metost@ukr.net
orcid.org/ 0000-0001-7876-106X

Plakhotin V.

candidate of biological sciences, professor,
Professor of the Department of Biology
Nizhyn Mykola Gogol State University
tretia40@ukr.net
orcid.org/0000-0002-4994-5932

**THE ROLE OF OXIDATIVE MODIFICATIONS
IN THE PATHOGENESIS OF HYPERTENSION**

The human body's energy supply depends entirely on complex redox reactions, which form the basis of cellular metabolism. Free radicals – highly reactive molecular structures with unpaired electrons – play an active role in these biochemical cycles. Under conditions of excessive accumulation and a deficiency of endogenous defense systems, they trigger the development of oxidative stress, which destabilizes cellular homeostasis and initiates a series of pathological conditions. Today, an imbalance in redox processes is recognized as one of the leading mechanisms in the development of cardiovascular pathologies, among which arterial hypertension holds a special place. This syndrome has taken on the character of a global non-infectious pandemic, acting as the main trigger for such dangerous vascular events as acute myocardial infarction, stroke, and chronic cardiac ischemia. A significant manifestation of the destructive effect of free radicals is the oxidative modification of proteins. Disruption of the primary and spatial structure of protein molecules under the action of redox agents leads to the loss of their functional properties, which blocks the normal course of intracellular metabolism and significantly reduces tissue viability. A deep understanding of the molecular mechanisms of oxidative stress and its pathogenic role in the destruction of the cardiovascular system forms the basis for the development of innovative therapeutic and preventive programs. Determination of oxidative stress markers allows for the identification of pathological changes at the preclinical stage, which is critically important for developing effective prevention strategies. A detailed understanding of these biochemical triggers will enable the introduction of new therapeutic targets and strategies for targeted redox control into clinical practice, which will help minimize vascular complications and improve the prognosis for patients with cardiovascular conditions.

Keywords: oxidative modifications, oxidative stress, lipid peroxidation products, protein oxidation products, hypertension, cardiovascular diseases.

*Стаття до редакції надійшла 06.04.2026 року
Рецензія на статтю надійшла 17.04.2026 року*

ІНДЕКСУВАННЯ НАУКОВОГО ЗБІРНИКА



Google Scholar



Наукова періодика України
Національна бібліотека України
імені Вернадського

**Open Ukrainian
Citation Index**

Open Ukrainian Citation Index
(OUCI)



CrossRef



Bielefeld Academic Search Engine
(BASE)



Directory of Open Access scholarly
Resources (ROAD)