

Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН України / Yuriev Plant Production Institute of NAAS of Ukraine

Інститут харчової біотехнології та геноміки НАН України / Institute of Food Biotechnology and Genomics of NAS of Ukraine

Всеукраїнська асоціація біологів рослин / All-Ukrainian Association of Plant Biologists

Українське товариство фізіологів рослин / Ukrainian Society of Plant Physiologists

III МІЖНАРОДНА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ

«СТРЕС І АДАПТАЦІЯ РОСЛИН»



THIRD INTERNATIONAL
SCIENTIFIC CONFERENCE



"PLANT STRESS AND ADAPTATION"

9-10 вересня 2026 р. / September 9-10, 2026

ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ

ABSTRACTS

Харків / Kharkiv

2026

УДК 581.1:631

С 84

Стрес і адаптація рослин: Тези доповідей III-ої міжнародної наукової конференції (Харків, 9-10 вересня 2026 р.). Харків, 2026. 188 с.
[Електронне видання]

Plant Stress and Adaptation: Abstracts of the Third International Scientific Conference (Kharkiv, September 9-10, 2026). Kharkiv, 2026. 188 p.
[Electronic edition]

Рекомендовано до опублікування вченими радами Інституту рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН України (протокол № 8 від 20 серпня 2026 р.) і ДУ «Інститут харчової біотехнології та геноміки НАН України» (протокол № 12 від 27 серпня 2026 р.)

© Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва
НААН України

© ДУ «Інститут харчової біотехнології та
геноміки НАН України»

© Автори тез доповідей

Організаційний комітет

- Блюм Я.Б.** – д.б.н., проф., академік НАН України, директор Інституту харчової біотехнології та геноміки НАН України (*співголова Оргкомітету*)
- Коломацька В.П.** – д.с.-г.н., директор ІР НААН України (*співголова Оргкомітету*)
- Кузьмишина Н.В.** – к.с.-г.н., заступник директора з наукової роботи ІР НААН України
- Колупасєв Ю.Є.** – д.б.н., проф., зав. лабораторії фізіології та біохімії рослин ІР НААН України
- Васько Н.І.** – д.с.-г.н., учений секретар ІР НААН України
- Пірко Я.В.** – д.б.н., учений секретар Інституту харчової біотехнології та геноміки НАН України
- Приваліхін С.М.** – к.б.н., учений секретар Відділення загальної біології НАН України
- Реліна Л.І.** – к.б.н., п.н.с. відділу науково-інформаційного забезпечення та інтелектуальної власності ІР НААН України
- Ястреб Т.О.** – к.б.н., п.н.с. лабораторії фізіології та біохімії рослин ІР НААН України (*відповідальний секретар Оргкомітету*)

Програмний комітет

- Блюм Я.Б.** – д.б.н., проф., академік НАН України (Київ), *співголова Програмного комітету*
- Колупасєв Ю.Є.** – д.б.н., проф. (Харків), *співголова Програмного комітету*
- Vainer A.O.** – PhD (Biol.) (Israel)
- Васько Н.І.** – д.с.-г.н. (Харків)
- Vítámvás P.** – Dr. Sci. (Biol.) (Czech Republic)
- Вожегова Р.А.** – д.с.-г.н., проф., академік НААН України (Одеса)
- Волков Р.А.** – д.б.н., проф. (Чернівці)
- Gudžinskas Z.** – Dr. Sci. (Biol.) (Lithuania)
- Ємець А.І.** – д.б.н., проф., чл.-кор. НАН України (Київ)
- Золотарьова О.К.** – д.б.н., проф. (Київ)
- Ісаєнков С.В.** – д.б.н. (Київ)
- Карпець Ю.В.** – д.б.н., проф. (Харків)
- Кириченко В.В.** – д.с.-г.н., проф., академік НААН України (Харків)
- Кияк Н.Я.** – д.б.н. (Львів)
- Кобизєва Л.Н.** – д.с.-г.н., проф., чл.-кор. НААН України (Харків)
- Козеко Л.Є.** – д.б.н. (Київ)
- Козуб Н.О.** – д.б.н. (Київ)
- Коломацька В.П.** – д.с.-г.н. (Харків)
- Косаківська І.В.** – д.б.н., проф. (Київ)
- Коць С.Я.** – д.б.н., проф., чл.-кор. НАН України (Київ)
- Кунах В.А.** – д.б.н., проф., чл.-кор. НАН України (Київ)
- Леонов О.Ю.** – д.с.-г.н. (Харків)
- Маренич М.М.** – д.с.-г.н., проф. (Полтава)
- Молодченкова О.О.** – д.б.н. (Одеса)
- Панчук І.І.** – д.б.н., проф. (Чернівці)
- Пірко Я.В.** – д.б.н. (Київ)
- Prášil I.T.** – Dr. Sci. (Biol.) (Czech Republic)
- Рябчун Н.І.** – д.с.-г.н. (Харків)
- Стасик О.О.** – д.б.н., чл.-кор. НАН України (Київ)
- Тригуб О.В.** – к.с.-г.н. (Устимівка, Полтавська обл.)
- Файт В.І.** – д.б.н., чл.-кор. НААН України (Одеса)
- Хареба В.В.** – д.с.-г.н., проф., академік НААН України (Київ)
- Chmielowska-Bąk J.** – PhD (Biol.) (Poland)
- Черчель В.Ю.** – д.с.-г.н., проф., академік НААН України (Дніпро)
- Шевченко М.В.** – д.с.-г.н., проф. (Харків)
- Якимчук Р.А.** – д.б.н., проф., чл.-кор. НАН України (Київ)
- Ястреб Т.О.** – к.б.н. (Харків)

Organizing Committee

- Blume Ya.B.** – Dr. Sci. (Biol.), Professor, Academician of NAS of Ukraine, Director of Institute of Food Biotechnology and Genomics of NAS of Ukraine (*Co-Chair of the Organizing Committee*)
- Kolomatska V.P.** – Dr. Sci. (Agricult.), Director of PPI NAAS of Ukraine (*Co-Chair of the Organizing Committee*)
- Kuzmishina N.V.** – PhD (Agricult.), Deputy Director for Scientific Work of PPI NAAS of Ukraine
- Kolupaev Yu.E.** – Dr. Sci. (Biol.), Professor, Head of Laboratory of Plant Physiology and Biochemistry of PPI NAAS of Ukraine
- Vasko N.I.** – Dr. Sci. (Agricult.), Scientific Secretary of PPI NAAS of Ukraine
- Pirko Ya.V.** – Dr. Sci. (Biol.), Scientific Secretary of Institute of Food Biotechnology and Genomics of NAS of Ukraine
- Pryvalikhin S.M.** – PhD (Biol.), Scientific Secretary of Department of General Biology of NAS of Ukraine
- Relina L.I.** – PhD (Biol.), Leading Researcher of Department of Scientific and Information Support and Intellectual Property of PPI NAAS of Ukraine
- Yastrebo T.O.** – PhD (Biol.), Leading Researcher of Laboratory of Plant Physiology and Biochemistry of PPI NAAS of Ukraine (*Executive Secretary of the Organizing Committee*)

Program Committee

- Blume Ya.B.** – Dr. Sci. (Biol.), Prof., Academician of NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine), *Co-Chair of the Program Committee*
- Kolupaev Yu.E.** – Dr. Sci. (Biol.), Prof. (Kharkiv, Ukraine), *Co-Chair of the Program Committee*
- Chmielowska-Bąk J.** – PhD (Biol.) (Poland)
- Cherchel V.Y.** – Dr. Sci. (Agricult.), Prof., Academician of NAAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)
- Fayt V.I.** – Dr. Sci. (Biol.), Corresponding Member of NAS of Ukraine (Odesa, Ukraine)
- Gudžinskas Z.** – Dr. Sci. (Biol.) (Lithuania)
- Isayenkov S.V.** – Dr. Sci. (Biol.) (Kyiv, Ukraine)
- Karpets Yu.V.** – Dr. Sci. (Biol.), Professor (Kharkiv, Ukraine)
- Khareba V.V.** – Dr. Sci. (Agricult.), Prof., Academician of NAAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
- Kobyzeva L.N.** – Dr. Sci. (Agricult.), Prof., Corresponding Member of NAAS of Ukraine (Kharkiv, Ukraine)
- Kolomatska V.P.** – Dr. Sci. (Agricult.) (Kharkiv, Ukraine)
- Kosakivska I.V.** – Dr. Sci. (Biol.), Prof. (Kyiv, Ukraine)
- Kots S.Ya.** – Dr. Sci. (Biol.), Prof., Corresponding Member of NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
- Kozeko L.Ye.** – Dr. Sci. (Biol.) (Kyiv, Ukraine)
- Kozub N.O.** – Dr. Sci. (Biol.) (Kyiv, Ukraine)
- Kyyak N.Ya.** – Dr. Sci. (Biol.) (Lviv, Ukraine)
- Kyrychenko V.V.** – Dr. Sci. (Agricult.), Prof., Academician of NAAS of Ukraine (Kharkiv, Ukraine)
- Kunakh V.A.** – Dr. Sci. (Biol.), Prof., Corresponding Member of NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
- Leonov O.Yu.** – Dr. Sci. (Agricult.), (Kharkiv, Ukraine)
- Marenych M.M.** – Dr. Sci. (Agricult.), Prof. (Poltava, Ukraine)
- Molodchenkova O.O.** – Dr. Sci. (Biol.) (Odesa, Ukraine)
- Panchuk I.I.** – Dr. Sci. (Biol.), Prof. (Chernivtsi, Ukraine)
- Pirko Ya.V.** – Dr. Sci. (Biol.) (Kyiv, Ukraine)
- Prášil I.T.** – Dr. Sci. (Biol.) (Czech Republic)
- Ryabchun N.I.** – Dr. Sci. (Agricult.) (Kharkiv, Ukraine)
- Shevchenko M.V.** – Dr. Sci. (Agricult.), Prof. (Kharkiv, Ukraine)
- Stasyk O.O.** – Dr. Sci. (Biol.), Corresponding Member of NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
- Tryhub O.V.** – PhD (Agricult.) (Ustymivka, Poltava region)
- Vainer A.O.** – PhD (Biol.) (Israel)
- Vasko N.I.** – Dr. Sci. (Agricult.) (Kharkiv, Ukraine)
- Vítámvás P.** – Dr. Sci. (Biol.) (Czech Republic)
- Volkov R.A.** – Dr. Sci. (Biol.), Prof. (Chernivtsi, Ukraine)
- Vozhehova R.A.** – Dr. Sci. (Agricult.), Prof., Academician of NAAS of Ukraine (Odesa, Ukraine)
- Yakymchuk R.A.** – Dr. Sci. (Biol.), Professor, Corresponding Member of NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
- Yastrebo T.O.** – PhD (Biol.) (Kharkiv, Ukraine)
- Yemets A.I.** – Dr. Sci. (Biol.), Professor, Corresponding Member of NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
- Zolotareva O.K.** – Dr. Sci. (Biol.), Professor (Kyiv, Ukraine)

ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ

ABSTRACTS

**ВНУТРІШНЬОГЕНОМНА МІНЛИВІСТЬ МІЖГЕННОГО СПЕЙСЕРА ГЕНІВ 5S
рРНК ЯК ПОТЕНЦІЙНИЙ МЕХАНІЗМ АДАПТАЦІЇ ДО СТРЕСУ НА ПРИКЛАДІ
ПЕРЛИННИЦІ АНТАРКТИЧНОЇ *COLOBANTHUS QUITENSIS***

І. О. Андрєєв, В. М. Мельник, І. І. Конвалюк, В. А. Кунах

*Інститут молекулярної біології і генетики НАН України,
м. Київ, Україна, e-mail: i.o.andreev@imbg.org.ua*

Рибосомні РНК (рРНК) є складовою частиною рибосом – клітинних органел, відповідальних за білковий синтез. Саме тому гени, які їх кодують, – невід’ємна частина геному будь-якого живого організму. Гени 5S рРНК (5S рДНК) кодують РНК, яка входить до складу великої субодиниці рибосоми. У геномі більшості насінних рослин вони представлені у вигляді тандемних повторів з чисельністю від кількох сотень до кількох тисяч, розташованих в одному або кількох хромосомних локусах. Повторювана одиниця 5S рДНК містить консервативну кодувальну ділянку довжиною близько 120 п.н., а також нетранскрибований міжгенний спейсер (МГС), який розділяє сусідні кодувальні ділянки. На відміну від кодувальної ділянки послідовність МГС характеризується високою мінливістю, завдяки чому вона є зручним і широко застосовуваним об’єктом для з’ясування питань еволюції геному, популяційної генетики, систематики та інших (Hemleben et al., 2021).

Перлиниця антарктична (*Colobanthus quitensis* (Kunth) Bartl. Caryophyllaceae) – один з двох видів судинних рослин, які пристосувалися до існування в екстремальних умовах Антарктики на межі адаптаційних можливостей. Незважаючи на низку досліджень, рибосомна ДНК і, зокрема 5S рДНК цього виду, залишається недослідженою. Так само практично відсутні публікації щодо молекулярної організації цієї послідовності в інших представників родини Caryophyllaceae.

Метою цієї роботи було дослідити нуклеотидну послідовність ділянки міжгенного спейсера 5S рДНК *C. quitensis*, проаналізувати її молекулярну організацію та охарактеризувати внутрішньогеномну мінливість.

Матеріали і методи. Для досліджень використали рослинний матеріал *C. quitensis*, зібраний на о. Скуа (Finger Point) під час XX Української антарктичної експедиції у лютому 2016 р. і люб’язно наданий співробітниками ДУ «Національний антарктичний науковий центр» МОН України. ДНК виділяли з сухого матеріалу пагонів, висушеного із використанням силікагелю, за модифікованою методикою з використанням ЦТАБ-буферу. Послідовність МГС 5S рДНК ампліфікували методом полімеразної ланцюгової реакції (ПЛР) з використанням пари праймерів, гомологічних до кодувальної ділянки. Отримані ПЛР-продукти після розділення методом електрофорезу в агарозному гелі вирізали та після очищення лігували в плазміді рUC18. Отримані плазмідні конструкції використовували для трансформації клітин *E. coli* (XL1-Blue). Нуклеотидну послідовність клонованих фрагментів ДНК визначали із використанням довгих M13-праймерів у GATC-Biotech (Нідерланди). Для аналізу нуклеотидних послідовностей застосовували програму Unipro UGENE.

Результати та обговорення. В результаті ПЛР ДНК *C. quitensis* утворювалися фрагменти розміром ~650 п.н. та в меншій кількості – розміром ~350 п.н. Після клонування отриманих фрагментів було відібрано 11 клонів ПЛР-продуктів для сиквенування, зокрема, 4 клони фрагментів довжиною ~ 650 п.н. (CqSkL1-3,5) і 7 клонів фрагментів розміром ~350 п.н. (CqSkS1-7). Сиквенування клонованих ПЛР-фрагментів 5S рДНК *C. quitensis* показало, що всі вони містять по боках частини кодувальної ділянки гена 5S рРНК, між якими знаходиться МГС. У фрагментів розміром 350 п.н. довжина ділянки МГС у трьох клонів становила 232 п.н. (S2, S6, S7), у решти (чотирьох) – 243 п.н. (S1, S3-5). У ПЛР-фрагментів розміром 650 п.н. МГС у двох з чотирьох клонів (L1 і L3) мав довжину 548 п.н. і ще у двох (L2 і L5) – 559 п.н. (Andreev et al., 2023).

Всі проаналізовані клони містять на початку протяжну ділянку (~40 нуклеотидів), сформовану кількома оліго-Т мотивами, яка виконує функцію термінатора транскрипції. Водночас, в усіх клонах МГС було знайдено також інші типові регуляторні елементи, описані для 5S рДНК *Arabidopsis thaliana* (Simon et al., 2018), що свідчить про потенційне збереження функції повторами 5S рДНК з МГС різного розміру. В результаті вирівнювання нуклеотидних послідовностей було встановлено, що відмінності між довгими і короткими МГС обумовлені відсутністю ділянки протяжністю понад 300 нуклеотидів в центральній частині спейсера. У клонів довгих МГС на по-

чатку цієї ділянки міститься два 13-нуклеотидні повтори TTTTGGGCCTTTC на відстані 31 нуклеотид один від одного, а в кінці – два тандемні повтори розміром 26 нуклеотидів. Крім того, знайдено відмінності за GC-складом: в довгих МГС він менший на кілька відсотків внаслідок меншого вмісту GC-пар в центральній частині спейсера, яка відсутня в короткого класу МГС. Порівняльний аналіз нуклеотидних послідовностей довгих і коротких варіантів МГС 5S рДНК *C. quitensis* дозволив виділити серед них окремі підкласи повторів, які також відрізняються за довжиною та нуклеотидною послідовністю. Загалом, ідентичність нуклеотидних послідовностей становила 98,4–99,1 % для довгих варіантів МГС і 84,3–100 % – для коротких. При порівнянні між собою довгих та коротких МГС ідентичність становила 84,4–96,4 %.

Результати цієї роботи вказують на існування в індивідуальному геномі *C. quitensis* щонайменше двох класів повторів 5S рДНК, які відрізняються за довжиною МГС більше, ніж удвічі, а також низки підкласів, що відрізняються за нуклеотидною послідовністю. Така гетерогенність 5S рДНК може свідчити про існування в геномі цього виду кількох хромосомних локусів, сформованих повторами різної довжини, які еволюціонують незалежно. Значний внесок поліплоїдії, і зокрема аллополіплоїдії, в еволюцію багатьох видів рослин є загальноновизнаним фактом. Хромосомне число рослин роду *Colobanthus* становить $2n=80$, що може вказувати на поліплоїдію (Bennett et al., 1982). Про те, що *C. quitensis* імовірно є тетраплоїдом, говориться в роботі (Bennett et al., 1982), а також свідчать дані дослідження вмісту ядерної ДНК цього виду (Cuba-Díaz et al., 2017). У такому випадку отримані результати можна пояснити тим, що цей вид є аллополіплоїдом, який імовірно утворився внаслідок гібридизації двох споріднених предкових видів, що містили в своєму геномі різні за довжиною, але достатньо близькі за нуклеотидною послідовністю рибосомні повтори.

Слід зазначити, що присутність в одному геномі класів МГС 5S рДНК, які суттєво відрізняються за довжиною, не є унікальною особливістю *C. quitensis*. У *Rosa nitida* (Rosaceae) один з клонів МГС 5S рДНК мав довжину 204 п.н., а решта – біля 400 п.н. (Tynkevych, Volkov, 2011). У *Landoltia punctata* (Araceae) довжина МГС 5S рДНК варіювала в межах від 151 до 524 п.н. (Chen et al., 2021). В обох випадках автори пояснюють це локалізацією повторів різних класів у різних хромосомних локусах 5S рДНК, що обмежує їхню гомогенізацію. На противагу цьому для багатьох рослин характерною є наявність в одному геномі кількох класів повторів 5S рДНК з різною послідовністю, але близьких за довжиною МГС (Volkov, 2021). Часто таке явище спостерігається у злаків. Так, наприклад, у геномі *D. antarctica*, іншої судинної рослини Антарктики, було знайдено декілька класів повторів 5S рДНК з незначною різницею за розміром (199–204 п.н.), але з істотними відмінностями за нуклеотидною послідовністю (з ідентичністю в межах 81,1–83,8 %) (Ishchenko et al., 2018). Варіанти рибосомних повторів з довжиною МГС 173 та 190 п.н. та ідентичністю послідовності 81,2–94,8 % виявлені також у *Avenella flexuosa* (Ishchenko et al., 2020).

Таким чином, в індивідуальному геномі *C. quitensis* виявлено щонайменше два класи повторів 5S рДНК, які істотно відрізняються за довжиною і нуклеотидною послідовністю МГС. Ми припускаємо, що формування і збереження в геномі варіантів 5S рДНК, які відрізняються за послідовністю МГС, можна розглядати як потенційний механізм адаптації до постійного стресу. Внутрішньогеномний поліморфізм 5S рДНК здатний забезпечувати еволюційну гнучкість, регуляторну пластичність або геномну стійкість, що може опосередковано сприяти виживанню в екстремальних умовах довкілля або підвищувати здатність до колонізації різноманітних середовищ.

ЛІТЕРАТУРА

- Andreev, I.O., Mel'nyk, V.M., Parnikoza, I.Y. et al. (2023) *Cytol. Genet.* 57:399–405.
- Bennett, M.D., Smith, J.B., Smith, R.I.L. (1982) *Environ. Exp. Bot.* 22:307–318.
- Chen, G., Stepanenko, A., Borisjuk, N. (2021) *Front. Plant Sci.* 12:1–10.
- Cuba-Díaz, M., Cerda, G., Rivera, C. et al. (2017) *Polar Biology.* 40:1475–1480.
- Hemleben, V., Grierson, D., Borisjuk N. et al. (2021) *Front. Plant Sci.* 12:797348.
- Ishchenko, O.O., Mel'nyk, V.M., Parnikoza, I.Y. et al. (2020) *Cytol. Genet.* 54:505–513.
- Ishchenko, O.O., Panchuk, I.I., Andreev, I.O. et al. (2018) *Cytol. Genet.* 52:416–421.
- Simon, L., Rabanal, F.A., Dubos, T. et al. (2018) *Nucleic Acids Res.* 46:3019–3033.
- Tynkevych, Y.O., Volkov, R.A. (2011) *Bulletin of Vavilov Soc. of Geneticists and Breeders of Ukraine.* 9:276–282.
- Volkov, R.A. ed. *5S Ribosomal DNA of Flowering Plants*. Chernivtsi: Yuriy Fedkovych Chernivtsi Natl. Un-ty, 2021.

РОЛЬ ФЕНОЛЬНИХ СПОЛУК І ПОЛІФЕНОЛОКСИДАЗИ МОХІВ В АДАПТАЦІЇ ДО АБІОТИЧНОГО СТРЕСУ

О. Л. Баїк, Р. Р. Соханьчак

*Інститут екології Карпат НАН України,
м. Львів, Україна, e-mail: baik.oksana@gmail.com*

Основою адаптації до несприятливих умов довкілля є ефективне функціонування антиоксидантної захисної системи. В публікаціях показано участь в адаптивних реакціях рослин до екстремальних абіотичних чинників як високомолекулярних, так і низькомолекулярних метаболітів, зокрема, речовин фенольної природи (Rivero et al., 2001; Edreva et al., 2008). Фенольні сполуки (ФС) вважаються найважливішими ендегенними низькомолекулярними органічними антиоксидантами, які є активними метаболітами клітинного обміну (Mehr, 2012). Поряд із синтезом фенольних сполук, у мохоподібних активується поліфенолоксидаза (ПФО), яка каталізує окиснення монофенолів та/або *o*-дифенолів до *o*-хінонів з відновленням кисню до води, що призводить до утворення білкових комплексів і коричневих пігментів меланіну. Встановлено, що ПФО сприяє адаптації рослин до мінливих умов середовища (Smolińska-Kondla et al., 2022). В останні роки дослідження участі ферменту в метаболізмі мохів пов'язане із вивченням кодування гена ПФО, оцінкою сезонних змін її активності та впливу на неї фізико-хімічних характеристик субстратів місцезростань (Tahvanainen, Naraguchi, 2013; Thakur, Kapila, 2017).

Недостатньо досліджено питання щодо захисної ролі низькомолекулярних антиоксидантів у розвитку стрес-толерантності до дії аномально високих температур, інсоляції та водного режиму, зокрема, у мохів. Тому метою роботи було вивчення змін кількісного вмісту ФС, антоціанового та каротиноїдного пігментного комплексів у мохів на посттехногенних територіях, а також змін активності ПФО, як індикатора стресу.

Об'єктами досліджень були мохи: *Ptychostomum imbricatum* (Müll. Hal.) Holroyd & N. Pedersen, зібраний на дослідних ділянках (основа, північний схил, плато та північна вершина) відвалу видобутку сірки Новояворівського державного гірничо-хімічного підприємства (ДГХП) «Сірка» (Львівська обл.) та адвентивний вид *Campylopus introflexus* (Hedw.) Brid. – на техногенних субстратах відвалу шахти «Надія» Червоноградського гірничопромислового району, а також із субстратів колишніх торфокар'єрів в околицях смт Лопатин та смт Олесько у Львівській області.

Визначення загального вмісту ФС, каротиноїдів, антоціанів та флавоноїдів у гаметофіті мохів проводилось за загальноприйнятими методиками. Активність поліфенолоксидази визначали спектрофотометрично за швидкістю окиснення парафенілендіаміну (Voitsekhivska et al., 2010).

Протягом сезону найбільший вміст ФС у рослинах *C. introflexus* із досліджуваних територій відзначено у липні, серпні та листопаді (в межах 1,28–1,49 мг/г маси сирої речовини), що, очевидно, зумовлено нагромадженням цих сполук за стресових умов (збільшення температури влітку та її зниження в осінні місяці). Найбільшу активність ПФО у гаметофіті моху відзначено влітку на північній ділянці вершини відвалу шахти «Надія» (169 відн. од./г маси сирої речовини • с).

У моху *C. introflexus* з колишніх торфокар'єрів смт Лопатин та Олесько активність ПФО була у 1,1–9,3 рази більшою, ніж у рослинах з різних експозицій вершини відвалу шахти «Надія», що спричинено вищим рН субстратів торфокар'єрів (5,8–6,2), порівняно із субстратами відвалів (5,2–5,6), адже з літератури відомо, що активність ПФО залежить від актуальної кислотності середовища (Tahvanainen, Naraguchi, 2013). Показано, що протягом літа, коли діапазон температури повітря становив 30–36°C, активність ПФО у гаметофіті *C. introflexus* із усіх досліджуваних територій була більшою (діапазон мінливості активності ПФО був у межах 137–169 відн. од./г маси сирої речовини • с), порівняно із осінніми місяцями, коли діапазон мінливості температур становив 15–24°C (діапазон активності ПФО – 41,3–96,1 відн. од./г маси сирої речовини • с).

На території відвалу видобутку сірки ДГХП вміст ФС у домінуючого виду моху *P. imbricatum* значною мірою залежить від мікрокліматичних умов на дослідних ділянках: найоптимальніші умови навіть влітку є в основі відвалу, а найекстремальніші – на вершині відвалу. Виявлено, що в літній період, коли температура сягала 35–38°C, а інтенсивність освітлення – 100–110 тис. лк, спостерігалось зростання вмісту фенолів у зразках моху *P. imbricatum* від основи до вершини відвалу. Восени за ниж-

чих температур (10–15°C) та інтенсивності освітлення (70–80 тис. лк) вміст фенолів зменшувався на всіх дослідних ділянках майже вдвічі: на 45 % в основі відвалу, на 44 % на північному схилі, на 55 % на плато і на 43 % на вершині. Виявлене збільшення вмісту ФС свідчить, що за впливу екстремальних факторів середовища, очевидно, розвивається окиснювальний стрес, за якого активуються системи адаптації метаболізму моху, спрямовані на відновлення гомеостазу.

Встановлено тенденцію нагромадження антоціанів за умов високих температур та інтенсивності освітлення в літній період, особливо на вершині відвалу (8,83 мг/г маси сухої речовини) та північному схилі відвалу (8,41 мг/г маси сухої речовини), порівняно з основою (6,34 мг/г маси сухої речовини). Восени вміст антоціанів дещо зменшувався в 1,2–1,3 раза в усіх дослідних локалітетах, хоча тенденція зростання їх вмісту від основи до вершини зберігалась. Високий вміст антоціанів у відповідь на температурний стрес та інсоляцію свідчить про важливу їхню роль у подоланні окиснювального стресу і адаптацію моху.

Дослідження показали сезонну мінливість вмісту каротиноїдів у моху *P. imbricatum* із дослідних локалітетів. Каротиноїди є компонентами пігментного комплексу та низькомолекулярними антиоксидантами терпеноїдної природи. Метаболіти пластидних каротиноїдів можуть впливати на експресію ядерних генів, що вказує на функцію каротиноїдів, як індикаторів стресу у рослин (Kulshrestha et al., 2022). Встановлено зростання вмісту каротиноїдів на ділянках із високою інтенсивністю освітлення та температурою (північна вершина та плато відвалу) влітку. Так, вміст каротиноїдів на вершині відвалу влітку був найвищим і становив 0,73 мг/г маси сухої речовини, на плато – 0,55 мг/г маси сухої речовини, Найнижчий показник вмісту каротиноїдів був у моху з основи відвалу – 0,41 мг/г маси сухої речовини. Таке підвищення вмісту каротиноїдів свідчить про розвиток захисних реакцій, що сприяють розсіюванню надлишкової світлової енергії та знешкоджують АФК. За оптимальних кліматичних умов восени вміст каротиноїдів на вершині відвалу зменшувався на 16 %, а в основі відвалу – на 7 %.

Відомо, що флавоноїди нагромаджуються під час стресу, підвищуючи стійкість рослин і є індикаторами їхнього фізіологічного стану (Winkel-Shirley, 2001). Захисна роль флавоноїдів проявляється у підвищенні їхнього біосинтезу як відповідь на дію стресових факторів. Встановлено, що влітку за високих температур, інтенсивності освітлення та різко вираженого дефіциту вологи вміст флавоноїдів зростає від основи до вершини відвалу. Так, на вершині відвалу вміст флавоноїдів становив 19,56 мг/г маси сухої речовини, на північному схилі – 17,61 мг/г маси сухої речовини, на плато – 18,21 мг/г маси сухої речовини, а в основі – 14,51 мг/г маси сухої речовини. В осінній період у відповідь на зниження температур відбувався менш інтенсивний біосинтез флавоноїдів приблизно на 15 % у всіх досліджуваних локалітетах. Отже, у відповідь на високу інсоляцію влітку та зниження температур в осінній період спостерігаються зміни вмісту флавоноїдів, спрямована на адаптацію мохових рослин.

Виявлено сезонну динаміку вмісту низькомолекулярних метаболітів у гаметофіті моху *P. imbricatum* за впливу екстремальних стресових чинників, що полягала в активації антиоксидантного захисту в літній період і підвищенні адаптивності мохів. Сезонні зміни вмісту фенольних сполук і активності поліфенолоксидази у гаметофіті моху *C. introflexus* спричинені як зміною мікрокліматичних умов середовища та властивостей субстратів, так і регуляцією біосинтезу фенолів і активацією їх окиснення. Встановлено, що із зростанням інтенсивності впливу стресових чинників бріофіти на посттехногенних територіях синтезують більше низькомолекулярних антиоксидантів, у них збільшується і активність поліфенолоксидази, що сприяє стресостійкості мохових рослин.

ЛІТЕРАТУРА

- Фізіологія рослин: практикум. За заг. ред. Т.В. Паршикової –Луцьк: Терен, 2010. 420 с.
- Edreva A., Velikova V., Tsonev T., et al. *Gen. Appl. Plant Physiology*. Special Issue. 2008. 34(1-2): 67-78.
- Kulshrestha S., Jibrán R., Klink Jet al. *J. Exp. Bot.* 2022. 73(13): 4396-4411. <https://doi.org/10.1093/jxb/erac085>.
- Mehr Z., Khajeh H., Bahabadi S., Sabbagh S. *Int. J. Agron. Plant Production*. 2012. 3: 710-715.
- Rivero R.M., Ruiz J.M., Garcia P.C. et al. *Plant Sc.* 2001. 160(1): 315-321.
- Smolińska-Kondla D., Zych M., Ramos P. Et al. *Herba Polonica*. 2022. 68(2): 54-68. <https://doi.org/10.2478/hepo-2022-0014>
- Tahvanainen T., Haraguchi A. *Eur. J. Soil Biol.* 2013. 54: 41-47. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2012.10.005>
- Thakur S., Kapila S. *Lindbergia*. 2017. 40(5): 39-44. doi: <https://doi.org/10.25227/linbg.01076>
- Winkel-Shirley B. *Plant Physiol.* 2001. 126(2): 485-493. <https://doi.org/10.1104/pp.126.2.485>.

СТРУКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ КЛІТИННИХ ОБОЛОНОК ЛИСТКІВ ХОЛОДОСТІЙКИХ РОСЛИН ЗА ДІЇ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР

Н. О. Білявська, О. М. Федюк, О. К. Золотарьова

*Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України, Київ, Україна,
e-mail: nbel2@ukr.net*

Середня мінімальна температура на більшості території суші на Землі (~64 %) становить менше 0°C (Rihan et al., 2017). Рослини, які ростуть в холодних умовах, протягом еволюції адаптувалися до дії низьких температур. Пристосовані природним добром до холодного середовища дикорослі види рослин мають ряд структурних властивостей, а також фізіологічних механізмів для виживання в умовах тривалих холодних періодів (Baxter, 2014). Хоча інтерес до проблеми стійкості рослин до низьких температур, перш за все, зумовлений її значимістю для сільського господарства, яке зазнає величезних збитків через заморозки (Hellmers, Warrington, 2018), однак проблема холодостійкості має глобальне екологічне значення, оскільки здатність рослин адаптуватися до конкретних холодних умов у різних частинах планети – один з факторів, які визначають ареали поширення диких видів і можливість їх інтродукції (Chen et al. 2014).

Рослини мають властивість адаптуватися до низьких температур внаслідок реалізації складних фізіолого-біохімічних і молекулярно-генетичних механізмів. Серед процесів, що залучаються до цих механізмів, першими є сприйняття таких температур або їх фізичного прояву і передача сигналу на клітинні компоненти, які програмують модифікації транскрипційних, протеомних і метаболічних шляхів, зміни складу і фізичних властивостей цитоплазми, мембран, клітинної оболонки. Остання є першим клітинним компонентом, який зазнає наслідків впливу низької температури.

За мінусових температур від способу замерзання тканин рослини залежить їх виживаність. За найбільшого стресу, опір можна розділити на два основні процеси: уникнення та несприйняття (Chargier et al., 2023). Уникнення — це здатність перешкоджати поширенню льоду від поверхні рослини до внутрішніх тканин. Гамільтон та інші (Hamilton et al., 2023) вивчали роль епікутикулярних восків у різних генотипів кукурудзи (*Zea mays*) у формуванні фізичного бар'єру від розповсюдження льоду. Умови охолодження перед заморозками змінювали молекулярну структуру та товщину кутикули листків. Стегнер та інші (Stegner et al., 2023) досліджували, чи впливає спричинене заморожуванням відділення мезофілу від судинної тканини в ендодермі хвої гірської сосни (*Pinus mugo* Turra) на керування утворенням льоду і фотосинтезом. Методом кріомікроскопії було показано, що лід в ендодермі був обмежений центральним судинним циліндром. Припускається, що лігніфіковані тангентальні клітинні стінки перешкоджають поширенню льоду в незамерзлий мезофіл, здатний до газообміну.

Листки рослин *Deschampsia antarctica*, що ростуть у приморському регіоні Антарктиди, мають дуже щільне епікутикулярне воскове покриття (Gorb et al., 2022), яке складається з кількох мембранних пластин і отримало назву зовнішнього або верхнього воскового шару. Поверхня епідермісу вирівнює майже перпендикулярно ці надзвичайно тонкі та плоскі мікроскопічні виступи, які не мають будь-якого специфічного розташування. Абаксальна сторона дозволяє легше побачити тонкі ниткоподібні виступи, які знаходяться на краях пластин. Ці виступи здаються злегка нахиленими до поверхні знизу. На зламах шматочків листка дуже чітко видно двошарову організацію епікутикулярного воску. Ці листки мають однакову організацію на обох своїх поверхнях. Така організація складається з двох шарів воскових виступів листка, які накладаються один на одний та є слабо прикріпленими. Нижній шар цієї ієрархії відносно компактний, складається з щільно упакованих полігональних стрижнів. Розташування цих стрижнів вирівнюється з візерунком, що простягається перпендикулярно від поверхні листової пластинки, і вони складаються зі зрощених нерегулярних пластин, щільно розташованих одна до одної. З іншого боку, пухкий верхній шар вказує на наявність мембранних пластин, окремих, але переплетених, що мають витягнуті неправильні форми. Отже відносно товсте, двошарове, епікутикулярне воскове покриття, що знаходиться на обох поверхнях листків *D. antarctica*, може сприяти захисту цієї трави від агресивного впливу дуже низьких температур навколо неї. Нижній шар воскового покриття, який є відносно компактным, забезпечує задовільне відокремлення клітинних поверхонь епідермісу від навколишніх холодних температур. Крім того, піноподібна структура верхнього шару цього двошарового воскового покриття, яке містить повітряні кишені між своїми восковими виступами, діє як ефективний ізолюючий матеріал.

Різні рослини застосовують різноманітні стратегії проти обмерзання, що продемонстровано експериментами, проведеними за допомогою кріо-CEM (сканувального електронного мікроскопа) (Gorb, Gorb, 2022). У таких експериментах вивчали верхні адаксіальні поверхні листків шести видів *Prunus laurocerasus* (Rosaceae) та *Ficaria verna* (Ranunculaceae) з гладенькими листками, *Bellis perennis* (Asteraceae) та *Cerastium brachypetalum pseudonarcissus* (Amaryllidaceae) з волохатими листками, *Narcissus pseudonarcissus* L. (Amaryllidaceae) та *Tulipa gesneriana* (Liliaceae) з восковими листками, які мають 3D-епікутикулярне воскове покриття. Наявність певної відстані між кутикулою та епідермісом, разом з утворенням кристалів льоду, захищає поверхні, покриті 3D восковим покриттям, від швидкого замерзання внутрішніх частин листка. Воскове покриття, завдяки своїй високій гідрофобності або супергідрофобності, захищає поверхню листка рослини від шкідливого впливу швидкого замерзання на крижаній поверхні. Обмерзання гладеньких поверхонь рослин створювало великі площі контакту між льодом та епідермальними клітинами з високою небезпекою подальшого замерзання клітин. Після відтавання та повторного замерзання площа контакту між рідкою водою та поверхнею епідермальних клітин ставала ще більшою. Волохаті поверхні рослин затримували утворення кристалів льоду на поверхні клітин, підтримуючи прилеглий шар повітря досить сухим після початкового обмерзання трихом та запобігаючи доступу водяної пари ззовні до прилеглого шару поблизу поверхні епідермальних клітин. Після відтавання рідка вода зазвичай залишалася на поверхні трихом, а після повторного обмерзання замерзлі краплі води залишалися на трихомах і не контактували з поверхнею епідермальних клітин. Обмерзання на поверхнях рослин, покритих 3D-восковими виступами, починалося з місць зародження на поверхні воскових виступів або в наногазглибленнях між ними. Ось чому реальна площа контакту кристалів льоду була обмежена кількома ділянками на нанорівні на або між восковими виступами. Після відтавання краплі води скочувалися з поверхні, одразу очищаючи поверхню від води, яка могла б повторно замерзнути. 3D-восковий шар залишався неушкодженим після відтавання льоду. Кріо-SEM-експерименти чітко продемонстрували, що покриття трихомами та 3D-воскове покриття можна вважати стратегіями боротьби з обмерзанням рослин (Gorb, Gorb, 2022).

Чайні рослини, вирощені у високогірних місцевостях, часто пошкоджуються екстремально низькими температурами взимку. В роботі Луо та інш. досліджувалися біохімічні показники та характеристики експресії генів двох сортів чаю, морозостійкого (XY10) та чутливого до замерзання сорту (FDDB), під час зимівлі у північному Китаї (Luo et al., 2023). Зразки були зібрані при температурі охолодження (D1), замерзання (D2) та відновлення (D3) взимку. ТЕМ-аналіз ультраструктури листків, взятих на стадії D2, виявив більш серйозні пошкодження клітинної структури у рослин сорту FDDB, ніж у таких сорту XY10. Диференціальний аналіз експресії генів у різних зразках протягом зимового періоду виділив деякі гени у метаболізмі клітинної стінки (*CesAs*, *COBL*, *XTH*, *PG*, *PME*), Характер експресії відповідних генів свідчить про більше накопичення целюлозних та пектинових речовин у клітинній стінці XY10, що узгоджується з результатами біохімічних досліджень її компонентів. Ці результати показали, що регуляція генів, що впливають на властивості клітинної стінки морозостійкого сорту чаю може краще підтримувати добре з'єднану структуру для виживання при природному замерзанні (Luo et al., 2023).

Таким чином, представлені роботи демонструють вирішальну роль клітинної стінки в адаптації холодостійких рослин до низькотемпературного стресу.

ЛІТЕРАТУРА

- Baxter, 2014. In: *Temperature and Plant Development* (ed. Franklin W.). John Wiley & Sons, Inc, Oxford. pp. 49-78.
- Charrier et al., 2023. *Physiologia Plantarum*, 175: e13901. <https://doi.org/10.1111/ppl.13901>
- Chen et al. 2014. *J. Agron. Crop Sci.* 200: 237-245.
- Gorb et al., 2022. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 13(1), 807-816. <https://doi.org/10.3762/bjnano.13.71>
- Gorb, Gorb, 2022. *The Science of Nature*, 109(2), 24. <https://doi.org/10.1007/s00114-022-01789-7>
- Hamilton et al., 2023. *Physiol. Plant.* 175(2), e13902. <https://doi.org/10.1111/ppl.13902>.
- Hellmers, Warrington, 2018 In: *Handbook of Agricultural Productivity*. CRC Press. 2018. Pp. 11-22.
- Luo et al., 2023. *BMC Genomics* 24:558. <https://doi.org/10.1186/s12864-023-09670-1>
- Rihan et al., 2017 *J. Plant Interact.* 12(1):143-157.
- Stegner et al., 2023. *Physiologia Plantarum*, 174, e13793. <https://doi.org/10.1111/ppl.13793>
- Ishchenko, O.O., Panchuk, I.I., Andreev, I.O. et al. (2018) *Cytol. Genet.* 52:416–421.
- Simon, L., Rabanal, F.A., Dubos, T. et al. (2018) *Nucleic Acids Res.* 46:3019–3033.
- Tynkevych, Y.O., Volkov, R.A. (2011) *Bulletin of Vavilov Soc. of Geneticists and Breeders of Ukraine*. 9:276–282.
- Volkov, R.A. ed. *5S Ribosomal DNA of Flowering Plants*. Chernivtsi: Yuriy Fedkovych Chernivtsi Natl. Un-ty, 2021.

**ПОВНОГЕНОМНА ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕНІВ AAE15/16 У *CAMELINA SATIVA*
ЯК ЧИННИКІВ РЕГУЛЯЦІЇ ЖИРНОКИСЛОТНОГО СКЛАДУ
ТА АДАПТАЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ**

**Р. Я. Блюм¹, В. Г. Сахарова^{1,2}, А. Р. Кеда³, Н. С. Нікітіна³, О. О. Калмикова³,
О. М. Савчук³, Я. В. Пірко¹, Я. Б. Блюм¹**

¹Державна установа «Інститут харчової біотехнології та геноміки»
Національної академії наук України, м. Київ, Україна

²Державна Організація «Відділення цільової підготовки Київського національного університету
імені Тараса Шевченка при Національній академії наук України»

³Навчально-науковий центр «Інститут біології та медицини», Київський національний
університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна
e-mail: blume.rostislav@gmail.com

Рижий посівний (*Camelina sativa*) є перспективною олійною культурою для біотехнологічного покращення жирнокислотного складу насіння, що має значення як для формування адаптаційного потенціалу рослин, так і для одержання цінної сировини для біопалива та біоавіаційного пального (Iskandarov et al., 2017). Жирнокислотний склад ліпідів є важливою складовою відповіді рослин на дію абіотичних стресорів, зокрема через вплив на властивості мембран, запасних ліпідів і перебіг метаболічної перебудови. Одними з потенційно важливих мішеней для регуляції цього процесу є гени *AAE15/16*, пов'язані з активацією коротко- та середньоланцюгових жирних кислот і їх повторним включенням у цикл біосинтезу жирних кислот. Для *Arabidopsis thaliana* було показано, що порушення роботи цих генів може сприяти підвищенню накопичення 10:0 та інших жирних кислот реактивно-паливного типу (Tjellström et al., 2013). Саме тому метою нашої роботи було провести повногеномний пошук і порівняльну характеристику генів *AAE15* та *AAE16* у 12 геномних збірках *C. sativa* з ресурсу Phytozome: Giessen4, Joelle, Licalla, Lindo, Prytzh, Svalof, Acsn_226, Ames_1043, Borowska, Cam116, Cam70 та Cn113611. Ідентифікацію білків *AAE15/16* здійснювали шляхом виявлення консервативного АМР-зв'язувального домену родини ацил-активуєчих ферментів та подальшого філогенетичного аналізу родини ідентифікованих білків *AAE*.

У всіх проаналізованих геномних збірках було виявлено стабільний набір генів: по три копії *AAE15* та три копії *AAE16* у кожному генотипі. Загалом ідентифіковано 72 гени *AAE15/16* у 12 збірках геномів рижію різних сортів. Така стала кількість копій узгоджується з алогексаплоїдною природою геному *C. sativa* та свідчить про консервацію набору цих гомеологічних генів після поліплоїдизації. Аналіз структурної організації також вказує на загальну консервативність цих генів у геномах досліджених генотипів, що може бути важливою передумовою стабільності відповідних ланок жирнокислотного метаболізму.

Отримані результати дозволили сформувати референтний набір генів *AAE15/16* для *C. sativa*, що створює основу для подальшого аналізу їх експресії, варіабельності інтронних ділянок, розробки молекулярних маркерів і оцінки ролі цих генів у формуванні жирнокислотного складу насіння та адаптаційних реакцій рослин. Консервативність *AAE15/16* у різних генотипах рижію є важливою передумовою для подальшого цілеспрямованого покращення цієї культури як джерела олії з цінним жирнокислотним профілем, а також для використання цих генів як мішеней у метаболічній інженерії та селекції форм із підвищеною стійкістю до стресових чинників.

Робота виконана в рамках науково-дослідного проєкту ВЦП КНУ ім. Т. Шевченка при НАН України «Метаболічна інженерія жирнокислотного складу олії рижію – покращеного джерела для отримання авіаційного біопалива» (2026-27 pp) (№ Держресстрації: 0126U003053)

ЛІТЕРАТУРА

Tjellström H. et al. *FEBS Lett.* 2013. 587:936–942.
Iskandarov U. et al. *Plant Physiol.* 2017. 174:97–109.

ДИВЕРГЕНЦІЯ ГЕНІВ ТУБУЛІНУ У ПОЛІПЛОЇДНИХ ХРЕСТОЦВІТИХ ЯК ОСНОВА ЦИТОСКЕЛЕТНОЇ ПЛАСТИЧНОСТІ

Р. Я. Блюм, В. Г. Сахарова, А. М. Рабоконь, Я. В. Пірко, А. І. Ємець, Я. Б. Блюм

*ДУ «Інститут харчової біотехнології та геноміки» НАН України, м. Київ, Україна,
e-mail: blume.rostislav@gmail.com*

Тубуліни – незамінні білки цитоскелету, необхідні для полімеризації мікротрубочок, поділу клітин, росту та розвитку рослин. Водночас мікротрубочковий цитоскелет є однією з динамічних клітинних систем, залучених до перебудови ростових процесів і відповіді рослин на дію стресових чинників, зокрема холодового, осмотичного та сольового стресу. Хоча тубуліни є одними з найбільш консервативних еукаріотичних білків, геноми рослин кодують численні ізоформи α -, β - та γ -тубуліну, еволюційні зв'язки та функціональна диференціація яких залишаються не до кінця зрозумілими. Саме тому наше дослідження було сфокусоване на вивченні еволюції та дивергенції генів родини тубулінів у Хрестоцвітих, які є модельною групою квіткових рослин і включають низку важливих поліплоїдних культур. З використанням підходів порівняльної геноміки нами було проаналізовано еволюційну історію ортологічних ліній різних ізоформ тубулінів у геномах алополіплоїдних представників Brassicaceae та їхніх батьківських видів. Зокрема, дослідження охоплювало алогексаплоїдний вид *Camelina sativa* та його диплоїдних предків, складні поліплоїдні представники роду *Brassica*, а також модельні види *Arabidopsis thaliana* та *A. lyrata* для порівняльного аналізу.

Було виявлено, що послідовності генів тубуліну характеризуються високою еволюційною стабільністю, однак набір та кількість еволюційно збережених генів істотно відрізняються між видами. Попри те, що основні класи ізоформ тубулінів виникли в результаті низки давніх подій повногеномної дуплікації, сучасне різноманіття генів тубуліну, добре описане для модельних видів, зокрема *A. thaliana*, може бути специфічною рисою саме цього виду або окремих представників Brassicaceae. Зокрема, проведений аналіз показав, що наявність двох окремих генів γ -тубуліну у *A. thaliana*, функціональна необхідність яких тривалий час залишалася дискусійною, ймовірно, є унікальною особливістю безпосередньо цього виду. У той же час наявність генів двох різних ізоформ γ -тубуліну не простежується у більш віддалених таксонів навіть у межах родини Хрестоцвітих. Більше того, для проаналізованих видів Хрестоцвітих були характерними видоспецифічні дуплікації генів тубуліну, які супроводжувалися як поступовою втратою дуплікованих генів, так і набуттям нових копій без суттєвих змін у кодуючій частині генів.

Загалом отримані дані формують уточнену еволюційну модель родини тубулінів у квіткових рослин і демонструють, що навіть критично важливі компоненти цитоскелету можуть зазнавати контрольованої еволюційної дивергенції зі збереженням базових клітинних функцій. Водночас така дивергенція може бути важливою передумовою цитоскелетної пластичності поліплоїдних рослин, зокрема їхньої здатності підтримувати ріст і клітинну організацію за дії несприятливих умов. Результати дослідження також порушують питання про те, якою мірою дані, отримані на модельних видах рослин, можуть бути екстрапольовані на інші таксони з огляду на складну еволюційну історію тубулінових генів, зокрема й у *A. thaliana*.

Робота виконана в рамках програми науково-дослідних робіт молодих вчених НАН України за проектом "Геномна еволюція родини генів тубуліну у різних підвидів Brassica rapa" (2025-26) (№ Держреєстрації 0125U002944)

**ВИДОВА МІНЛИВІСТЬ ЗАПАСНИХ БІЛКІВ НАСІННЯ У ПРЕДСТАВНИКІВ
РОДУ *CAMELINA***

Р. Я. Блюм, О. І. Созінова, В. Г. Сахарова, А. Ю. Бузіашвілі

ДУ «Інститут харчової біотехнології та геноміки» НАН України, м. Київ, Україна,

e-mail: blume.rostislav@gmail.com

Рижій (*Camelina*, Brassicaceae) є перспективною олійною культурою, насіння якої поєднує високий вміст олії, цінний жирнокислотний склад та значну кількість запасних білків, що мають кормове, харчове й промислове значення. Крім прикладної цінності, запасні білки насіння є важливою складовою репродуктивної стратегії рослин, оскільки забезпечують проросток азотними й вуглецевими ресурсами на ранніх етапах розвитку, зокрема за дії несприятливих умов. Якщо жирнокислотний склад *Camelina sativa* досліджений відносно добре, то видові особливості запасних білків насіння та їхня мінливість у межах роду *Camelina* залишаються менш охарактеризованими. Основними білковими компонентами насіння рижію, як і в інших представників Brassicaceae, є 12S-глобуліни (круциферини), 2S-альбуміни (напіни), а також олеозини, які є ключовими структурними складовими ліпідних тілець. З огляду на це, метою нашої роботи було провести порівняльну оцінку електрофоретичних профілів запасних білків насіння у культурного рижію та його диких родичів. Для аналізу було використано зразки насіння *C. sativa*, *C. neglecta*, *C. hispida*, *C. rumelica*, *C. laxa*, а також представників різних цитотипів *C. microcarpa*, вирощених за однакових умов. Отримані білкові профілі дозволили оцінити як консервативні, так і видоспецифічні особливості основних фракцій запасних білків, що можуть відображати еволюційно закріплену мінливість у межах роду.

Встановлено, що високомолекулярна фракція, яка відповідає компонентам 12S-глобулінів у діапазоні приблизно 66,2–45 кДа, була наявна в усіх досліджених зразках і характеризувалася загальним подібним профілем. Це свідчить про високу консервативність основної круциферинової фракції серед представників роду *Camelina*. Водночас у *C. microcarpa*, *C. neglecta* та *C. rumelica* було виявлено додаткову білкову фракцію в діапазоні близько 35 кДа. Ймовірно, вона може відповідати видоспецифічним варіантам α - або β -субодиниць 12S-глобулінів або відображати особливості процесингу цих білків у насінні окремих видів.

Фракція олеозинів була виявлена в усіх зразках без помітних міжвидових відмінностей, що узгоджується з їхньою базовою роллю у стабілізації ліпідних тілець. Натомість більшу варіабельність продемонструвала фракція білків, пов'язана з 2S-альбумінами. Зокрема, фракція P2S розміром близько 15 кДа не була виявлена у *C. rumelica*, тоді як у *C. neglecta* вона була зміщена у бік більшої молекулярної маси — приблизно 16–17 кДа. Водночас низькомолекулярна фракція 2S-білків була присутня в усіх досліджених зразках. Виявлені відмінності можуть бути пов'язані з видовою специфікою накопичення, дозрівання або посттрансляційного процесингу запасних білків насіння.

Отримані результати свідчать про те, що профілі запасних білків насіння у представників роду *Camelina* поєднують значну консервативність основних білкових фракцій із наявністю окремих видоспецифічних особливостей, зокрема у диких видів. Оскільки досліджені зразки вирощувалися за однакових умов, виявлена мінливість імовірно відображає не короточасну реакцію на середовище, а генетично зумовлені відмінності між видами, які сформувалися в процесі їхньої еволюції та адаптації до різних екологічних умов. Дикі представники роду *Camelina* можуть бути цінним джерелом алельного різноманіття для подальшого покращення культурного рижію, зокрема за ознаками якості насіння, ефективності запасання поживних речовин і потенційної стійкості до несприятливих чинників. Подальше поєднання отриманих даних з геномною ідентифікацією генів круциферинів, напінів та олеозинів дозволить уточнити молекулярну природу виявлених відмінностей і створити основу для маркерного аналізу, спрямованого на оцінку генетичних механізмів регуляції білкового складу насіння рижію.

Робота виконана в рамках проєкту для дослідницьких груп молодих вчених НАН України «Генетична та геномна характеристика запасних білків насіння рижію як прецизійний інструмент для його селекційного вдосконалення» (2026-2027 рр.) (№ Держреєстрації 0126U002353).

ЕКСПРЕСІЯ ГЕНА ДЕМЕТИЛАЗИ *DML3* У РОСЛИНАХ *ARABIDOPSIS* ПІД ЧАС ЗАТОПЛЕННЯ

Ю. А. Бобровницький, Л. Є. Козеко

*Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України, Київ, Україна,
e-mail: cell.biol@ukr.net*

Метилювання ДНК є первинним механізмом епігенетичної варіабельності рослин і регулює гени, що контролюють ріст, розвиток і стресову реакцію (He et al., 2022; Wang et al., 2025). Метилювання та деметилювання здійснюється спеціальними ферментами – метилазами та деметилазами, відповідно. Реакцією рослин на дію будь-якого стресового чинника є зміна рівня метилювання і, відповідно, експресії метилаз і деметилаз (Hua et al., 2011). Проте особливості цього процесу в рослин у відповідь на кореневе затоплення, яке сприяє кореневу гіпоксію, досліджені недостатньо. *DML3* є однією з чотирьох деметилаз *Arabidopsis thaliana* та являє собою білок довжиною 1105 амінокислот, який здійснює деметилювання залишків цитозину в ДНК (Ortega-Galisteo et al., 2008). Метою даної роботи було дослідити участь метилювання в системній відповіді рослин *A. thaliana* на кореневе затоплення та динаміку експресії гена деметилази *DML3* під час довготривалої дії фактора.

Рослини *A. thaliana* (Col-0) вирощували за стандартних умов до віку 16 діб, після чого половину рослин піддавали ґрунтовому затопленню протягом 10 діб; решта (контроль) продовжувала зростати за стандартних умов. Зразки надземної частини відбирали перед затопленням (K0), на 5-у (S5) та 10-у (S10) добу затоплення; паралельно відбирали контрольні зразки (K5 та K10). РНК виділяли із надземної частини за допомогою набору ZymoResearch Quick-RNA Plant Kit з обробкою ДНКазою I (NEB). Зворотну транскрипцію проводили за допомогою набору RevertAid RT Reverse Transcription Kit. Послідовність праймерів (5'-3'): для *DML3* – CAT CCT CGT TCG TTC CAC C (F), CCC CTC GCA TTG CTG TTC (R); для референтного гена Actin 2 – TCT CCC GCT ATG TAT GTC GC (F), GTC ACG TC AGC AAG GTC AA (R). ЗТ ПЛР проводили за допомогою набору NEB Taq PCR Kit при температурному режимі ПЛР: 94°C 5 хв (початкова денатурація), 35 циклів – 94°C 30 с, 55°C 30 с, 72°C 1 хв. Електрофорез продуктів реакції проводили в поліакриламідному гелі із забарвленням сріблом. Для визначення молекулярної ваги ДНК застосовували Invitrogen Low DNA Mass Ladder (100, 200, 400, 800, 1200, 2000 п.н.).

Результати ЗТ-ПЛР показали, що розмір амплікона для *DML3* складав 155 п.н., що відповідало теоретично очікуваному. За нормальних умов експресія *DML3* посилювалася протягом 10 діб росту розетки (від K0 до K5 і K10). За умов ґрунтового затоплення рослини *A. thaliana* суттєво не відрізнялися за фенотипом від контрольних рослин на початку дії фактора. При цьому рівень транскриптів *DML3* збільшувався протягом перших 5 діб (S5) аналогічно до контролю (K5). Проте більш тривале затоплення призводило до значного погіршення стану рослин, а в подальшому й до їх загибелі. Це супроводжувалося зниженням рівня транскриптів *DML3* на 10 добу (S10). Отримані дані свідчать про участь метилювання ДНК у системній реакції *A. thaliana* на кореневу гіпоксію і демонструють транзиторний характер цієї реакції. Посилення експресії гена деметилази *DML3* на початку дії фактора виявилось подібним до реакції рослин на інші стресові чинники. Так, під час опромінення проростків *A. thaliana* спостерігали зниження рівня транскриптів більшості метилаз та зростання у деметилаз. Подібні зміни відзначали також у *Dendrobium officinale* за умов водного дефіциту (Yu et al., 2021). Експресія генів метилаз та інших деметилаз *A. thaliana* та загальний рівень метилювання при затопленні будуть встановлені у подальших дослідженнях.

ЛІТЕРАТУРА

- He et al. *Nature Com.* 2022. 13:1-16.
Ortega-Galisteo et al. *Plant Mol. Biol.* 2008. 67: 671-681.
Wang et al. *Plant Biotechnol. J.* 2025. 23:1585–1600.
Yu et al. *BMC Plant Biol.* 2021. 21: 21.

**МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧНІ МЕХАНІЗМИ АДАПТАЦІЇ ЗЛАКІВ
ДО АБІОТИЧНИХ СТРЕСОРІВ: ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ ТА ЕКСПРЕСІЇ
ГЕНА *DREB2B* У *DESCHAMPSIA ANTARCTICA***

О. М. Бублик, І. О. Андрєєв, В. А. Кунах

*Інститут молекулярної біології і генетики НАН України,
м. Київ, Україна, e-mail: o.m.bublyk@edu.imbg.org.ua*

Глобальні зміни клімату, що супроводжуються почастищенням періодів посухи, температурних коливань та інших несприятливих факторів, зумовлюють необхідність пошуку нових підходів до підвищення адаптивного потенціалу рослин. Здатність рослин протистояти абіотичним стресам визначається комплексом взаємопов'язаних регуляторних процесів, серед яких важливе місце посідають транскрипційні фактори (ТФ), що координують активацію генів стресової відповіді. Дослідження молекулярних механізмів функціонування таких регуляторів дозволяє розширити уявлення про формування стійкості рослин та створює основу для їх практичного використання у селекції й біотехнології, зокрема для отримання більш стійких генотипів сільськогосподарських культур (Bhoite et al., 2025).

Одним із центральних регуляторів відповіді рослин на широкий спектр абіотичних стресорів, включаючи посуху, засолення та низькі температури, є ТФ DREB2B (Dehydration response element binding factor 2B), який належить до родини AP2/ERF. Завдяки здатності контролювати експресію генів стресової відповіді DREB2B розглядається як перспективний об'єкт досліджень, спрямованих на розкриття молекулярних механізмів адаптації рослин та використання у біотехнологічних підходах (Wu et al., 2022).

У цьому дослідженні як модель було обрано *Deschampsia antarctica* Desv. (Poaceae) – унікальний злак, здатний існувати в екстремальних умовах Прибережної Антарктики. Цей вид адаптований до комплексу несприятливих факторів, серед яких низькі температури, дефіцит доступної води, сильні вітри та високий рівень ультрафіолетового випромінювання (Parnikoza et al., 2011). Вивчення генетичних механізмів такої адаптації має значний науковий і практичний інтерес, оскільки екстремофільні види можуть бути джерелом цінних алельних варіантів генів, потенційно придатних для покращення стійкості культурних рослин до абіотичних стресорів (Byun et al., 2021).

Метою роботи було дослідження молекулярної організації гена ТФ DREB2B у *D. antarctica*, а також аналіз його альтернативних транскрипційних форм та прогнозованих білкових ізоформ із використанням методів біоінформатичного аналізу.

На основі аналізу даних геномних та транскриптомних послідовностей *D. antarctica* з бази SRA NCBI (SRX465632, SRX24981177-SRX24981180, SRX24937479, SRX5305101-SRX5305108) із використанням генів-ортологів інших представників родини Poaceae як референсних послідовностей було ідентифіковано два варіанти гена *DaDREB2B*, які можуть відповідати алельним формам. Послідовності *DaDREB2B-1* та *DaDREB2B-2* характеризувалися значною кількістю одонуклеотидних поліморфізмів, які включали синонімічні заміни, а також інсерції та делеції. Рівень ідентичності двох варіантів становив 93,3%.

Порівняльний аналіз геномних та транскриптомних послідовностей показав, що ген *DaDREB2B* складається з чотирьох екзонів і трьох інтронів. Встановлено, що первинний транскрипт цього гена піддається альтернативному сплайсингу, подібно до ортологічних генів інших злаків. Для представників Poaceae описано формування двох (Matsukura et al., 2010) або трьох (Niu et al., 2020) альтернативних транскриптів *DREB2B*, тоді як для *D. antarctica* нами передбачено наявність чотирьох варіантів транскриптів. Серед ідентифікованих альтернативних транскриптів *DaDREB2B* два найдовші варіанти – *dadreb2b.1a* та *dadreb2b.1b* – містять усі чотири екзони. Ці транскрипційні форми відрізняються між собою трьома нуклеотидними залишками, які є наслідком використання альтернативного сайту сплайсингу на 3' кінці другого інтрона. Така особливість є нетиповою для більшості досліджених представників злаків. Транскрипт середньої довжини *dadreb2b.2* характеризується відсутністю третього екзона, тоді як найкоротший варіант *dadreb2b.3* не містить другого та третього екзонів (Bublyk et al., 2025).

У представників родини Poaceae альтернативний сплайсинг гена *DREB2B* зазвичай призводить до утворення однієї або двох транскрипційних форм, здатних кодувати повнорозмірний функціональний білок, а також додаткового транскрипту з передчасним стоп-кодоном, продукт якого не має необхідних функціональних доменів. Встановлено, що наявність або відсутність окремих екзонів впливає на відкриту рамку зчитування транскриптів та функціональний потенціал їх білкових продуктів (Matsukura et al., 2010, Niu et al., 2020).

У *D. antarctica* транскрипт *dadreb2b.2*, окрім короткої відкритої рамки зчитування, яка потенційно кодує нефункціональний білок, містить альтернативний варіант відкритої рамки зчитування зі старт-кодоном, розташованим на початку другого екзона. Передбачений білковий продукт цієї форми має змінену N-кінцеву послідовність, однак зберігає основні функціонально важливі елементи, включно із AP2/ERF ДНК-зв'язувальним доменом, сигналом ядерної локалізації та доменом активації транскрипції. Подібні послідовності з додатковою відкритою рамкою зчитування були виявлені нами лише у спорідненого виду *D. cespitosa*, та представників роду *Lolium* (*L. rigidum* і *L. perenne*).

Кількісний аналіз з використанням транскриптомних баз SRA показав, що основною формою, яка виявляється у різних тканинах рослин *D. antarctica* з лабораторних та природних умов, є транскрипт *dadreb2b.2*. Для інших альтернативних транскриптів були виявлені лише поодинокі фрагменти. Відомо, що за оптимальних умов росту у злаків переважно утворюється форма *dreb2b.2*, яка кодує вкорочений нефункціональний білок, тоді як за дії абіотичного стресу зростає кількість транскриптів, що забезпечують синтез активної форми DREB2B (Matsukura et al., 2010, Tavakol et al., 2014, Niu et al., 2020).

Отримані нами результати відрізняються від описаних для інших злаків, оскільки у рослин *D. antarctica* із природних умов не вдалося виявити переважного накопичення транскриптів *dadreb2b.1* та *dadreb2b.3*, що зазвичай асоціюються з утворенням функціонально активних білків. Це може свідчити про існування альтернативного механізму регуляції активності *DREB2B* у даного виду. Зокрема, кількісно переважаючий транскрипт *dadreb2b.2* завдяки наявності альтернативної відкритої рамки зчитування потенційно здатний забезпечити синтез білка, який містить ключові функціональні елементи.

Додатково було проведено комплексну біоінформатичну характеристику прогнозованих білкових продуктів *DaDREB2B*. Для передбачених ізоформ визначено фізико-хімічні властивості, можливу субклітинну локалізацію, потенційні сайти посттрансляційних модифікацій, функціональні домени та здійснено моделювання просторової структури білків. Філогенетичний аналіз, а також наявність консервативних послідовностей і доменних структур підтвердили належність досліджуваного білка до групи ТФ DREB2B.

Таким чином, отримані результати розширюють уявлення про молекулярні механізми адаптації *D. antarctica* до абіотичних стресорів та демонструють особливості організації й експресії гена *DaDREB2B* у цього стресостійкого виду. Проведене дослідження створює основу для подальшого вивчення регуляторних мереж стресової відповіді у злаків та пошуку генетичних ресурсів, які можуть бути використані для підвищення стійкості культурних рослин.

ЛІТЕРАТУРА

- Bhoite R., Onyemaobi O., Halder T. et al. *Curr. Plant Biol.* 2025. 41:100434.
Wu Y., Zhang L., Nie L. et al. *BMC Genomics.* 2022. 23:598.
Parnikoza I., Kozeretska I., Kunakh V. *Amer. J. Plant Sci.* 2011. 02:381–395.
Byun M. Y., Cui L. H., Lee A., et al. *Front Plant Sci.* 2021. 12:734500.
Matsukura S., Mizoi J., Yoshida T., et al. *Mol. Genet. Genomics.* 2010. 283:185–196.
Niu X., Luo T., Zhao H., et al. *Gene.* 2020. 740:144514.
Bublyk O.M., Andreev I.O., Melnyk V.M., et al. *Polar Biol.* 2025. 48:70.
Tavakol E., Sardaro M. L. S., Shariati J. V., et al. *Gene.* 2014. 549:24–32.

**ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДИКИ ОТРИМАННЯ БІОСУРФАКТАНТУ
З КУЛЬТУРАЛЬНОЇ РІДИНИ *B. SUBTILIS* ДЛЯ НАНОБІОРЕМЕДІАЦІЇ
ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ**

А. Ю. Бузіашвілі, А. І. Ємець

*ДУ «Інститут харчової біотехнології та геноміки НАН України», Україна, м. Київ,
e-mail: buziashvili.an@gmail.com*

Наночастинки на основі нульвалентного заліза (nZVI) завдяки високій питомій площі поверхні та Фентон-подібної активності розглядаються як перспективний наноматеріал для нанобіореємедіації водних і ґрунтових ресурсів від органічних забруднюючих речовин, зокрема, нафтопродуктів. Одним із найпоширеніших методів одержання таких наночастинок є відновлення солей Fe(II) або Fe(III) борогідридом натрію (Karthick et al., 2019). Водночас, практичне застосування nZVI обмежується його швидким окисненням, утворенням поверхневого окисно-гидроксидного шару та агрегацією наночастинок. Для підвищення їхньої дисперсності й стабільності застосовують функціоналізацію поверхнево-активними речовинами та полімерами. Перспективною альтернативою синтетичним стабілізаторам є бактеріальні біосурфактанти, які поєднують поверхневу активність, біологічну сумісність і здатність взаємодіяти з гідрофобними забруднювачами.

Метою роботи було оптимізувати методику виділення біосурфактанта з культуральної рідини нафторозкладаючого штаму *Bacillus subtilis* B-5015 з Колекції мікроорганізмів Інституту мікробіології та вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України для отримання найвищого вмісту ліпопептидів. Виділення біосурфактанта проводили з використанням методу кислотного осадження (Yu et al., 2022). Для цього культуру бактерії вирощували протягом 24, 48 та 72 год в рідкому середовищі LB при 37°C на шейкері зі швидкістю обертання 150 об/хв. Далі бактеріальні клітини осаджували протягом 15 хв при 10 000 об/хв та 4°C за використання центрифуги Eppendorf 5417R (Німеччина), відбирали супернатант та стерилізували його крізь нітроцелюлозні фільтри з діаметром пор $d = 0,45$ мкм. рН супернатанту доводили до 2,0 за допомогою 6М HCl та інкубували протягом 24 год при 4°C. За таких умов зменшується розчинність ліпопептидних біосурфактантів і формується осад, який відокремлювали повторним центрифугуванням при 4°C. Далі осад двічі промивали дистильованою водою (рН 2,0) шляхом центрифугування при 10 000 об/хв та 4°C і висушували протягом 24 год при 37°C для подальшого визначення вмісту ліпопептидів у зразках. Встановлено, що при культивуванні *B. subtilis* B-5015 протягом 72 год вміст ліпопептидів становив $1,80 \pm 0,37$ мг/мл, протягом 48 год – $0,29 \pm 0,09$ мг/мл, 24 год – $0,12 \pm 0,04$ мг/мл. Отримані зразки розчиняли у дистильованій воді (рН 7,0) до фінальної концентрації 1 мг/мл та зберігали при 4°C.

Отже, було виявлено лінійну залежність вмісту ліпопептидів у культуральній рідині *B. subtilis* B-5015 від тривалості культивування. У подальших дослідженнях отриманий біосурфактант буде використано для біофункціоналізації наночастинок nZVI, що будуть застосовані у розробці методики очищення водних і ґрунтових ресурсів від нафтопродуктів.

Робота виконана А.Ю.Б. в рамках гранта Президента України для підтримки наукових досліджень і розробок молодих вчених-докторів філософії/кандидатів наук (до 35 років включно) "Отримання наночастинок оксиду заліза на основі нафторозкладаючих мікроорганізмів з метою їх потенційного використання для очистки ґрунтових та водних ресурсів від забруднень в результаті військових дій" (Договір із НФДУ №246.05/0027)

ЛІТЕРАТУРА

Karthick A. J. *Environ. Manage.* 2019. 240:93-107.
Yu F. *Front. Nutr.* 2022. 9:1064764.

**CRISPR-CAS9 РЕДАГУВАННЯ КЛЮЧОВИХ ГЕНІВ У БІОТИЧНИХ
ТА АБІОТИЧНИХ СТРЕСОВИХ ШЛЯХАХ БАВОВНИКУ**

Н. Е. Волкова

*Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства НААН України,
смт. Хлібодарське, Одеська область, Україна, e-mail: natavolki@ukr.net*

Бавовник (*Gossypium* sp.) є провідною світовою культурою для виробництва натурального волокна. Для України, у зв'язку з війною проти РФ, ця культура актуальна для виробництва бездимного пороку. Прогнозується, що світове виробництво бавовни зросте зі 126,5 мільйонів тюків на даний час до приблизно 141 мільйона тюків в 2031–2032 роках зі щорічним темпом зростання 1,6 %. На врожайність бавовнику впливають, зокрема, такі стресові фактори, як зміна клімату, деградація ґрунтів, спалахи захворювань. Традиційні селекційні та трансгенні підходи покращили врожайність бавовнику та стійкість до патогенів, але залишаються повільними та обмеженими через складні алотетраплоїдні геноми видів бавовнику, значну надлишковість генів та низьку ефективність трансформації.

Інструменти редагування геному, особливо CRISPR-Cas9, пропонують цілеспрямовану модифікацію генів, пов'язаних з врожайністю та реакцією на стрес. Це дозволяє збільшити врожайність, підвищити стійкість до посухи, засолення та шкідників, мінімізуючи при цьому нецільові ефекти та регуляторні проблеми, пов'язані з традиційними генетично модифікованими культурами.

Для створення сортів бавовнику, стійких до біотичних (фітопатогенів) та абіотичних (теплого та холодного стресів, стресу від засолення та посухи) стресових факторів, спочатку необхідно ідентифікувати відповідні гени, що беруть участь у стресовій реакції рослин. Далі система CRISPR-Cas9 може бути використана для заміни генів, вставки генів та нокауту генів, що призведе до активації або нокауту мутантів та втрати функції. Це допоможе створити рослини бавовнику, стійкі до біотичного та абіотичного стресів.

Основні напрями досліджень та мішені в бавовнику такі: посухостійкість – модифікація генів, що відповідають за закриття продихів та накопичення осмопротекторів (наприклад, активують гени *GhRD29A*, *GhDREB1A*, *GhPIP*), це покращує утримання вологи клітинами за умов дефіциту води; стійкість до засолення – завдяки CRISPR-системі редагуються транспортери іонів, що зменшує токсичність натрію та покращує осмотичний баланс; стійкість до високих та низьких температур – вплив на гени теплового шоку (Heat Shock Protein, HSP) та фактори транскрипції дозволяє захистити рослини від пошкоджень під час екстремальних температурних коливань.

Останні досягнення в редагуванні геному бавовнику за допомогою CRISPR-Cas9-технології пов'язані з генами *Gh14-3-3d*, *GFP*, *GhVP*, *MYB25*, *GhCLA1*, *GhAOC2*, *Cry1Ac*, *GhPDS*, *CpTI*. Специфічне редагування цих генів виявило функціональні зв'язки між шляхами стресової реакції та сигналінгом, що активує захисні реакції рослин. Проведені дослідження також включають розуміння механізмів перехресних зв'язків стресових гормонів, сигнальних посередників і захисних метаболітів: саліцилової кислоти, жасмонової кислоти, етилену, регуляції активних форм кисню (Reactive Oxygen Species, ROS) та біосинтезу вторинних метаболітів.

Майбутні молекулярно-генетичні дослідження видів бавовнику повинні інтегрувати мультиоміку, первинне редагування та аналіз взаємодії патоген-ефектор для підвищення результативності молекулярної селекції стійких сортів бавовнику.

**ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ І ВОЛОГОСТІ НА ТЕРМІНИ ПОЯВИ ОСНОВНИХ
ФІТОФАГІВ ЯЧМЕНЮ ЯРОГО В УМОВАХ ПРАВОБЕРЕЖНОГО ЛІСОСТЕПУ
УКРАЇНИ**

С. П. Ворожко

*Верхняцька дослідно-селекційна станція Інституту біоенергетичних культур
і цукрових буряків НААН України,
смт. Верхнячка, Черкаська область, Україна e-mail: svitlana.vorozhko@gmail.com*

Ячмінь ярий (*Hordeum vulgare* L.) є перспективною зерною культурою, що відіграє важливу роль у забезпеченні продовольчої безпеки України. Це культура універсального призначення: її зерно використовують у харчовій, технічній та кормовій сферах. За хімічним складом зерно ярого ячменю містить 65–68 % вуглеводів, 7–18 % білка, 2,1 % жирів, 1,5–2,5 % зольних речовин і 3–5 % клітковини.

Для досягнення стабільно високих урожаїв ярого ячменю необхідний надійний захист посівів від шкідливих організмів. Формування ентомокомплексу зернових культур, зокрема ячменю, залежить від сукупності біотичних та абіотичних чинників, які впливають на чисельність і рівень шкідливості окремих видів. Серед них вагомим є температурний режим, який визначає межі поширення й розвитку шкідників. Активність комах можлива лише за певних температур – від нижнього до верхнього порогу. Нижня межа в середньому становить 5–8°C (у деяких видів від –1 до +10°C); при її зниженні комаха впадає в стан холодової депресії. Верхня межа зазвичай не сягає +40°C і найчастіше варіює в межах +30...+35°C, залежно від виду та стадії розвитку. Метою досліджень було визначити вплив цих факторів на фітофагів агроценозу ячменю ярого.

Дослідження проводили упродовж 2016–2025 рр. на Верхняцькій дослідно-селекційній станції Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України. Спостереження та обліки вели на посівах ячменю ярого сорту Водограй. Видовий склад і чисельність фітофагів встановлювали за загальноприйнятими та спеціальними методиками. Комах, яких відловили за морювали хлороформом. Таксономічну належність комах встановлювали за допомогою бінокюля МБС-1.

Достовірність визначення видового складу комах підтверджена спеціалістами Інституту зоології ім. І.І. Шмальгаузена НАНУ.

Оскільки повноцінний розвиток кожного виду комах відбувається лише за умови накопичення необхідної суми ефективних температур, було проведено порівняльний аналіз біологічних особливостей виявлених фітофагів із літературними даними. Також на основі метеорологічних спостережень розраховано гідротермічний коефіцієнт (ГТК) за період вегетації ячменю, виконали його зіставлення із середніми багаторічними показниками та оцінено вплив цього коефіцієнта на чисельність і терміни появи основних шкідників у посівах.

Загальновідомо, що для Лісостепу норма гідротермічного коефіцієнта становить 1,3, що відповідає зоні достатнього зволоження. Однак упродовж останніх 15–20 років цей показник знизився до 1,14, що вже характеризує територію як зону недостатнього зволоження.

Розрахунок ГТК для певного регіону виконують за три літні місяці, коли середньодобова температура стабільно перевищує +10°C. Травень характеризувався підвищеним температурним фоном – у межах +18,4...+28,9°C за середньодобовою +17,4°C, за винятком окремих років (2021), де показники були нижчими за норму на 1,6 та 0,1°C. Ще вищими виявилися температури червня та липня – перевищення середньобагаторічних значень сягало 5,3 та 5,0°C (2024 р.), а максимальна температура в окремі дні піднімалася до +31,5°C. Найпосушливішим був 2022 рік: дефіцит опадів фіксувався з травня по липень і становив 25,2, 38,9 та 28,5 мм відповідно за норми

50,0, 66,0 та 59,0 мм. ГТК у травні дорівнював 0,6 при багаторічній нормі 1,3, у червні – 0,7 проти 1,6, у липні – 1,0 проти 1,5. Це засвідчує тенденцію до посилення посушливості клімату в регіоні.

Упродовж 2021–2025 років температура повітря у квітні перевищувала середні багаторічні температурні показники на 3,0–5,7°C, що вплинуло на біологію розвитку шкідників ячменю. Зокрема, на сходах культури було зафіксовано пошкодження, спричинені комплексом фітофагів: попелицею звичайною злаковою *Schizaphis graminum* Rondani, 1852, великою злаковою *Sitobion avenae* Fabricius, 1794 і ячмінною *Brachycolus noxius* Mordvilko, 1913, лігусом шкідливим *Lygus rugulipennis* Porpius, 1911, блішкою смугастою хлібною *Phyllotreta vittula* Redtenbacher, 1849, п'явцями синьою *Oulema lichenis* Voet., 1806 і червоногрудою *Oulema melanopus* Linnaeus, 1758, клопом шкідлива черепашка *Eurygaster integriceps* Puton, 1881 та мідляком піщаним *Opatrum sabulosum* Linnaeus, 1760.

У першій декаді травня на посівах зафіксовано появу трипса пшеничного *Haplothrips tritici* Kurdjumov, 1912 і пильщика чорного *Trachelus tabidus* Fabricius, 1775, в другій декаді – жулициці малої хлібної *Zabrus tenebrioides* Goeze, 1777, елії гостроголової *Aelia acuminata* Linnaeus, 1758 та імаго коваликів *Agriotes sputator* Linnaeus, 1758.

У другій декаді квітня було зафіксовано нехарактерно ранній виліт крилатих попелиць – на півтора-два тижні раніше, ніж зазвичай вказується в науковій літературі. Головними чинниками цього явища стали спека та недостатня кількість опадів, які прискорили розвиток комах. Подібна тенденція простежувалася й для п'явиць: синя та червоногруда з'явилися в ті ж самі ранні строки, а їхня масова чисельність пояснюється тим, що такі погодні умови – теплі й посушливі – є найбільш комфортними для цих видів, що й підтвердилося в ході спостережень.

Результати досліджень засвідчують, що зростання середньорічної температури, скорочення кількості опадів та зміщення меж природно-кліматичних зон України спричиняють порушення традиційних строків появи окремих видів шкідників на посівах ярого ячменю. Проведені обліки та спостереження за фітофагами дозволили визначити видовий склад домінантних шкідників у структурі ентомокомплексу та виявити види, строки появи яких не збігаються з багаторічними даними. На основі отриманих результатів розроблено фенологічні календарі, які можуть бути використані для вдосконалення системи захисту ярого ячменю від шкідливих організмів в умовах Правобережного Лісостепу України.

ОЦІНКА ВПЛИВУ ЗАРОДКОВИХ ПЛАЗМ НА ІНДУКЦІЙНУ ЗДАТНІСТЬ ГАПЛОПРОДЮСЕРІВ КУКУРУДЗИ

О. Л. Гайдаш, Т. В. Негода, Д. С. Зубов, Ю. В. Безсусідня

*ДУ «Інститут зернових культур НААН України», м. Дніпро, Україна
e-mail: a.gaidash88@ukr.net*

Технологія отримання подвоєних гаплоїдів (ДН-технологія) є одним із найбільш ефективних інструментів сучасної селекції кукурудзи, оскільки дозволяє скоротити тривалість створення гомозиготних ліній у 2–3 рази та прискорити виведення нових гібридів. Ефективність її застосування значною мірою визначається індукційною здатністю гаплопродюсерів, яка, поряд із їх генетичними особливостями, залежить від генотипу материнських форм. Одним із чинників такої мінливості є належність вихідного селекційного матеріалу до різних зародкових плазм.

Незважаючи на широке використання ДН-технології у світовій практиці, особливості взаємодії гаплопродюсерів із селекційним матеріалом різного генетичного походження в умовах Степу України залишаються недостатньо вивченими. Тому оцінка стабільності індукційної здатності гаплопродюсерів на різних зародкових плазмах є актуальною для створення високоефективних вітчизняних гаплопродюсерів.

Метою дослідження було оцінити вплив зародкових плазм на індукційну здатність експериментальних гаплопродюсерів селекції ДУ «Інститут зернових культур НААН України» та визначити найбільш перспективні генотипи для використання у програмах створення подвоєних гаплоїдів.

Дослідження виконували на самозапиленних лініях кукурудзи, що належать до зародкових плазм Айодент, Ланкастер і змішаного походження. Для одержання матрокліних гаплоїдів використовували експериментальні гаплопродюсери ДЗМ-2, ДЗМ-3, ДЗМ-5 та стандартний гаплопродюсер ЗМК-1. Ефективність оцінювали за середнім рівнем гаплоіндукції та коефіцієнтом варіації (V , %), який характеризує стабільність прояву індукційної здатності.

Обсяг експериментального матеріалу становив 252,5 тис. маркованих зернівок, отриманих у результаті контрольних запилень. Зокрема, для стандартного гаплопродюсера ЗМК-1 було отримано 61,9 тис. зернівок, для ДЗМ-2 – 61,5 тис., для ДЗМ-3 – 58,9 тис., а для ДЗМ-5 – 70,2 тис. зернівок. Такий обсяг досліджень забезпечив достатню репрезентативність для порівняльної оцінки досліджуваних генотипів.

Результати досліджень підтвердили істотний вплив зародкової плазми на реалізацію індукційної здатності гаплопродюсерів. Найвищі показники гаплоіндукції одержано для гаплопродюсера ДЗМ-5, який забезпечував 11,8 % гаплоїдів на лініях плазми Айодент, 9,9 % плазми Ланкастер та 9,6 % змішаного походження. При цьому коефіцієнт варіації змінювався від 7,4 до 13,9 %, що свідчить про високу стабільність прояву індукційної здатності незалежно від генетичного походження материнських форм.

Гаплопродюсер ДЗМ-2 також характеризувався високою ефективністю. Рівень гаплоіндукції становив 8,3 % для плазми Айодент, 7,1 % для Ланкастер та 9,2 % для змішаних генотипів, тоді як коефіцієнт варіації становив 9,8–13,4%. Це свідчить про достатньо стабільний прояв ознаки.

Натомість гаплопродюсер ДЗМ-3 характеризувався нижчими показниками гаплоіндукції (4,6–6,2 %) і найбільшою мінливістю ($V = 15,4–21,3$ %), особливо при використанні материнських форм плазми Ланкастер. Стандартний гаплопродюсер ЗМК-1 забезпечував середній рівень гаплоіндукції (5,0–6,5 %) при відносно невисокій варіабельності ($V = 7,1–9,0$ %).

Отримані результати показали, що характер реакції залежав від поєднання «гаплопродюсер × зародкова плазма». Для окремих гаплопродюсерів максимальні показники гаплоіндукції відмічалися на генотипах плазми Айодент, тоді як для інших – на генотипах змішаного походження. Це свідчить про специфічність взаємодії між гаплопродюсером і генетичним фоном материнських форм та підтверджує необхідність оцінювання нових гаплопродюсерів на широкому наборі селекційного матеріалу.

Таким чином, встановлено, що зародкова плазма істотно впливає як на рівень, так і на стабільність гаплоіндукції. Найбільш перспективним серед досліджених генотипів виявився гаплопродюсер ДЗМ-5, який поєднував високий рівень гаплоіндукції з низькою варіабельністю прояву ознаки в різних зародкових плазмах. Отримані результати можуть бути використані при створенні нових вітчизняних гаплопродюсерів та оптимізації технології отримання подвоєних гаплоїдів у селекції кукурудзи.

ОСОБЛИВОСТІ ВЗАЄМОДІЇ ГЕНІВ *Lr14a* ТА *Lr34* У МІЖЛІНІЙНИХ ГІБРИДАХ F_1 ТА F_2 ПШЕНИЦІ М'ЯКОЇ ЯРОЇ В УМОВАХ ПІВДНЯ УКРАЇНИ

О. В. Галаєв, М. В. Галаєва, В. А. Трасковецька

*Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннєзнавства та сортовивчення,
Одеса, Україна, e-mail: galaev7@ukr.net*

Бура листкова іржа, збудником якої є *Puccinia triticina* Erikss. (syn. *Puccinia recondita* Rob. ex Desm.), належить до найбільш поширених і економічно значущих грибних хвороб пшениці м'якої (*Triticum aestivum* L.) у світі. В Україні бура листкова іржа – одна з найбільш розповсюджених хвороб пшениці: періодичність епіфітотій у Степу становить у середньому один раз на п'ять років, а в Лісостепу та Поліссі — один раз на два роки. За сприятливих для розвитку патогена умов втра-ти врожаю можуть перевищувати 30 % (Golosna et al., 2017). Висока еволюційна мінливість популяцій *P. triticina* та поява нових вірулентних рас, здатних долати генетично зумовлену стійкість сортів, зумовлюють необхідність не лише пошуку нових джерел стійкості, а й вивчення взаємодії відомих генів при їх поєднанні в одному генотипі та вдосконалення селекційних підходів.

Одним із пріоритетних напрямів селекції є пірамідування генів стійкості, яке передбачає поєднання в одному генотипі генів із різними механізмами дії. Вважається, що комбінування ефективних расоспецифічних генів із генами стійкості дорослої рослини (adult plant resistance, APR) забезпечує тривалий та надійний захист. Водночас перспективним є і використання подоланих генів, оскільки їх залишкова дія в окремих випадках може підсилювати загальний рівень стійкості завдяки адитивним ефектам.

Стійкість сучасних сортів пшениці до бурої листкової іржі є результатом взаємодії кількох *Lr*-генів, серед яких можуть бути як ефективні, так і подолані гени стійкості. Характер такої взаємодії може бути різним: поєднання ефективних генів не завжди забезпечує підвищення рівня стійкості, тоді як комбінації подоланих генів можуть проявляти адитивний ефект за рахунок їх залишкової дії. Водночас поєднання ефективних і подоланих генів може супроводжуватися як посиленням, так і пригніченням фенотипового прояву стійкості внаслідок епістатичних взаємодій.

Незважаючи на значну кількість досліджень присвячених ідентифікації та використанню окремих *Lr*-генів, особливості їхньої взаємодії в одному генотипі залишаються недостатньо вивченими. Для виключення впливу інших генів стійкості, наявних у генетичному фоні сортів пшениці, доцільним є використання майже ізогенних ліній сорту Thatcher (Tc), що відрізняються лише наявністю відповідних *Lr*-генів.

Особливий інтерес становлять гени *Lr14a* та *Lr34*, які присутні у сортах української селекції. Ген *Lr34* є одним із найпоширеніших генів APR і забезпечує часткову, неспецифічну та довготривалу стійкість до бурої листкової іржі, а також здатний підсилювати ефективність інших *Lr*-генів. Саме тому він широко використовується у сучасних селекційних програмах. Ген *Lr14a*, який раніше забезпечував расоспецифічну стійкість, у сучасних популяціях *P. triticina* в Україні практично повністю втратив свою ефективність, однак продовжує зустрічатися у генотипах вітчизняних сортів і селекційних ліній. У попередніх дослідженнях міжлінійних гібридів F_1 та F_2 , отриманих від схрещування *TcLr34* × *TcLr14a*, нами вперше було встановлено негативний епістаз, який проявлявся супресією дії гена *Lr34* геном *Lr14a* (Галаєв, 2016). Оскільки обидва гени трапляються у сучасному селекційному матеріалі, а *Lr34* є одним із найпоширеніших генів довготривалої стійкості у сортах української селекції, встановлена взаємодія має важливе практичне значення для добору батьківських компонентів під час створення нових сортів пшениці.

Виявлений ефект негативного епістазу потребує подальшого вивчення для з'ясування особливостей його прояву в поколіннях F_1 і F_2 за результатами фенотипової оцінки стійкості та моле-

кулярно-генетичного аналізу. Метою роботи було з'ясування особливостей взаємодії генів *Lr14a* та *Lr34* у міжлінійних гібридах поколінь F_1 і F_2 пшениці м'якої ярої на основі фенотипового та молекулярно-генетичного аналізу.

Матеріалом для досліджень слугували зразки ярої м'якої пшениці *Triticum aestivum* L.: сорт Thatcher (Tc), його майже ізогенні лінії сорту Thatcher (Tc) *TcLr14a*, *TcLr34* та гібридні комбінації F_1 та F_2 від їх схрещування. Насіння сорту Thatcher та його майже ізогенних ліній отримано з колекції USDA Germplasm Resources Information Network (GRIN) (<http://www.ars-grin.gov>). Ідентифікацію *Lr* генів у батьківських ліній *TcLr* та гібридів F_1 і F_2 проводили за допомогою STS маркера *csLV34* (*Lr34*) та SSR маркерів *Xgwm344* та *Xgwm146* (*Lr14a*). Розвиток бурої іржі пшениці в польових умовах вивчали на дорослих рослинах у природному інфекційному фоні на Півдні України (м. Одеса, поля СГІ–НЦНС). Інтенсивність ураження визначали за 9-бальною шкалою інтегрованою СЕВ та уніфікованою міжнародною шкалою (Бабаянц Л.Т. та ін., 1988). Як контроль сприйнятливості використовували сорт Thatcher, зважаючи на наявність у його генотипі та, відповідно, у генотипах усіх майже ізогенних ліній гена вікової стійкості *Lr22b*.

Польова оцінка стійкості майже ізогенних ліній сорту Thatcher (Tc) до бурої листової іржі на природному інфекційному фоні Півдня України у 2013–2016, 2019, 2021 та 2026 рр. показала, що ізогенна лінія *TcLr34* характеризувалася вищим рівнем стійкості (4–6 балів) порівняно з сортом Thatcher (*Lr22b*) та лінією *TcLr14a*, рівень стійкості яких становив 2–4 бали. Аналогічні результати отримано в лабораторних умовах на відрізках листків: реакція Thatcher і *TcLr14a* відповідала 40S–60S, тоді як *TcLr34* проявляла значно вищу стійкість (10S–25S). Встановлено, що ефективність гена *Lr34* залежала від температурних умов. За температури повітря до +20°C розвиток бурої листової іржі істотно стримувався, тоді як при її підвищенні рівень ураження рослин зростає з 5% до 50–65%, що свідчить про зниження ефективності дії гена *Lr34* за високих температур і узгоджується з даними літератури (McCallum et al., 2021; Sychala et al., 2023).

У міжлінійних гібридах F_1 *TcLr34* × *TcLr14a* та *TcLr14a* × *TcLr34* встановлено негативну епістатичну взаємодію між досліджуваними генами. Незважаючи на наявність гена *Lr34*, комбінація *Lr34* + *Lr14a* не забезпечувала очікуваного рівня стійкості: за результатами лабораторної оцінки всі 24 рослини, у яких молекулярно-генетичним аналізом підтверджено одночасну наявність генів *Lr14a* та *Lr34*, мали фенотипову реакцію 40S, що свідчить про супресію дії гена *Lr34* геном *Lr14a*.

Молекулярно-генетичний аналіз двох популяцій F_2 , отриманих від реципрокних схрещувань *TcLr34* × *TcLr14a* (50 рослин) та *TcLr14a* × *TcLr34* (76 рослин), підтвердив очікуване розщеплення за генами *Lr14a* і *Lr34*. Фітопатологічна оцінка показала повну відповідність фенотипового прояву встановленому негативному епістазу: рослини з комбінацією *Lr34* + *Lr14a* за рівнем стійкості не відрізнялися від носіїв *Lr14a*, тоді як помірну стійкість (MS) проявляли лише генотипи, що містили *Lr34* без *Lr14a*.

Виявлена негативна епістатична взаємодія між генами *Lr14a* та *Lr34* має важливе практичне значення для селекції пшениці, оскільки присутність *Lr14a* може маскувати фенотиповий прояв стійкості, зумовлений геном *Lr34*. Раніше було встановлено, що ген *Lr34* у поєднанні з генами *Lr10*, *Lr13*, *Lr20*, *Lr21*, *Lr26* та *Lr^{Amigo}* підвищує рівень стійкості сортів пшениці селекції СГІ–НЦНС (Gorash et al., 2014; Галаєв та ін., 2015). Натомість результати цього дослідження свідчать, що присутність гена *Lr14a* може пригнічувати фенотиповий прояв стійкості, зумовлений геном *Lr34*, і, відповідно, знижувати ефективність його використання в генетичних комбінаціях. З огляду на поширення обох генів у сучасному селекційному матеріалі України, встановлену взаємодію необхідно враховувати під час добору батьківських компонентів та формування генетичних комбінацій у програмах селекції на стійкість до бурої листової іржі.

ПОЛІПШЕННЯ БАЗОВОЇ ІНБРЕДНОЇ ЛІНІЇ КУКУРУДЗИ ДК744 (*ZEА MAYS L.*), СПОРІДНЕНОЇ З ПЛАЗМОЮ АЙОДЕНТ

Б. В. Дзюбецький, Н. А. Боденко, Т. О. Пересунько

*ДУ «Інститут зернових культур НААН України», Дніпро, Україна,
e-mail: bode.n@ukr.net*

Селекція кукурудзи ДУ «Інститут зернових культур НААН України» (ДУ ІЗК) в основному базується на використанні вихідного матеріалу декількох плазм: Рейд, Ланкастер, Айодент, Лакауне, які добре комбінують між собою при схрещуваннях (Dziubetskyi et al., 2002; Cherchel et al., 2020; Дзюбецький та ін., 2025). Аналіз родоводу зареєстрованих та пілотних гібридів кукурудзи виявив, що більшість з них представлені гетерозисними моделями на основі ліній плазми Айодент, які схрещувалися з лініями плазм Ланкастер, Рейд. Тому розширення генетичного складу вихідного матеріалу цих плазм, особливо Айодент, має велике теоретичне і практичне значення. Щодо генотипу ліній Айодент, першочергово необхідно підвищити їх посухо- та жаростійкість, толерантність до поширених хвороб, здатність формувати повноцінний урожай при одночасному цвітінні батьківських і материнських суцвіть, вихід насіннєвої продукції і інше.

Для вирішення цих проблем проводилися дослідження в ДУ ІЗК протягом 2010–2024 рр. відповідно до стандартної методики польових дослідів із кукурудзою. За основу була взята середньорання лінія ДК744 – батьківська форма занесених до державного реєстру сортів рослин України гібридів кукурудзи Почаївський 190МВ, Дніпровський 181СВ, ДЗ Латориця та ін. Для реалізації програми вона була схрещена з середньопізньою лінією ДК6498 (цієї ж плазми) і на цій основі протягом 2010–2017 рр. у селекційному розсаднику проведено декілька циклів самозапилення при постійному контролі за бажаними ознаками в процесі добору. Отримані самозапилені сім'ї різних генерацій порівнювали за різними ознаками з вихідною лінією ДК744.

Були виділені самозапилені сім'ї, які за основними показниками, або за окремими з них, перевищували вихідну лінію ДК744. Виділені кращі лінії (умовна назва ДК4464), для визначення їх комбінаційної здатності, схрещували з 3–4 тестерами альтернативних гетерозисних груп. Серед ліній цієї групи 31,25 % мали позитивне значення ефектів загальної комбінаційної здатності (ЗКЗ), 18,75 % – негативне і у 50,0 % воно було нестабільним за роками. Позитивні оцінки ефектів ЗКЗ відзначено, зокрема, у ліній ДК4464 13-11, ДК4464 15-21, ДК4464 62-11, ДК4464 62-13, ДК4464 62-21 та ДК4464 62-22. Ефекти ЗКЗ за показником «врожайність зерна» у лінії-стандарту ДК744 були негативними в усі роки досліджень та достовірно нижчими ніж у 56 % ліній цієї групи.

Для подальшого розширення бази середньоранніх ліній плазми Айодент і поліпшення лінії ДК744, згідно з вказаною схемою, у 2017 р. розпочато наступний цикл селекції. Було відібрано за комплексом селекційних ознак лінії ДК4464 15-21, ДК4464 62-11, ДК4464 62-13, які характеризувались високими оцінками ефектів ЗКЗ (0,75; 0,32; 0,32 т/га відповідно). Нові лінії відбирали за комплексом ознак, властивим цій групі, віддавали перевагу рекомбінантам з короткою тривалістю періоду сходо-цвітіння качана та волоті порівняно зі стандартом. Як донор використали лінію ДК4001, що характеризувалася високою вирівняністю параметрів насіння. Комплементарне поєднання потенціалу продуктивності цих ліній є ефективним способом поліпшення ліній групи ДК4464 за рахунок нових джерел сприятливих генів. У зв'язку із складністю успадкування багатьох цінних господарських ознак застосовували різні схеми селекційних робіт: рекомбінація, самозапилення, жорсткий добір, що поступово зумовлювало накопичення позитивних ознак, стосовно яких вівся добір. Протягом 2019–2021 рр. проводилося самозапилення рослин та фенотипічний добір за ознаками: тривалість періоду сходо-цвітіння качанів і волоті, висота рослин та прикріплення качана, ламкість стебла, стійкість до хвороб та шкідників, посухо- та жаростійкість. Після

проведених доборів за цінними господарськими ознаками кращі рослини було самозапилено та одночасно схрещено з тестером ($t \times S_3$) і ($t \times S_4$).

Після попередньої оцінки самозапилених сімей S_4 в селекційному розсаднику за цінними господарськими ознаками та їх тест-кросів у контрольному розсаднику для подальшої роботи було відібрано наступні лінії (ДК4464 15-21 $\times$ ДК4001) 9111, (ДК4464 62-11 $\times$ ДК4001) 6131, (ДК4464 62-11 $\times$ ДК4001) 13-121, (ДК4464 62-11 $\times$ ДК4001) 16-231, (ДК4464 62-13 $\times$ ДК4001) 13-311, урожайність та вологість зерна тест-кросів яких склали: 6,84; 6,57; 6,55; 6,64 і 6,60 т/га та 10,7; 9,0; 9,9; 8,3 і 9,9 % відповідно. У лінії-стандарту ДК744 ці показники склали 6,19 т/га і 10,3 % відповідно.

У результаті 2-х циклів кумулятивної селекції на базі лінії ДК744 створено лінії (ДК4464 15-21 $\times$ ДК4001) 9111, (ДК4464 62-11 $\times$ ДК4001) 6131, (ДК4464 62-11 $\times$ ДК4001) 13-121, (ДК4464 62-11 $\times$ ДК4001) 16-231, (ДК4464 62-13 $\times$ ДК4001) 13-311, кращі за комплексом ознак порівняно з вихідною лінією ДК744 і тест-кроси, яких перевищували за урожайністю зерна гібриди лінії ДК744 на 0,36–0,65 т/га та відзначалися нижчою або на їх рівні вологістю зерна.

ЛІТЕРАТУРА

- Dziubetskyi, B.V., Cherchel, V.Yu. *Plant Breeding and Seed Production*. 2002. 86:11–19.
- Cherchel, V.Yu., Kupar, Yu.Yu., Tahantsova, M.M., Stasiv, O.F. *Plant Varieties Studying and Protection*. 2020. 16(4):378–386.
- Дзюбецький Б.В., Черчель В.Ю., Алдошин А.В., Боденко Н.А., Купріченков Д.С. *Селекція кукурудзи: навч. посіб.* Київ. 2025. 216 с.

ЕФЕКТИВНІСТЬ РІЗНИХ КОМБІНАЦІЙ ІНДУКЦІЙНИХ ТА РЕГЕНЕРАЦІЙНИХ СЕРЕДОВИЩ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ПОДВОЄНИХ ГАПЛОЇДІВ ПШЕНИЦІ М'ЯКОЇ ОЗИМОЇ МЕТОДОМ КУЛЬТУРИ ПИЛЯКІВ *IN VITRO*

І. С. Замбріборщ, О. Л. Шестопа, Є. А. Голуб, Є. І. Кірчук

*Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннєзнавства та сортовивчення,
Одеса, Україна, e-mail: izambriborsh@gmail.com*

Пшениця м'яка озима є однією з найважливіших продовольчих культур світу, а прискорення селекційного процесу залишається одним із ключових завдань сучасної аграрної науки. Спричинені кліматичними змінами підвищення температурного режиму та поширення нових рас фітопатогенів надають особливої актуальності створенню селекційного матеріалу, поєднаного за комплексом ознак стійкості та високої адаптивності. Значних втрат урожаю на півдні України завдає бура іржа пшениці, тому важливим завданням сучасної селекції є створення вихідного матеріалу з комплексною стійкістю до бурої іржі з використанням донорів ефективних генів *Lr* та пшенично-пирійних транслокацій, які забезпечують стабільну адаптацію рослин в умовах півдня України (Алексєєнко, Кірчук, 2022).

На сьогодні одним із найефективніших методів скорочення термінів створення нових сортів є технологія отримання подвоєних гаплоїдів (ДН-ліній), яка забезпечує швидку гомозиготацію селекційного матеріалу вже протягом одного покоління. Серед біотехнологічних підходів особливе місце посідає культура пиляків *in vitro*. Проте ефективність андрогенезу значною мірою залежить від генотипу рослин-донорів, складу поживних середовищ та умов культивування, які істотно впливають на індукцію ембріогенезу, регенерацію зелених рослин та частоту утворення альбіносів (Chaikam et al., 2019; Broughton et al., 2020; Murovec, Bohanec, 2024). У зв'язку з цим оптимізація умов отримання ДН-ліній на основі стійких до бурої іржі генотипів пшениці є актуальним напрямом сучасних досліджень у галузі адаптації рослин до стресових чинників середовища.

Метою роботи була оцінка впливу різних комбінацій індукційних та регенераційних живильних середовищ на індукцію новоутворень, регенерацію зелених і альбіносних рослин в культурі генотипів пиляків пшениці м'якої озимої, створених із залученням донорів стійкості до бурої іржі.

В культурі *in vitro* було введено пиляки 16 перспективних селекційних генотипів відділу селекції та насінництва пшениці СГІ-НЦНС. Колосся пшениці добирали з рослин-донорів на польових ділянках інституту, після 5–10 денної попередньої обробки (+2–4°C), колосся стерилізували 30 хв комерційним препаратом «Білизна» та асептично виділяли пилякі, які надалі культивували на трьох індукційних живильних середовищах (190-2, W14, СВН3). Через 20–40 діб на поверхні пиляків формувалися новоутворення (калюс). Останні переносили на тверде безгормональне середовище MS з половинною концентрацією макро- та мікроелементів. Культивування здійснювали за 16-годинного фотоперіоду, освітленості – 5 тис. люкс і температури +24°C до формування коренів у рослин. Відсоток калюсів для кожного генотипу визначали відносно загальної кількості висаджених пиляків. Також визначали загальну для кожного варіанта кількість добре розвинутих рослин-регенерантів на 100 одержаних новоутворень. Після етапу адаптації до ґрунтових умов регенеранти піддавали яровизації та подальшому дорощуванню в умовах штучного клімату. Приживаність рослин-регенерантів оцінювали як частку рослин, що вижили після етапів адаптації та яровизації, відносно загальної кількості нормально сформованих зелених регенерантів.

Показано, що усі досліджені генотипи виявилися чутливими до умов культури. Так, на першому етапі андрогенезу *in vitro* новоутворення отримані в культурі пиляків майже всіх варіантів досліджу, крім для генотипів G2 (середовище 190-2) та G3 (середовище СВН3). В середньому індукційне середовище W14 виявилось достовірно кращим для даного набору генотипів – 12,45 % від

висаджених пиляків, що у 5,7 рази вище від цього показника на середовищі 190-2 та у 1,7 рази для середовища СВНЗ. Отримані новоутворення пересаджували на три варіанти середовищ для регенерації: 190-2Cu, MS-R, SRMC4. Частота регенерації зелених рослин істотно залежала від складу як індукційного, так і регенераційного середовища. Найвищі середні показники регенерації зелених рослин були отримані після культивування пиляків на індукційному середовищі W14 з подальшим перенесенням новоутворень на середовище SRMC4 ($28,01 \pm 7,09 \%$) та 190-2Cu ($25,70 \pm 8,44 \%$). Мінімальні значення спостерігалися у варіанті з використанням індукційного середовища СВНЗ та регенераційного середовища 190-2Cu ($8,40 \pm 4,86 \%$). Щодо регенерації альбіносних рослин, то найнижчий рівень альбінізму відзначено за культивування на комбінації середовищ W14 / MS-R (0,89 %), тоді як найвищий – на СВНЗ / SRMC4 (10,32 %). Оцінювали співвідношення зелених та альбіносних регенерантів у межах кожного з 9 варіантів досліджу. Максимальний результат спостерігали при культивуванні на комбінації середовищ W14/MS-R – 3,56, що свідчить про ефективне пригнічення розвитку альбіносів за цих умов культивування.

Приживаність регенерантів після перенесення в ґрунт варіювала від 33,3 до 75,0 %. Найвищий показник зафіксовано для середовища 190-2/190-2Cu. Рівень спонтанної диплоїдизації отриманих рослин був високим і залежав від умов культивування. Максимальні значення (100 %) відзначені для комбінацій 190-2/190-2Cu та СВНЗ/190-2Cu, тоді як серед варіантів з високою продуктивністю найкращі результати показало середовище W14/190-2Cu, де частка фертильних рослин становила 57,14 %.

Таким чином, серед досліджених варіантів найбільш ефективним для отримання зелених регенерантів та подальшого формування фертильних рослин виявилось індукційне середовище W14. Щодо регенераційного середовища, то отримані результати експерименту не дозволили визначити кращий варіант, і дане питання потребує подальшого дослідження.

ЛІТЕРАТУРА

- Алексєєнко Є.В., Кірчук Є.І. *Аграрні інновації*. 2022. 15:72–79. doi: 10.32848/agrar.innov.2022.15.12.
Chaikam V., Nair S. K., Martinez L. et al. *Theoretical and Applied Genetics*. 2019. 132:3227–3243.
Broughton S., Sidhu P., Davies P. *Plants*. 2020. 9(1). Art. 105. doi: 10.3390/plants9010105.
Murovec J., Bohanec B. *Plant Cell Rep*. 2024. 43:1–18.

**У-ВІРУС КАРТОПЛІ ТА ГЕНЕТИЧНІ МАРКЕРИ ГЕНІВ СТІЙКОСТІ
ЯК ЕЛЕМЕНТ ЗАХИСТУ РОСЛИН**

С. О. Кириченко¹, Р. О. Бондус², Л. Т. Міщенко³, І. О. Созінов¹, Н. О. Козуб¹

¹Інститут захисту рослин НААН України, Київ, Україна,
e-mail: syvatoslavkirichenko@gmail.com

²Устимівська дослідна станція рослинництва Інституту рослинництва ім. В.Я. Юр'єва
НААН України, с. Устимівка, Полтавська область, Україна
e-mail: bondus1971@gmail.co

³ННЦ «Інститут біології та медицини», Київський національний університет
ім. Тараса Шевченка, Київ, Україна.
e-mail: lmishchenko@ukr.net

Вірусні хвороби належать до найбільш небезпечних біотичних чинників, що обмежують продуктивність сільськогосподарських культур. Частка вірусних хвороб в агроценозі картоплі становить 31,0 % (Бородай, Парфенюк, 2018). На відміну від грибних чи бактеріальних хвороб, ефективних засобів хімічного чи біологічного контролю вірусних інфекцій рослин на сьогодні не існує, тому основними напрямками захисту є профілактика поширення вірусів, контроль переносників та створення стійких сортів. У насадженнях картоплі найбільше економічне значення мають У-вірус картоплі (*Potato virus Y*, PVY), вірус скручування листків картоплі (*Potato leafroll virus*, PLRV), Х-вірус картоплі (PVX), А-вірус картоплі (PVA), М-вірус картоплі (PVM). Серед них найнебезпечнішим вважається PVY, поява і розповсюдження рекомбінантних штамів якого вивела його на перше місце серед вірусних хвороб за шкідливістю на картоплі. Особливістю картоплі є те, що віруси накопичуються при багаторазовому вегетативному розмноженні, тому навіть слабкі інфекції поступово призводять до виродження сорту. Даний вірус здатний знижувати врожайність аж до 80 %, а в окремих випадках і більше (Дуніч та ін., 2024).

У селекції картоплі найважливішими генами стійкості до PVY є *Ry*-гени, які забезпечують екстремальну стійкість до цього віруса. Ген стійкості *Ry_{adg}* походить від *S. tuberosum* subsp. *andigena* Hawkes і він картований на хромосомі XI (Hämäläinen et al., 1997). Локус, що містить *Ry_{adg}*, використовується в програмах виведення стійких сортів, він ефективний проти всіх відомих штамів PVY, включаючи PVY^{NTN} (Herrera et al., 2018). Ген *Ry_{sto}* походить від виду *S. stoloniferum* Schltdl. & Bouché, він розміщений на хромосомі XII. Вважалося, що *Ry_{sto}* забезпечує стійкість до PVY та PVA (Barker, 1996). Ген *Ry_{chc}* від *S. chacoense* Bitt. картовано на IX хромосомі (Sato et al., 2006). Стійкість у *S. chacoense* успадковується домінантно, моногенно. Сучасні селекційні програми активно використовують ДНК-маркери, пов'язані з цими генами, що значно прискорює створення вірусостійких сортів методом маркер-асоційованої селекції (MAS). Метою нашої роботи була молекулярна ідентифікація *Ry*-генів у вибірках українських зразків картоплі.

Досліджували українські сорти картоплі з колекції Устимівської ДС та зразки експедиційних зборів. ПЛР проводили на приладі «2720 Thermal Cycler» («Applied Biosystem», США) в 20 мкл суміші з використанням набору реагентів ТОВ «Неоген», Україна, PCR MIX 2x HOT для проведення ПЛР. Для ідентифікації гена *Ry_{adg}* використовували молекулярний маркер *RYSC3*, для визначення *Ry_{sto}* використовували *YES-3A*, а *Ry_{chc}* визначали за допомогою *RY1648F24/R22*.

Серед 93 зразків сортів картоплі, які досліджувалися на наявність гена стійкості *Ry_{adg}*, було виявлено три зразки-носії маркера гена, що склало 3,2 %. Серед вибірки 63 українських сортів виявлено 10 носіїв маркера гена стійкості *Ry_{sto}*, тобто 18,9 %, а серед 95 сортів української селекції,

які тестували на наявність $R_{y_{che}}$ – 16, що склало 16,8 %. Серед 40 колекційних зразків експедиційних зборів не було знайдено жодного зразка, який би мав маркер гена стійкості до Y-вірусу картоплі.

Використання молекулярно-генетичних методів і маркер-асоційованої селекції дозволяє ефективніше створювати сорти з довготривалою стійкістю до вірусних патогенів та зменшувати втрати врожаю.

Дослідження було проведено за фінансової підтримки С.О. Кириченка та Л.Т. Міщенко в рамках проекту НФДУ № 2023.03/0244 «Механізми резистентності економічно важливих культур до вірусних захворювань в умовах воєнного стану та глобального потепління» за конкурсом «Передова наука в Україні».

ЛІТЕРАТУРА

- Бородай, В.В., Парфенюк, А.І. (2018) *Агроекологічний журнал*. 4, 82-87. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2018.161774>
- Дуніч, А., Кириченко, С., Міщенко, І., Молодченкова, О., Бондус, Р., Дашенко, А., Міщенко, Л. (2024). *Карантин і захист рослин*. (4), 12-17. <https://doi.org/10.36495/2312-0614.2024.4.12-17>
- Barker, H. (1996). *TAG. Theoretical and Applied Genetics*. 93(5-6), 710–716. <https://doi.org/10.1007/BF00224066>
- Hämäläinen, J.H., Watanabe, K.N., Valkonen, J.P., Slack, S.A. (1997). *Theoretical and Applied Genetics*, 94, 192-197. <https://doi.org/10.1007/s001220050399>
- Herrera, M. D. R., Vidalon, L. J., Montenegro, J. D., Ghislain, M. (2018). *Theoretical and Applied Genetics*. 131(9), 1925–1938. <https://doi.org/10.1007/s00122-018-3123-5>
- Sato, M., Nishikawa, K., Komura, K., Hosaka, K. (2006). *Euphytica*. 149:367–372. <https://doi.org/10.1007/s10681-006-9090-y>

ВПЛИВ МІНЛИВИХ МІКРОКЛІМАТИЧНИХ УМОВ НА ФОТОСИНТЕТИЧНИЙ АПАРАТ МОХІВ ЛІСОВИХ ЦЕНОЗІВ

Н. Я. Кияк

Інститут екології Карпат НАН України, Львів, Україна, e-mail: n.kuyak5@gmail.com

За біомасою та продуктивністю бріофіти часто є домінантами рослинних угруповань у болотних та лісових екосистемах, де добре вивчена їх екологічна роль (Gao et al., 2020; Куйак, 2022). У лісових екосистемах мохоподібні беруть участь у регуляції ґрунтового мікроклімату, насамперед температурного та водного режиму, кругообігу поживних речовин (Turetsky et al., 2012; Glime, 2019). Однак, фотосинтетична активність бріофітів, зокрема, інтенсивність асиміляції CO₂, активність рибулозо-1,6-бісфосфаткарбоксилази/оксигенази та їх залежність від мікрокліматичних умов вивчені недостатньо, порівняно з судинними рослинами (Pereira-Castro et al., 2021). Важливе значення має і специфіка організації гаметофіту мохів (пойкілогідричність, невеликі розміри, односторонова листкова пластинка, відсутність епідермісу, продихів, кутикули) (Glime, 2019). Тобто, клітини, в яких відбувається фотосинтез, не захищені від підвищеної інсоляції, зневоднення та інших негативних чинників, тому їх існування у мінливих умовах може значною мірою забезпечуватися пластичністю фотосинтетичного апарату.

У зв'язку з цим метою роботи було дослідження фотосинтетичної активності ендогідричних та ектогідричних видів мохів на дослідних ділянках Природного заповідника «Розточчя» (Львівська обл.), що відрізнялися за водним і температурним режимами місцезростань.

Об'єктами досліджень були епігейні мохи лісових угруповань: лісові ендогідричні мохи *Polytrichum formosum* Hedw., *Atrichum undulatum* (Hedw.) P. Beauv. та рудеральний космополітний ектогідричний мох *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid. Дослідження проводили упродовж червня-серпня 2024–2025 рр. Дослідні ділянки було закладено у старовіковому буковому лісі із найбільш сприятливими мікрокліматичними умовами та на ділянках рекреації й вирубки із несприятливим водним і температурним режимами та високою інсоляцією. Дослідження здійснювали за загальноприйнятими методиками. Вміст фотосинтетичних пігментів визначали за методом Г. Хольма та Д. Ветштейна (Holm, 1954; Wettstein, 1957). Карбоксилазну активність рибулозо-1,6-бісфосфаткарбоксилази/оксигенази (Рубіско) визначали спектрофотометрично з використанням АТФ і НАДФН, як кофактора реакції (Войцехівська та ін., 2010). Інтенсивність фотосинтезу визначали безкамерним способом за накопиченням у листках органічного карбону (Паршикова та ін., 2010).

Досліджено кількісний склад фотосинтетичних пігментів у пагонах мохів. Лісові види мохів (*Atrichum undulatum*, *Polytrichum formosum*) більше приурочені до затінених локалітетів (інтенсивність освітлення становила 20,5–40,0 тис. лк, температура повітря на поверхні ґрунту 24,3–26,5°C, вологість повітря на поверхні ґрунту 38,4–42,5%), тоді як дернини *Ceratodon purpureus* трапляються у відкритих, сухих місцезростаннях (інтенсивність освітлення 85,0–100,0 тис. лк, температура повітря на поверхні ґрунту 26,2–36,0°C, вологість повітря на поверхні ґрунту 25,8–26,5%). Аналіз кількісного складу фотосинтетичних пігментів у пагонах мохів продемонстрував вищі показники сумарного вмісту хлорофілів (3,12–4,07 мг/г маси сухої речовини) у зразках лісових видів *P. formosum* й *A. undulatum*. Варто відзначити, що ендогідричним видам мохів властива внутрішня провідність води, що забезпечує вищий і стабільніший вміст вологи в організмі, що також є сприятливим для функціонування фотосинтетичного апарату. Для зразків цих видів мохів із території рекреації та вирубки в умовах погіршення водного та температурного режиму відзначено зменшення вмісту хлорофілів на 9–35%. У пагонах ектогідричного моху *C. purpureus* визначено меншу кількість хлорофілів (1,72–2,36 мг/г маси сухої речовини). Рослини цього виду частіше трапляються на ділянках із високою інтенсивністю освітлення, що змінює кількісний склад фотосинтетичного апарату, оскільки виявлено зростання частки каротиноїдів у загальному пулі пігментів, що засвідчує їх фотопротекторну функцію в умовах високої інсоляції та несприятливого водного й температурного режиму. У зв'язку з цим співвідношення кількості хлорофілів до каротиноїдів у пагонах *C. purpureus* становило 1,43–1,94, для рослин *P. formosum* й *A. undulatum* на дослідній ділянці старовікового лісу цей показник був вищим (3,05–3,57), хоча на території вирубки за

вищого рівня інсоляції знижувався до 1,81–1,99, що також свідчило про зростання вмісту каротиноїдів у хлоропластах і їх захисну роль.

Через приуроченість мохів у лісових ценозах до затінених місцезростань, співвідношення хлорофілів *a/b* у пігментному комплексі досліджуваних рослин на ділянці у старовіковому лісі було у межах 1,91–2,01, що є близьким до показників тіневитривалих рослин. У несприятливих мікрокліматичних умовах на території рекреації та вирубки відзначено зниження співвідношення хлорофілів *a/b* до 1,17–1,74. Відзначено, що у зразках мохів із дослідної ділянки у старовіковому буковому лісі із сприятливішими умовами частка хлорофілу *a* в сумарному пулі зелених пігментів становила, в середньому, 65–67 %, тоді як у пагонах мохів на території рекреації та вирубки цей показник зменшувався до 52–56 %, що могло бути зумовлене зменшенням кількості хлорофілу *a* в реакційних центрах фотосистем унаслідок фотоінгібування і призвело до порушення співвідношення між вмістом хлорофілів у реакційних центрах і антенних комплексах. Збільшення частки Хл *b* під впливом високої інсоляції, водного і температурного стресу може бути проявом компенсаторної адаптивної відповіді пігментного апарату на зміну мікрокліматичних умов місцезростань, оскільки відомо, що хлорофіл *b* у хлоропластах мохів менше руйнується завдяки вищій гідратованості та міцнішим зв'язкам у хлорофіл-білкових комплексах (Кияк, 2018; Glime, 2019).

Відомо, що рибулозо-1,6-бісфосфаткарбоксилаза/оксигеназа є одним із основних лімітаційних чинників фотосинтезу та продуктивності мохів, а її активність істотно залежить від умов водозабезпечення рослин (Perera-Castro et al., 2022). Тому дослідили карбоксилазну активність Рубіско та її зв'язок з інтенсивністю фотосинтезу мохів у різних мікрокліматичних умовах. Активність ферменту у пагонах *Polytrichum formosum*, *Atrichum undulatum* і *Ceratodon purpureus* варіювала в межах 19,9–60,1 мкмоль H^+ /мг білка/хв залежно від виду та умов місцезростання. У старовіковому лісі за вищого вмісту вологи в дернинах (56,2–70,4 %) карбоксилазна активність була максимальною (43,8–60,1 мкмоль H^+ /мг білка/хв), особливо в *A. undulatum*. Суттєві відмінності визначено у мохів із дослідних ділянок на території рекреації та вирубки, де у літні місяці зафіксовано найбільш несприятливі умови водного режиму й температури, а також високу інтенсивність освітлення. У таких умовах дернини ендогідричних мохів *P. formosum* й *A. undulatum* менше втрачали вологи (відносний вміст вологи у пагонах становив 42,4–55,0 %), що призводило до часткового зниження карбоксилазної активності Рубіско на 20–26 %. У гаметофіті ектогідричного моху *C. purpureus* на ділянках вирубки та рекреації визначено зниження активності ферменту майже удвічі (до 19,9 мкмоль H^+ /мг білка/хв), що зумовлене дефіцитом вологи у дернинах моху (відносний вміст вологи у рослинах становив 24,3–28,7 %).

Відмінності у карбоксилазній активності Рубіско у гаметофіті мохів вплинули і на показники інтенсивності фотосинтезу рослин. Показники асиміляції CO_2 у пагонах мохів були вищими у старовіковому буковому лісі. Для ендогідричних мохів *Polytrichum formosum* й *Atrichum undulatum* відзначено фотосинтетичну активність на рівні 4,23–4,74 мг CO_2 /г маси с.р./год, для *Ceratodon purpureus* – 2,6 мг CO_2 /г маси с.р./год. На ділянках із підвищеною інсоляцією, несприятливим водним і температурним режимом, фотосинтетична активність мохів знижувалася майже в 1,5–2,0 рази. Суттєвіші зміни визначено у зразках *C. purpureus*. Відзначено високий зв'язок ($r=0,88$) між активністю Рубіско й показниками інтенсивності фотосинтезу мохів. Отже, карбоксилазна активність рибулозо-1,6-бісфосфаткарбоксилази/оксигенази є важливим показником інтенсивності фотосинтезу мохів лісових екосистем і залежить від особливостей їх водного режиму.

Таким чином, відзначено пластичність фотосинтетичного апарату мохів (вмісту хлорофілів і каротиноїдів, співвідношення Хл *a/b*), що свідчить про адаптацію бріофітів до зміни водного й температурного режиму та інтенсивності світла. Лісові ендогідричні мохи *Atrichum undulatum* і *Polytrichum formosum* характеризувалися вищим умістом хлорофілів та меншою часткою каротиноїдів у сумарному пулі пігментів, порівняно з ектогідричним мохом *Ceratodon purpureus*. У несприятливих умовах у пагонах мохів виявлено зростання кількості каротиноїдів, зменшення частки хлорофілу *a* в сумарному пулі хлорофілів до 52–56 % та збільшення частки хлорофілу *b*. Карбоксилазна активність рибулозо-1,6-бісфосфаткарбоксилази/оксигенази є індикатором інтенсивності фотосинтезу мохів і залежить від особливостей їх водного режиму. Вища активність асиміляції CO_2 в ендогідричних мохів *Atrichum undulatum* і *Polytrichum formosum* забезпечувалася вищими та стабільнішими показниками активності Рубіско, порівняно з ектогідричним мохом *Ceratodon purpureus*.

ФОРМУВАННЯ АДАПТИВНИХ РЕАКЦІЙ МОХІВ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ УКРАЇНСЬКОГО РОЗТОЧЧЯ ЗАЛЕЖНО ВІД МІКРОКЛІМАТИЧНИХ УМОВ ЕКОТОПІВ

Н. А. Кіт, О. І. Щербаченко

*Інститут екології карпат НАН України, Львів, Україна,
e-mail: ecomorphogenesis@gmail.com*

Бріофіти є пойкилогідричними рослинами, які не здатні регулювати транспірацію, легко й швидко втрачають і поглинають воду, тому значною мірою залежать від вологості і температури навколишнього середовища. Мохоподібні є однією з чутливих груп рослин до змін кліматичних умов, які мають інші порівняно із судинними рослинами фізіолого-біохімічні механізми пристосування до дефіциту вологи і екстремальних температур. Відомо, що бріофіти завдяки багаторівневій адаптаційній стратегії стійкі до несприятливих умов навколишнього середовища, зокрема до водного дефіциту, екстремальних температур, підвищеної інсоляції (Lobachevska et al., 2019; Баїк, Кіт, 2022). Пігментна система рослин є чутливою до змін мікрокліматичних умов середовища, а кількісні й якісні зміни пігментів вважають інформативними біоіндикаційними показниками змін умов середовища існування. У стійкості рослин до дії стрес-факторів значну роль відіграють неспецифічні захисні системи, зокрема антиоксидантна система. Важлива роль в адаптивних реакціях рослин належить супероксиддисмутазі (СОД), пероксидазі і каталазі, що є ферментативними компонентами антиоксидантної системи, активність якої визначає рівень стійкості рослин до несприятливих факторів зовнішнього середовища (Jiroutova et al., 2021).

Досліджували вміст фотосинтетичних пігментів, активність фотосинтезу та ферментів антиоксидантного захисту СОД, пероксидази і каталази у клітинах гаметофітів *Atrichum undulatum* (Hedw.) P.Beauv. та *Plagiomnium elatum* (Bruch & Schimp.) T.J. Кор., зібраних на дослідних ділянках лісових екосистем з відмінними мікрокліматичними умовами: ділянка № 1 – зона повного заповідання старовікових букових лісів Верещицького природоохоронного науково-дослідного відділення (температура повітря 21–23°C, вологість повітря 33–35 %, інтенсивність світла 40–50 тис. лк); ділянка №2 – територія вирубки Страчанського навчально-виробничого лісокомбінату (температура повітря 28–30°C, вологість повітря 20–22 %, інтенсивність світла 80–90 тис. лк); ділянка № 3 – зона стаціонарної рекреації «Верещиця» Яворівського національного природного парку (температура повітря 26–28°C, вологість повітря 26–28 %, інтенсивність світла 90–100 тис. лк).

Як свідчать результати досліджень, у *Atrichum undulatum* та *Plagiomnium elatum* найбільшу кількість хлорофілів визначено на дослідних ділянках у зоні повного заповідання, що зумовлено сприятливими гідротермічними умовами у цих екотопах. Вміст пігментів фотосинтезу у гаметофіті мохів на ділянках вирубки і рекреації зменшувався. На відкритих ділянках із високою інтенсивністю освітлення у пігментному складі зменшувалася відносна частка зелених пігментів (0,65–1,13 мг/г маси с. р.) і зростає вміст каротиноїдів (0,71–0,99 мг/г маси с.р.). Така реакція фотосинтетичної системи видів може бути зумовлена, зокрема, особливостями їх життєвої форми, зокрема щільної дернинки, яка має добру водоутримуючу здатність і навіть за високої інтенсивності освітлення у відкритих екотопах рівень оводненості їх листків становив 49–56 %. Встановлено залежність кількісного складу пігментів у мохах від рівня оводненості їх дернин та зміни інтенсивності світла.

Для мохів як пойкилогідричних рослин вологість є лімітаційним чинником фотосинтетичних процесів. Визначено, що на території повного заповідання у *Plagiomnium elatum* середнє значення інтенсивності фотосинтезу становило $3,02 \pm 0,1$ мг·СО₂/г маси с.р./год, тоді як у *Atrichum undulatum* – $3,74 \pm 0,3$ мг СО₂/г маси с.р./год, що було у 1,2 і 1,1 раза вищими, ніж у рослин із те-

риторії рекреації і вирубки. Виявлено високу залежність показників інтенсивності фотосинтезу листків домінантних мохів від вмісту вологи у їх дернинах та верхньому шарі ґрунту під дернинами на дослідних ділянках лісових екосистем. Найнижчу інтенсивність асиміляції CO₂ визначено у гаметофіті мохів на ділянках з рекреаційним навантаженням. Ймовірно, вища інтенсивність освітлення призводила до порушення водного й температурного режиму рослин, а відтак і до зниження їхньої фотосинтетичної активності.

СОД є одним із маркерних ферментів, що забезпечує первинний захист клітин і тканин від окислювальних ушкоджень, каталізуючи реакцію дисмутації супероксидного аніон-радикала і першим активується у відповідь на стрес. Встановлено, що найвища активність ферменту характерна для пагонів досліджуваних мохів з території вирубки. Для *Atrichum undulatum* цей показник становив $2,83 \pm 0,2$ відн. од./хв мг/білка, а для *Plagiomnium elatum* – $2,42 \pm 0,2$ відн. од./хв мг/білка. Найменшу активність СОД ($1,72$ – $1,95$ відн. од./хв мг/білка) відзначено у пагонах мохів із дослідних ділянок у старовіковому буковому лісі в сприятливих мікрокліматичних умовах. Таким чином, СОД відіграє важливу роль в захисті клітин і тканин від окислювальних пошкоджень за впливу несприятливих факторів зовнішнього середовища.

Активність пероксидази у досліджуваних видів мохів на антропогенно порушених територіях була більшою порівняно із заповідними. Так, для *Atrichum undulatum* активність пероксидази у несприятливих умовах водно-температурного режиму була вищою в $2,0$ – $2,4$ рази порівняно з заповідними територіями, і становила на вирубці і зоні рекреації $19,4 \pm 1,7$ відн. од./г с. і $16,3 \pm 1,5$ відн. од./г с. відповідно. Для *Plagiomnium elatum* активність пероксидази була менш мінливою, проте найбільші значення ферменту відзначено на території вирубки ($12,7 \pm 1,2$ відн. од./г с.), що в $1,6$ рази перевищувало активність ферменту на дослідних ділянках у старовікових букових лісах.

Одним з найважливіших ферментів антиоксидантного захисту є каталаза, що каталізує реакцію перетворення пероксиду водню на воду та кисень. На відміну від пероксидаз цей фермент не потребує відновленого субстрату для активності. Результати дослідження каталази засвідчили, що на дослідних ділянках рекреації і вирубки в несприятливих умовах гідротермічного режиму її активність в пагонах досліджуваних мохів підвищувалася. Для *Atrichum undulatum* активність ферменту була найвищою ($6,5 \pm 0,7$ мкМ H₂O₂/мг білка хв.) на території вирубки, що в $1,9$ рази перевищувало активність ферменту на заповідній території старовікових букових лісів. Для *Plagiomnium elatum* активність ферменту на антропогенно порушених територіях була дещо меншою ($4,9 \pm 0,5$ мкМ H₂O₂/мг білка хв), проте була вищою порівняно з ділянками старовікових букових лісів у $1,3$ рази.

Отже, у мохів лісових екосистем Українського Розточчя *Atrichum undulatum* і *Plagiomnium elatum* у несприятливих умовах водозабезпечення пристосування до змін кліматичних умов відбувається завдяки зростанню активності ферментів антиоксидантного захисту СОД, каталази і пероксидази. Встановлено пряму залежність інтенсивності фотосинтезу мохів від рівня оводненості їх дернин. Показано, що діапазон мінливості фотосинтетичної активності домінантних мохів лісових екосистем залежав від їх видових особливостей та мікрокліматичних умов місцезростань і свідчить про високу пластичність мохів.

ЛІТЕРАТУРА

- Баїк О, Кіт Н. Вісник Львів. ун-ту. Серія біологічна. (2022). 87:76–89. <https://doi.org/10.30970/vlubs.2022.87.07>
- Jiroutova, P., Kovalikova, Z., Toman, J., et al. (2021). *Int. J. Mol. Sci.* 22(15), 7922. <https://doi.org/10.3390/ijms22157922>
- Lobachevska O.V., Kyiak N.Y., Rabyk I.V. (2019). *Biosystems Diversity*. 27(4):342–348. <https://doi.org/10.15421/011945>
- Scandalios, J.G. (2005). *Braz. J. Med. Biol. Res.* 38(7), 995–1014. <https://doi.org/10.1590/s0100-879x2005000700003>.

**ІДЕНТИФІКАЦІЯ ГЕНІВ ДОРОСЛОЇ СТІЙКОСТІ *Lr34* ТА *Lr68* В
УКРАЇНСЬКИХ СОРТАХ ПШЕНИЦІ М'ЯКОЇ ОЗИМОЇ**

**Н. О. Козуб^{1,2}, А. І. Шеховцова¹, І. О. Созінов¹, А. В. Карелов², О. І. Созінова^{1,2},
С. О. Кириченко¹, Я. Б. Блюм²**

¹ Інститут захисту рослин НААН України, Київ, Україна, e-mail: natalkozub@gmail.com

² ДУ «Інститут харчової біотехнології і геноміки НАН України», Київ, Україна

Переважна більшість генів стійкості до основних біотрофних патогенів пшениці (збудників бурії, стеблової і жовтої іржі, борошнистої роси) є расоспецифічними. Вони забезпечують стійкість на всіх стадіях розвитку рослини – від проростків до дорослих рослин. Проте через швидку еволюцію цих патогенів, такі гени швидко втрачають свою ефективність при масовому вирощуванні сортів з цими генами. Окрему групу складають гени расонеспецифічної стійкості, що залишаються ефективними протягом тривалого періоду часу і забезпечують помірний рівень стійкості до біотрофних патогенів. Їх називають генами дорослої стійкості (adult plant resistance (APR)), оскільки вони надають стійкість лише у дорослих рослин. Найбільш відомим геном дорослої стійкості є *Lr34* (*Lr34/Yr18/Pm38/Sr57/Bdv1*), що одночасно забезпечує помірну стійкість до трьох видів іржі та борошнистої роси, вірусу жовтої карликовості ячменю. На даний час ідентифіковано більше 15 генів тривалої стійкості, зокрема *Lr46/Yr29/Pm39/Sr58*, *Lr67/Yr46/Sr55/Pm46*, *Lr68*, *Sr2*. Метою нашого дослідження був аналіз частоти трапляння расонеспецифічних генів *Lr34* та *Lr68* у вибірках українських сортів пшениці м'якої озимої різного походження.

Досліджували сорти пшениці м'якої озимої, створені в різних селекційних установах України, зокрема, Селекційно-генетичному інституті – НЦНС НААН (СГІ), Миронівському інституті пшениці ім. В.М. Ремесла НААН (МІП), Білоцерківській дослідній станції (БЦДС), ННЦ Інститут землеробства НААН (ІЗ), Інституті фізіології рослин і генетики НАНУ. Насіння сортів було люб'язно надано Національним центром генетичних ресурсів рослин України. Для ідентифікації *Lr34* використовували мультиплексну реакцію з праймерами caISBP1 + caSNP12 (Dakouri et al. 2010), а для аналізу *Lr68* – маркер *csGS* (Herrera-Foessel et al. 2012).

Серед 319 проаналізованих сортів за маркером гена *Lr34* 116 мали лише алель стійкості *R*, а 59 були гетерогенним за присутністю цього алеля. Частота алеля *Lr34R* (з врахуванням гетерогенних сортів) була високою серед сортів БЦДС (74 %), СГІ (70 %), ІЗ (64 %) та нижчою серед сортів МІП (25 %). За маркером гена *Lr68* проаналізовано вибірку 72 сорти, створені переважно в СГІ та МІП. Ген стійкості *Lr68* виявився надзвичайно поширеним серед сортів СГІ (78 %), та зустрічався з частотою 15 % серед сортів МІП. У проаналізованій вибірці ідентифіковано 19 носіїв обох генів APR *Lr34* та *Lr68*, з яких 16 сортів створено в СГІ.

Отже, для сортів СГІ є характерною присутність расонеспецифічних генів стійкості *Lr34* та *Lr68*, водночас частота трапляння цих генів є значно нижчою серед сортів МІП. Очевидно, це є результатом як різного адаптивного значення цих генів у різних агрокліматичних зонах, так і відмінностей у підходах до селекції на стійкість до збудників іржі.

ЛІТЕРАТУРА

- Dakouri A. et al. *Theor. Appl. Genet.* 2010. 121(2):373–384
Herrera-Foessel S.A. et al. *Theor. Appl. Genet.* 2012. 124(8): 1475–1486

**ЕКЗОГЕННИЙ СЕРОТОНІН ПЕРЕШКОДЖАЄ РОЗВИТКУ ОКИСНЮВАЛЬНОГО
СТРЕСУ ПРИ ПРОРОСТАННІ ЗЕРНІВОК ПШЕНИЦІ ЗА УМОВ МОДЕЛЬНОЇ
ПОСУХИ**

**Ю. Є. Колупаєв^{1,2}, Л. Н. Кобизєва^{1,3}, І. В. Шахов¹,
М. М. Маренич², О. І. Обозний¹, Т. О. Ястреб¹**

¹*Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН України, м. Харків, Україна,
e-mail: plant_biology@ukr.net*

²*Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна*

³*Czech Agrifood Research Center, Prague, Czech Republic*

Серотонін (5-гідрокситриптамін) – один із поширених природних індоламінів, відомий насамперед як нейромедіатор, що регулює різні види діяльності головного мозку у хребетних. У рослин серотонін був виявлений у 50-ті роки минулого століття, однак активне вивчення його біологічних функцій у рослинному організмі почалося приблизно 10–12 років тому. На даний час відомо, що серотонін присутній у насінні, листках, коренях і плодах більш ніж 90 видів рослин з 37 різних сімейств (Sun et al., 2025). Припускають, що серотонін може відігравати важливу роль практично на всіх стадіях життєвого циклу рослини. Зокрема, отримані дані, що вказують на його участь у регуляції проростання зернівок, вегетативного росту і адаптації рослин до стресових чинників. Серотонін є метаболічним попередником іншого відомого індоламіну – мелатоніну, функції якого у рослин вивчені значно краще. У літературі проводяться паралелі між фізіологічними ефектами цих двох індоламінів. Однак у багатьох випадках наявні експериментальні дані не дозволяють однозначно пов'язувати досліджувані фізіологічні ефекти серотоніну саме з його власною дією, а не з ефектами, зумовленими його перетворенням на мелатонін. Стосовно обох цих індоламінів зафіксовано чимало прикладів стрес-протекторного впливу на рослини при екзогенному застосуванні, а також посилення їх синтезу у рослин у відповідь на дію стрес-факторів. Разом з тим, механізми дії серотоніну в цілому вивчені значно слабше, ніж мелатоніну. Поки що не відомі навіть гіпотетичні рецептори серотоніну у рослинних клітинах, водночас є дані про його функціональну взаємодію з іншими фітогормонами (зокрема, з абсцизовою і саліциловою кислотами), а також активними формами кисню як сигнальними посередниками (Mishra et al., 2023).

Видові особливості стрес-протекторної дії серотоніну також залишаються малодослідженими. Зокрема, відсутні дані щодо стрес-протекторного впливу серотоніну на рослини пшениці, хоча показана наявність ендогенного серотоніну у різних органах і тканинах цього виду (Chen et al., 2023). Відомо, що індоламіни, зокрема, мелатонін, виявляють високу ефективність як індуктори стійкості рослин до стресорів при їх застосуванні шляхом праймінгу насіння (Guo et al., 2022; Luo et al., 2024). Однак вплив праймінгу зернівок серотоніном на ріст і стійкість рослин пшениці дотепер не вивчався, хоча є відомості про позитивну дію обробки насіння сої серотоніном на його схожість та ріст проростків за умов водного дефіциту (Pontes et al., 2024).

Метою роботи було вивчення впливу праймінгу насіння пшениці серотоніном на його проростання і стан антиоксидантної та осмопротекторної систем проростків за умов модельної посухи, створеної 12 % ПЕГ 6000.

Зернівки озимої м'якої пшениці (*Triticum aestivum*) сорту Ліра одеська праймували протягом 3 год розчинами серотоніну ("Sauman Chemical Company", USA) в діапазоні концентрацій від 0,25 до 50 мкМ, контроль – обробка насіння дистильованою водою. Надалі зернівки пророщували у чашках Петрі на двох шарах фільтрувального паперу, змоченого 12 % ПЕГ 6000, контрольні зразки пророщували на дистильованій воді.

Обробка серотоніном підвищувала енергію проростання і схожість насіння, а також ріст проростків за умов модельної посухи. Стрес-протекторний ефект виявлявся в діапазоні концентрацій від 0,25 до 10 мкМ, найбільшим він був при використанні концентрацій 1–5 мкМ.

Осмотичний стрес спричиняв розвиток окиснювального стресу у пагонах проростків, що виявлялося за істотним (5-разовим) посиленням генерації супероксидного радикала, 2-разовим збільшенням вмісту гідроген пероксиду та зростанням вмісту продукту пероксидного окиснення ліпідів (малонового діальдегіду) у 2,5 раза. Попередня обробка зернівок серотоніном у концентраціях 1–5 мкМ значно зменшувала величини всіх цих маркерів окиснювального стресу.

За умов осмотичного стресу відзначалося деяке зниження активності каталази у пагонах проростків з одночасним зростанням активності гваяколпероксидази, активність супероксиддисмутази (СОД) при цьому істотно не змінювалася. Праймінг насіння 1–5 мкМ серотоніном сприяв підвищенню активності СОД і стабілізації активності каталази та гваяколпероксидази за стресових умов.

Під впливом модельної посухи вміст проліну у пагонах проростків пшениці зростав в 1,6 рази, а вміст розчинних вуглеводів (при розрахунку на масу сухої речовини) дещо знижувався. Праймінг зернівок серотоніном призводив до підвищення вмісту цукрів і незначного зниження вмісту проліну за стресових умов.

Осмотичний стрес спричиняв зростання загального вмісту фенольних сполук у пагонах, при цьому однак істотно (в 2,5 рази) знижувався вміст антоціанів. Обробка зернівок серотоніном сприяла додатковому підвищенню загального вмісту фенольних сполук і стабілізувала вміст антоціанів за стресових умов.

Таким чином, вперше показано стрес-протекторний вплив серотоніну на рослини пшениці на ранніх фазах розвитку. Його складовими є пригнічення розвитку окиснювального стресу, модуляція накопичення осмолітів та істотний позитивний вплив на вміст вторинних метаболітів. Для з'ясування зв'язку таких ефектів саме з дією серотоніну, а не його метаболітів (зокрема, мелатоніну) необхідні спеціальні дослідження. Раніше на такій же моделі (праймування зернівок з наступним пророщуванням за умов осмотичного стресу, спричинюваного ПЕГ 6000) було показано підвищення схожості насіння, поліпшення росту проростків та зменшення інтенсивності окиснювального стресу за праймінгу насіння мелатоніном (Taraban et al., 2025). Але найбільший ефект виявляла концентрація мелатоніну 20 мкМ, тобто майже на порядок вища від діючих концентрацій серотоніну. Зважаючи на це, можна припускати наявність специфічної стрес-протекторної дії серотоніну. Водночас не виключено, що праймінг серотоніном може впливати на його ендогенний синтез, а також на синтез інших індольних сполук, які можуть бути причетні до модуляції функціонування стрес-протекторних систем у проростках пшениці.

ЛІТЕРАТУРА

- Guo, Y., Li, D., Liu, L. et al. (2022) *Front Plant Sci.* 13:932912. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.932912>
Luo, X., Xu, X., Xu, J. et al. (2024) *J Pineal Res.* 76: e13004. <https://doi.org/10.1111/jpi.13004>
Pontes, C.V.S., dos Santos, A.H.A., Lopes, L.K.C. et al. (2024) *J Plant Growth Regul.* 43, 1833–1843 <https://doi.org/10.1007/s00344-023-11220-8>
Taraban, D.A., Karpets, Yu.V., Yastreba, T.O. et al. (2025) *Ukr Bot J.* 82(2): 128–143. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/ukrbotj82.02.128>

ГІДРОГЕН СУЛЬФІД (H₂S) ЯК АКТИВАТОР ПРОРОСТАННЯ ЗЕРНІВОК ЗЛАКІВ ЗА УМОВ СТАРІННЯ І ДІЇ СТРЕСОРІВ

Ю. Є. Колупасв^{1,2}, Т. О. Ястреб¹, І. В. Шахов¹, К. М. Гавва³, В. П. Коломацька¹

¹*Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН України, м. Харків, Україна,
e-mail: plant_biology@ukr.net*

²*Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна*

³*Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна*

На даний час сформувалися уявлення про роль гідроген сульфід (H₂S) як однієї з ключових молекул-газотрансмітерів у регуляції базових функцій рослинного організму: ростових процесів, визрівання і старіння плодів, проростання насіння і адаптації до дії стресорів різної природи (Sharma et al., 2022; Kolupaev et al., 2026). Сигнальні ефекти H₂S, що зумовлюють його участь в ключових фізіологічних процесах, пов'язані передусім з посттрансляційною модифікацією (ПТМ) цільових білків, а саме їх персульфидуванням – перетворенням цистеїн-тіолової групи (-SH) на персульфідну (-SSH) (Bhadwal et al., 2024). Зокрема, цистеїн-персульфід (CysSSH), персульфід глутатіону (GSSH) і пероксиредоксини вважаються ключовими клітинними редокс-регуляторами (Aroca et al., 2018). Нині явище персульфидування білків у рослинах визнано поширеним, а функція персульфидування демонструє складність та різноманітність у різних тканинах та органах рослин (Arif et al., 2021). Зокрема, у *Arabidopsis* виявлено понад 5200 білків, що мають сайти персульфидування (Jurado-Flores et al., 2017). Персульфидування істотно впливає на біологічні функції білків, такі як ферментативна активність, субклітинна локалізація та взаємодія з іншими білками (Aroca et al., 2017; Shen et al., 2020).

Вплив H₂S на проростання насіння певною мірою задокументований для рослин різних видів (Caverzan et al., 2021). У ряді досліджень показано підвищення під впливом H₂S схожості насіння, скорочення часу проростання, посилення лінійного росту та накопичення біомаси органів проростків. Більш помітні такі ефекти за стресових умов різної природи. Разом з тим, гідроген сульфід ймовірно є тонким інструментом для регуляції проростання насіння, функціонально пов'язаним з іншими регуляторами цього процесу, у тому числі з одним із основних гормонів-інгібіторів абсцизовою кислотою (АБК). Так, недавно встановлений вплив гідроген сульфід на ключовий множинний фактор транскрипції ABSCISIC ACID INSENSITIVE 4 (ABI4), задіяний в сигнальному каскаді, опосередкованому АБК (Zhou et al., 2022). Показано, що ABI4 контролює експресію гена одного із основних продуцентів гідроген сульфід L-цистеїндесульгідролази 1 (*DES1*). При цьому інгібування проростання насіння сигналом АБК опосередковане гідроген сульфідом, генерованим *DES1*. Більш того, встановлено, що рівень ABI4 знижувався під час проростання насіння, у той час як H₂S спричиняв підвищення рівня персульфидування ABI4 і знижував швидкість його деградації, що, у свою чергу, пригнічувало проростання насіння *Arabidopsis*. Ці дані не слід оцінювати як такі, що суперечать досить великому обсягу емпіричних відомостей про позитивний вплив гідроген сульфід на проростання насіння ряду культурних рослин (Caverzan et al., 2021). Вони вказують на складність механізмів регуляції проростання насіння за участю H₂S і ймовірну залежність його ефектів від умов, в яких відбувається проростання насіння, видових особливостей рослин та інших чинників. Наприклад, обробка насіння пшениці донором гідроген сульфід NaHS посилювала проростання, а також пом'якшувала прояв окислювального стресу в умовах токсичної дії міді (Zhang et al., 2008). У роботі Zhou та ін. (2018) праймінг насіння кукурудзи NaHS збільшував відсоток схожості та розміри проростків за дії високої температури. Також обробка донором H₂S стимулювала ферментативну та неферментативну антиоксидантну систему та накопичення осмолітів у проростках кукурудзи. Позитивний вплив донорів гідроген сульфід на проростання насін-

ня пшениці також пов'язують із підвищенням активності амілази та естерази, що сприяє мобілізації запасних полімерів зернівок (Zhang et al., 2010).

Окрему проблему становить підвищення схожості старіючого насіння (Kurek et., 2019). Відомо, що в такому насінні зазвичай спостерігається дисбаланс між утворенням активних форм оксигену (АФО) та їх знешкодженням антиоксидантною системою, що може бути причиною окиснювальних пошкоджень структур проростка (Zhang et al., 2021). Неправильне зберігання насіння (в першу чергу за підвищеної температури та вологості) спричиняє його прискорене старіння. У насінні, що старіє, зазвичай активується пероксидне окиснення ліпідів (ПОЛ), що в кінцевому підсумку призводить до порушення цілісності мембран (Kurek et., 2019). Старіння насіння істотно залежить від видових особливостей. Наприклад, серед зернових злаків досить швидким зниженням схожості при зберіганні за неоптимальних умов характеризується насіння тритикале (Kolupaev et al., 2024).

З урахуванням суттєвого внеску окиснювального стресу в деструктивні процеси старіння насіння розглядається можливість використання антиоксидантів або сполук, що активують антиоксидантну систему, для нормалізації проростання насіння. Вплив гідроген сульфід, відомого як сигнальний посередник, що активує різні складові антиоксидантної системи, на проростання старіючого насіння до недавнього часу спеціально не досліджувався. Зважаючи на це, ми порівнювали вплив донора гідроген сульфід NaHS на проростання зернівок пшениці (*Triticum aestivum*, сорти Скорпійон і Етана) і тритикале ($\times$ *Triticosecale*, сорт Раритет), що мали ознаки прискореного старіння через зберігання протягом 4 років за нестабільної температури в вологості, а також оцінювали дію донора H_2S на проростання зернівок цих двох видів злаків з нормальною схожістю на фоні дії високої температури (35°C).

Встановлено, що обробка насіння пшениці і тритикале донором H_2S за умов теплового стресу підвищувала його енергію проростання та схожість, а також зменшувала спричинюване тепловим стресом пригнічення накопичення біомаси пагонів і коренів. Позитивні ефекти донора H_2S виявлялися у відносно вузькому діапазоні концентрацій (0,1–2 мМ з оптимумом за концентрації 0,5 мМ). Також виявлено підвищення схожості насіння пшениці і тритикале з низькими посівними якостями під впливом 0,5 та 1 мМ розчину гідросульфід натрію. Такі ефекти супроводжувалися підвищенням активності амілази в зернівках, що сприяло зростанню вмісту розчинних вуглеводів у пагонах проростків. Також у пагонах проростків обох видів відзначалося зменшення генерації АФО й інтенсивності ПОЛ, натомість відбувалося підвищення активності супероксидисмутази. У той же час активність каталази та гваяколпероксидази при праймінгу насіння донором H_2S підвищувалася в проростках тритикале, але дещо знижувалася в проростках пшениці. Крім того, під впливом обробки донором гідроген сульфід у пагонах проростків тритикале, але не пшениці, відбувалося істотне зростання вмісту антоціанів, які є ефективними антиоксидантами.

Таким чином, модуляція гідроген сульфідом компонентів антиоксидантної системи злаків залежала від їх видових особливостей, хоча як для пшениці, так і для тритикале, відзначалося поліпшення інтегральних показників, що характеризують підтримання редокс-гомеостазу та ростових процесів. У зв'язку з цим обробку насіння злаків екзогенним H_2S можна розглядати як ефективний інструмент підвищення схожості насіння з низькими посівними якостями та посилення проростання зернівок і росту проростків за стресових умов.

Слід відзначити, що останнім часом динамічно розвиваються прикладні дослідження впливу гідроген сульфід на культурні рослини (Yi et al., 2024; Jin, 2026). Однак дотепер існує певний розрив між з'ясуванням механізмів дії H_2S із залученням методів молекулярної біології, біоінформатики і різних «омік» й емпіричним підходом у дослідженнях, спрямованих на розширення сфери його практичного використання. Скорочення такого розриву у майбутньому може зробити цю молекулу повноцінним «гравцем» у сучасних рослинницьких агробіотехнологіях.

**ПРАЙМІНГ ЗЕРНІВОК ПШЕНИЦІ L-ТРИПТОФАНОМ МОДУЛЮЄ
МЕТАБОЛІЗМ ВУГЛЕВОДІВ ТА РЕДОКС-ГОМЕОСТАЗ ПРИ ЇХ ПРОРОСТАННІ
ЗА УМОВ ОСМОТИЧНОГО СТРЕСУ**

**Ю. Є. Колупаєв^{1,2}, Т. О. Ястреб¹, І. В. Шахов¹, О. І. Обозний¹,
Д. А. Тарабан^{1,3}, А. І. Ємець⁴, Я. Б. Блюм⁴**

¹Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН України, м. Харків, Україна
e-mail: plant_biology@ukr.net

²Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна

³Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна

⁴ДУ «Інститут харчової біотехнології та геноміки» НАН України, м. Київ, Україна

Праймінг насіння вважається одним з найбільш доступних способів використання різних біостимуляторів – фізіологічно активних речовин (ФАР) – з метою підвищення продуктивності рослин і їх стійкості до стресових чинників різної природи. Амінокислоти розглядають як окрему групу ефективних праймувальних агентів (Gondek, Mierzwa-Hersztek, 2021). Останніми роками у цьому контексті особливо зростає інтерес до ефектів L-триптофану. Він є не лише важливою протейногенною амінокислотою, а й ключовим попередником кількох сполук з гормональною активністю – ауксину, серотоніну і мелатоніну, а також деяких сполук, що беруть участь у захисті рослин від патогенів і шкідників – індольних глюкозинолатів та фітоалексину камалексину (Cognas et al., 2021; Wang et al., 2025). Водночас триптофан значно дешевший і доступніший для практичного застосування порівняно з мелатоніном та іншими ФАР, що можуть синтезуватися з нього. У дослідженнях, проведених на ряді культурних рослин, показаний позитивний вплив праймінгу насіння або фоліарної обробки рослин на ріст і показники продуктивності за стресових умов різної природи (Rao et al., 2012; Hozayn et al., 2020; El-Tanahy et al., 2024; Liu et al., 2024). Однак у цих дослідженнях оцінювалися переважно інтегральні фізіологічні показники (передусім ріст і продуктивність), а не функціонування стрес-протекторних систем. Майже не дослідженим залишається вплив триптофану на проростання зернівок хлібних злаків, у тому числі пшениці, за стресових умов.

У зв'язку з викладеним метою роботи стало вивчення впливу праймінгу насіння *Triticum aestivum* (L.) триптофаном на проростання зернівок, ріст проростків та накопичення ними осмолітів, вторинних метаболітів і маркерів окиснювального стресу за умов модельної посухи – осмотичного стресу, створюваного ПЕГ 6000.

В експериментах використовували зернівки пшениці сорту Ліра одеська, які перед пророщуванням праймували протягом 3 год L-триптофаном в концентраціях діапазону 10-500 мкМ, зернівки контрольного варіанта протягом відповідного часу обробляли дистильованою водою. Надалі зернівки варіантів з дією модельної посухи пророщували на 12% розчині непронижного осмотика ПЕГ 6000, зернівки варіанта без стресу пророщували на дистильованій воді. Через 24 і 48 год оцінювали загальну активність амілази у зернівках. Відсоток проростання зернівок визначали через 2 і 3 доби від моменту початку пророщування. Через 3 доби визначали також вміст осмолітів (розчинних вуглеводів і проліну), вторинних метаболітів (фенольних сполук і антоціанів) та маркерів окиснювального стресу (супероксидного аніон-радикала, гідроген пероксиду і малонового діальдегіду) у пагонах проростків.

За відсутності стресу на 2 і 3 добу експерименту проростало 94 і 96 % зернівок, а за модельної посухи цей показник знижувався до 56 і 81 %, відповідно. Обробка триптофаном в концентраціях 50 і 200 мкМ підвищувала проростання насіння на 2 добу до 63 і 70 %, відповідно, а на 3 добу

ці показники становили 85 і 88 %. Біомаса проростків за умов модельної посухи становила 43 % від значень контролю, а обробка триптофаном в концентраціях 50 і 200 мкМ підвищувала ці показники до 54 і 56 %, відповідно.

За умов осмотичного стресу активність амілази у зернівках через 24 год від початку їх пророщування трохи підвищувалася. При цьому праймінг триптофаном спричиняв додаткове підвищення активності ферменту. Через 48 год від початку пророщування зернівок осмотичний стрес, навпаки, знижував активність амілази, а попередня обробка насіння триптофаном, як і в першу добу спостережень, підвищувала активність ферменту. Стрес модельної посухи призводив до зменшення вмісту розчинних вуглеводів у пагонах. Водночас обробка насіння 50 і 200 мкМ триптофаном викликала зростання вмісту цукрів у пагонах до величин, що перевищували не лише значення варіанта з посухою, а й контролю.

Вміст проліну у пагонах за умов осмотичного стресу істотно зростав, а попередня обробка триптофаном пом'якшувала цей ефект. За умов модельної посухи загальний вміст розчинних білків у пагонах знижувався, а праймінг насіння триптофаном сприяв стабілізації вмісту білків за стресових умов.

Посуха спричиняла невелике підвищення загального вмісту фенольних сполук у пагонах. Обробка 50 мкМ розчином триптофану істотно не впливала на цей показник, а під впливом праймінгу насіння триптофаном в концентрації 200 мкМ вміст фенольних речовин за умов модельної посухи додатково зростав. Під впливом осмотичного стресу вміст антоціанів у пагонах зменшувався вдвічі. Водночас попередня обробка насіння триптофаном наближала цей показник до величин контролю.

За умов модельної посухи відзначалося істотне посилення генерації супероксидного радикала і гідроген пероксиду, а також 3-разове зростання вмісту МДА у пагонах. Обробка насіння триптофаном спричиняла істотне зниження величин всіх трьох даних маркерів окиснювального стресу.

Таким чином, праймінг насіння пшениці триптофаном підвищував показники його проростання і посилював ріст проростків за умов осмотичного стресу. Такі ефекти, ймовірно, пов'язані зі спричинюваним триптофаном підвищення активності амілази у зернівках і підсиленням накопичення цукрів у пагонах. Позитивний вплив триптофану на проростання насіння за умов осмотичного стресу також може бути пов'язаний зі зростанням загального вмісту розчинних білків та збереженням пулу антоціанів. Обробка насіння триптофаном також значно зменшувала прояви окиснювального стресу, спричинювані дією посухи. Для розуміння механізмів впливу праймінгу насіння триптофаном у подальших дослідженнях корисним може бути визначення ендогенного вмісту ймовірних продуктів його перетворення (ауксинів, серотоніну і мелатоніну) в зернівках і органах проростків.

ЛІТЕРАТУРА

- Corpas, F.J., Gupta, D.K., Palma, J.M. (2021). In: Gupta, D.K., Corpas, F.J. (eds) *Hormones and Plant Response. Plant in Challenging Environments*, vol 2. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77477-6_11
- El-Tanahy, A.M.M., Mahmoud, S.H., Elwahed, M.S.A.A. et al. (2024). *Sci. Rep.* 14, 26571. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76421-x>
- Gondek, K., Mierzwa-Hersztek, M. (2021). *Agronomy*, 11(12), 2582. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122582>
- Hozayn, M., Abd-Elmonem, A.A., Samaha, G.M. (2020). *Bull. Natl. Res. Cent.* 44, 65 <https://doi.org/10.1186/s42269-020-00324-w>
- Liu, C., Gu, W., Liu, C. et al. (2024). *Plant Physiol. Biochem*, 212, 108737.
- Rao, S. R., Qayyum, A., Razzaq, A. et al. (2012). *J. Anim. Plant Sci.* 22(3), 768-772.
- Wang, S., Zhang, X., Gong, D.-H. et al. (2025). *Plant Comm.* 6, 101425. <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2025.101425>

СКРИНІНГ ПОСУХОСТІЙКОСТІ ВИДІВ І ГІБРИДІВ РОДИНИ *MAGNOLIACEAE* JUSS. ЗА КСЕРОМОРФНИМИ ОЗНАКАМИ АСИМІЛЯЦІЙНОГО АПАРАТУ

А. В. Конопелько¹, Р. А. Якимчук^{1,2}, Н. В. Цибровська¹, В. О. Пономаренко¹

¹Національний дендрологічний парк «Софіївка» НАН України, м. Умань, Черкаська обл., Україна,
e-mail: konopelko_alla@ukr.net

²Інститут фізіології рослин і генетики НАН України, м. Київ, Україна,
e-mail: peoplenature16@gmail.com

Рослини родини *Magnoliaceae* Juss. завдяки своїм великим квіткам різноманітних кольорів, незвичайним листкам та яскраво забарвленим плодам привернули увагу людини ще кілька століть тому. Раннє і тривале цвітіння, щорічне рясне закладання квіткових бруньок – безумовна перевага магнолій у ландшафті, що визначає їхню високу цінність для ландшафтного дизайну (Ponomarenko, Ponomarenko, 2015). Однак, незважаючи на значний декоративний потенціал магнолій, недостатня кількість наукових даних щодо їхньої екологічної стійкості, зокрема в умовах урбанізованого середовища, ускладнює прогнозування успішності інтродукції та актуалізує дослідження, пов'язані із пошуком інформативних критеріїв адаптивного потенціалу цих рослин (Sjöman et al., 2018).

Вивчення ознак видового різноманіття колекцій дендраріїв та ботанічних садів чи їх комбінацій, за якими можна визначити толерантність до того чи іншого стресового чинника, має вирішальне значення для стратегічної диверсифікації міських ландшафтів (Hirons et al., 2021). Різноманітні морфологічні, фізіологічні, фенологічні та інші характеристики рослин, тобто функціональні ознаки, які відображують їх стратегії росту, розмноження та виживання, реакцію на зміну чинників довкілля, впливають на процеси життєвого циклу, використання ресурсів тощо (Li, Prentice, 2024). Також функціональні ознаки є невід'ємним інструментом для прогнозування реакції на чинники довкілля в умовах глобальних змін клімату. Одними із таких цінних ознак є морфолого-анатомічні особливості листків, які можуть бути відображенням стійкості рослин до посухи та індикаторами чутливості видів до зміни клімату, а їх розуміння та використання сприятиме збереженню рослинного різноманіття в майбутньому (Valliere et al., 2023).

Об'єктами дослідження були рослини родів *Liriodendron* L. та *Magnolia* L. з колекції Національного дендрологічного парку «Софіївка» НАН України, з-поміж них вісім видів – *Liriodendron tulipifera* L., *Magnolia cylindrica* E.H. Wilson, *Magnolia denudata* Desr., *Magnolia kobus* DC., *Magnolia liliiflora* Desr., *Magnolia officinalis* Rehder & E.H. Wilson, *Magnolia salicifolia* (Siebold & Zucc.) Maxim. і *Magnolia stellata* (Siebold & Zucc.) Maxim – та два гібриди: *Magnolia* × *kewensis* Pearce і *Magnolia* × *soulangeana* Soul.-Bod. Вивчення морфолого-анатомічних характеристик листків проводили на морфологічно зрілих листках, відібраних із південного боку середньої частини крони рослин. Площу листової пластинки визначали ваговим методом. Для вивчення продихового апарату виготовляли епідермальні відбитки абаксальної поверхні з використанням безбарвного косметичного лаку (Wu, Zhao, 2017). Огляд відбитків проводили з використанням мікроскопа Levenhuk MED 25T, обладнаного цифровою камерою 5,1 Мп, при збільшенні ×100 та ×400. Вимірювання проводили у програмі LevenchukLite. До уваги брали такі кількісні показники: площа продихів, щільність продихів та епідермальних клітин на одиницю площі абаксальної поверхні листків. Усі вимірювання мали 25-разову повторність. Площу продихів визначали як добуток довжини і ширини продихів з врахуванням коефіцієнта пропорційності, оціненого в 0,8071 для рослин *Magnoliaceae* (Yan et al., 2025).

Площа листової пластинки у досліджуваних рослин варіювала в широких межах – від 15,0 см² до 347,1 см². У порядку зменшення значень показника види розташовувалися таким чином: *M. officinalis* (347,1 см²) > *M. denudata* (138,9 см²) > *L. tulipifera* (77,7 см²) > *M. cylindrica* (55,6 см²) > *M. × soulangeana* (54,4 см²) > *M. × kewensis* (41,1 см²) > *M. liliiflora* (34,8 см²) > *M. kobus* (34,3 см²) > *M. salicifolia* (31,4 см²) > *M. stellata* (15,0 см²). Оскільки збільшення морфометричних параметрів листків знижує ефективність водокористування, види з більшими розмірами листків можуть потребувати інтенсивнішого зволоження для підтримання фізіологічних процесів. Огляд функціональних ознак листка, представлений А. Roth-Nebelsick та М. Krause (2023), узагальнив

взаємозв'язки морфолого-анатомічних і біометричних показників листової пластинки з ефективністю використання ресурсів, таких як світло, тепло, вода, вуглекислий газ тощо. Зокрема, від розміру листків залежить доступність води, адже за однакових умов листки з меншою поверхневою площею можуть втрачати менше води на певний фіксований об'єм CO₂.

Площа продихів досліджуваних рослин варіювала в діапазоні від 397 мкм² до 1807 мкм². За цим показником види розташувалися у такому порядку: *M. ×soulangeana* (1807,0 мкм²) > *M. denudata* (1163,7 мкм²) > *M. cylindrica* (846,2 мкм²) > *M. ×kewensis* (802,5 мкм²) > *M. stellata* (786,9 мкм²) > *M. liliiflora* (741,3 мкм²) > *M. salicifolia* (685,1 мкм²) > *M. officinalis* (634,2 мкм²) > *M. kobus* (471,2 мкм²) > *L. tulipifera* (397,1 мкм²). За літературними даними дрібні продихи з високою щільністю їх розташування на листку в умовах нестачі вологи сприяють інтенсивнішому газообміну, посилюють транспіраційне охолодження та підвищують швидкість реакції рослин на стрес, зокрема шляхом закриття продихів у відповідь на посуху. В умовах достатнього зволоження рослини з більшими продихами та меншою їх кількістю на одиницю площі листка здатні витрачати менше енергії та пластичних речовин на формування і функціонування продихового апарату, забезпечуючи водночас високу швидкість асиміляції вуглекислого газу (Carlson et al., 2016). Зважаючи на взаємозв'язок між втратою води та характеристиками продихового апарату, щільність продихів вважається однією з важливих еколого-біологічних показників стійкості, особливо в умовах дефіциту вологи (Groza et al., 2013). Середня щільність продихів на абаксальній поверхні листків у рослин досліджених видів становила 193,2 шт./мм². За кількістю продихів на одиницю площі листка об'єкти дослідження розташовувалися в такому порядку: *M. cylindrica* (269 шт./мм²) > *M. kobus* (267 шт./мм²) > *M. officinalis* (257 шт./мм²) > *M. ×kewensis* (250 шт./мм²) > *M. salicifolia* (241 шт./мм²) > *M. stellata* (228 шт./мм²) > *M. liliiflora* (160 шт./мм²) > *M. denudata* (100 шт./мм²) > *L. tulipifera* (96 шт./мм²) > *M. ×soulangeana* (67 шт./мм²). Найменш стійкими в посушливі періоди вважають рослини з великими продихами та низькою щільністю їх розташування на листках.

За показником щільності епідермальних клітин досліджувані види та гібриди згрупувалися у такий ряд: *L. tulipifera* (706 шт./мм²) > *M. salicifolia* (483 шт./мм²) > *M. officinalis* (470 шт./мм²) > *M. stellata* (459 шт./мм²) > *M. cylindrica* (421 шт./мм²) > *M. ×kewensis* (352 шт./мм²) > *M. kobus* (312 шт./мм²) > *M. liliiflora* (282 шт./мм²) > *M. denudata* (232 шт./мм²) > *M. ×soulangeana* (152 шт./мм²). Підвищена щільність епідермальних клітин у поєднанні з меншою площею листової пластинки та відносно високою щільністю продихів може розглядатися як одна із складових комплексу ознак ксероморфності.

Виявлена диференціація за площею листової пластинки, розміром і щільністю продихів та щільністю епідермальних клітин у рослин родів *Liriodendron* та *Magnolia*, ймовірно, відображає різні екологічні стратегії функціонального пристосування досліджуваних рослин до раціонального використання води. За умов дефіциту вологи ймовірність більш ефективного використання води характерна для рослин *M. kobus* та *M. salicifolia*, які поєднують у комплексі такі ознаки, як невеликі розміри листків, малі за площею продихи та високу їх щільність на одиницю поверхні. Анатомічні ознаки мезофітного типу листка притаманні рослинам *M. ×soulangeana* та *M. denudata*, що підтверджується найменшою щільністю продихового апарату та найбільшими його розмірами. Комплексний аналіз виявлених анатомо-морфологічних особливостей свідчить про доцільність їх використання як інформативних критеріїв оцінки адаптивного потенціалу рослин родини *Magnoliaceae* в умовах кліматичної аридизації. Водночас остаточне встановлення рівнів посухостійкості окремих таксонів потребує залучення комплексу фізіолого-біохімічних показників та проведення багаторічних моніторингових спостережень.

ЛІТЕРАТУРА

- Carlson J.E., Adams C.A., Holsinger K.E. *Ann. Bot.* 2016. 117:195–207.
Hirons A.D., Watkins J.H.R., Baxter T.J. et al. *Plants People Planet.* 2021. 3:182–193.
Groza N.V., Mihali C.V., Ardelean A. *Ann. West Univ. Timisoara Ser. Biol.* 2013. 16:35–48.
Li J., Prentice I.C. *Commun. Biol.* 2024. 7:1136.
Ponomarenko V.O., Ponomarenko H.M. *J. Native Alien Plant Stud.* 2015. 11:35–44
Sjöman H., Hirons A.D., Bassuk N.L. *Arboric. J.* 2018. 40(1):47–56
Roth-Nebelsick A., Krause M. *Biomimetics.* 2023. 8(2):145.
Valliere J.M., Nelson K.C., Martinez M.C. *Conserv. Physiol.* 2023. 11:coad085.
Wu S., Zhao B. In: *Plant Pattern Recognition Receptors: Methods and Protocols.* New York: Springer, 2017. P. 243–248.
Yan C., Shi P., Yao W., Yu K., Niinemets Ü. *Plants.* 2025. 14:893.

ІНТЕГРАЦІЯ ПРИРОДНИХ РЕГУЛЯТОРІВ РОСТУ ТА НАНОМАТЕРІАЛІВ ЯК СТРАТЕГІЯ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР ДО СТРЕСУ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ

І. В. Косаківська¹, Л. В. Войтенко², М. М. Щербатюк¹, В. А. Васюк^{1,2}

*Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України
Київ, Україна*

Вступ. Забруднення біосфери важкими металами (ВМ) є однією з найгостріших екологічних проблем сучасного індустріального світу, що загрожує безпеці глобального ланцюга постачання харчових продуктів. Екотоксиканти, такі як свинець (Pb), кадмій (Cd), миш'як (As) і хром (Cr), викликають мутагенні, генотоксичні й цитотоксичні ефекти, істотно погіршуючи ріст і розвиток стратегічних зернових культур – пшениці, рису, кукурудзи та ячменю (Vasilachi et al., 2023). Фітотоксична дія ВМ проявляється у пригніченні росту коренів, зменшенні біомаси, розвитку хлорозів і некрозів, а також у зниженні фертильності пилку та загальної продуктивності зерна. На фізіологічному рівні ВМ суттєво пригнічують фотосинтетичну активність: знижують інтенсивність газообміну, порушують транспорт електронів у фотосистемах та активність ферментів циклу Кальвіна, зокрема RuBisCO. Іони ВМ здатні замішувати центральний іон магнію (Mg^{2+}) у порфіриновому кільці хлорофілу, що призводить до деградації пігментів (Riyazuddin et al., 2021). На молекулярному рівні токсичний пресинг зумовлює деструкцію мембран тилакоїдів, викликає зміни у шляхах МАРК-сигналіну, порушує внутрішньоклітинний розподіл Ca^{2+} та індукує гіперпродукцію активних форм кисню (АФК). Накопичення АФК ініціює перекисне окиснення ліпідів та руйнування клітинних мембран, маркером чого є значне зростання рівня малонового діальдегіду (Kosakivska et al., 2021).

Взаємодія фітогормонів та наноматеріалів. Для мінімізації шкідливої дії ВМ у рослинному організмі формуються комплексні захисно-адаптаційні реакції, ключову роль у яких відіграє ендогенна фітогормональна система. Абсцизова кислота (АБК), ауксини, гібереліни (ГБ), цитокініни (ЦК), саліцилова кислота (СК), брасиностероїди (БС) та жасмонати (ЖК) координують метаболічне перепрограмування на всіх етапах онтогенезу (Rahman et al., 2023). Новітньою та високо-ефективною стратегією захисту злаків є використання наноматеріалів (НМ) як сигнальних агентів, модуляторів гормонального пулу та системних наноносіїв для адресної і пролонгованої доставки біоактивних сполук (Riyazuddin et al., 2025).

Взаємодія НМ та фітогормонів забезпечує потужний синергічний ефект. Основними технологічними підходами є нано-праймінг (передпосівна обробка насіння в колоїдному розчині з додаванням регуляторів росту), що підвищує схожість на 10–20 % та фоліарне обприскування рослин (нано-арморинг) у критичні фази онтогенезу (Wu et al., 2024). Неорганічні наночастинки (НЧ) оксидів металів (ZnO , TiO_2 , SeO_2 , Fe_3O_4) та нанохелати виступають джерелами необхідних мікроелементів, які є кофакторами антиоксидантних ферментів – супероксиддисмутази, пероксидази та каталази (Riyazuddin et al., 2025). Крім того, НЧ здатні іммобілізувати іони ВМ у ризосфері шляхом прямої адсорбції, блокуючи їх поглинання та транслокацію по ксилемі до надземних органів і зерна.

Абсцизова кислота у наномодульованих каскадах забезпечує швидке закриття продихів, обмежуючи пасивний винос ВМ. Застосування Si НЧ та нано-нуль-валентного заліза ($nZVI$) підвищує рівень ендогенної АБК у злаків на 45 %, активуючи експресію генів-транспортерів *OsHMA2* і *OsHMA3*, які відповідають за секвестрацію металів у коренях (Ghoury et al., 2024). Ауксиновий гомеостаз, пригнічений дією ВМ через активацію ІОК-оксидази, ефективно відновлюється за дії низьких доз НЧ ZnO та Se , які стимулюють експресію генів біосинтезу ауксинів родини *YUCCA*. Мезопористий кремнезем забезпечує поступове вивільнення екзогенної ІОК, запобігаючи її деградації під впливом окиснювального стресу (Sharma et al., 2022).

Модуляція пулу гіберелінів та цитокінінів під дією наносистем є критичною для відновлення ростових процесів злаків. Екзогенна гіберелова кислота (GA_3) у комбінації з НЧ SeO_2 , ZnO та TiO_2 мінімізує наслідки окиснювального пресингу, посилює накопичення біомаси та фотосинтетичну активність (Iftikhar et al., 2020). Цитокініни під впливом НЧ Ag та комплексів ZnO/SiO_2 змінюють

профіль експресії генів сигналіну (*ARR7*, *ARR15*) та підвищують рівень стрес-асоційованого цис-зеатину, що стабілізує клітинні мембрани та затримує старіння тканин (Vinković et al., 2017).

Виражений синергізм встановлено для саліцилової кислоти, брасиностероїдів та жасмонатів з наноматеріалами. Комбінація СК з НЧ ZnO або SiO₂ регулює редокс-статус клітин, посилює антиоксидантний захист та знижує акумуляцію Cd та As у надземних органах через зміцнення клітинних стінок коренів (Muhammad et al., 2025). Вуглецеві наноматеріали, зокрема одностінні вуглецеві нанотрубки (SWCNT), відкривають революційні перспективи в генній інженерії злаків, забезпечуючи точну, нетравматичну доставку компонентів системи CRISPR/Cas, ДНК та РНК крізь жорстку клітинну стінку без інтеграції в ядерний геном, що дозволяє оперативно створювати високостійкі форми рослин.

Основні механізми нано-фіто модуляції включають:

- **Молекулярно-генетичне перепрограмування:** наносистеми у поєднанні з фітогормонами виступають тригерами експресії ключових генів стійкості. Зокрема, комбінації наночастинок із брасиностероїдами та жасмонатами (через рецепторний комплекс SCF-CO11-JAZ) здатні на молекулярному рівні блокувати надходження токсикантів шляхом суттєвого зниження транскрипції генів-транспортів ВМ (*OsHMA2*, *OsHMA6*, *OsNRAMP5*) та відновлювати іонний гомеостаз через активацію протонних pomp і гена *OsIRT1*.
- **Фізіолого-біохімічний редокс-контроль та метаболізм:** сумісне застосування НЧ (SiO₂, ZnO, Se з СК, БС та ЖК) забезпечує тривалу пролонговану детоксикацію АФК через активацію ферментів антиоксидантного каскаду (СОД, КАТ, ПОД, АРХ), стабілізацію фотосинтетичних пігментів та інтенсифікацію фенілпропаноїдного шляху для посиленого синтезу фенолів та флавоноїдів.
- **Бар'єрна іммобілізація:** оптимізовані наноструктури (включаючи біосумісні матриці, такі як хітозан) сприяють акумуляції та зв'язуванню іонів ВМ у клітинних стінках кореневої системи, радикально зменшуючи їх пасивну транслокацію по ксилемі та флоемі та знижуючи вміст Cd, Pb та Cr у генеративних органах і дозрілому зерні на 30–80%.

Підсумки та перспективи. Забруднення агроєкосистем ВМ та металоїдами залишається критичним викликом для світового сільського господарства, що безпосередньо загрожує якості зерна та здоров'ю людства. На основі системного аналізу літератури доведено, що ефективним і екологічно безпечним трендом сучасної фітофізіології та агробіотехнології є синергічна інтеграція природних регуляторів росту та наноматеріалів.

Незважаючи на очевидний потенціал нано-фіто модуляції (включаючи додаткові ефекти зниження залишків пестицидів та нівелювання стресу від підвищеного вмісту CO₂), першочерговим завданням залишається вивчення закономірностей перехресної взаємодії між окремими гормональними шляхами за дії різних класів наночастинок. Необхідно зосередити зусилля на переході від лабораторних моделей (суспензійних культур та проростків) до тривалих польових випробувань, оцінки довгострокової екотоксичності НЧ у ґрунті та стандартизації доз для запобігання проявам нанотоксичності. Розробка комерційних інтегрованих нанопрепаратів на основі фітогормонів є магістральним шляхом до сталого екологічного землеробства та гарантування продовольчої безпеки в умовах глобальних кліматичних змін.

ЛІТЕРАТУРА

- Ghourfi F., Sarwar S., Sun L. et al. 2024. *Sci. Rep.* 14(1): 5986.
- Iftikhar A., Rizwan M., Adrees M. et al. 2020. *Environ. Sci. Pollution Res.* 27(27): 33809–33820.
- Kosakivska I.V., Babenko L.M., Romanenko K.O. et al. 2021. *Cell Biol. Int.* 45(2): 258–272.
- Muhammad S., Ulhassan Z., Munir R. et al. 2025. *Environ. Pollution.* 364(Pt 1): 125331.
- Rahman S., Hussain Y.Li, Hussain B. et al. 2023. *Ecological Indicators.* 146: 109844.
- Riyazuddin R., Nisha N., Ejaz B. et al. 2021. *Biomolecules.* 12(1): 43. <https://doi.org/10.3390/biom12010043>
- Riyazuddin R., Nisha N., Gupta R. 2025. *Plant Nano Biology.* 13: 100173.
- Sharma A., Vishwakarma K., Singh N.K. et al. 2022. *Journal of Biotechnology.* 343: 71–82.
- Vasilachi I.C., Stoleru V., Gavrilescu M. 2023. *Agriculture.* 13: 1983. <https://doi.org/10.3390/agriculture13101983>
- Vinković T., Novák O., Strnad M. et al. 2017. *Environ. Res.* 156: 10–18.
- Wu T., Zhou J., Zhou J. 2024. *Chemosphere.* 362: 142681. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142681>

**ОРГАНІЗМ ЯК СИСТЕМА КЛІТИННИХ ПОПУЛЯЦІЙ: ПЛАСТИЧНІСТЬ
КЛІТИННОГО ГЕНОМУ ТА ЙОГО РІЛЬ В ПРОЦЕСАХ АДАПТАЦІЇ РОСЛИН**

В. А. Кунах

*Інститут молекулярної біології і генетики НАН України, м. Київ, Україна,
e-mail: kunakh@imbg.org.ua*

У доповіді буде розглянуто власні та сучасні літературні дані про мінливість геному соматичних клітин рослин в онтогенезі у процесі диференціювання і в меристематичних клітинах, залежність процесів мінливості соматичних клітин від генотипу і, особливо, вплив на ці процеси зовнішніх умов (умов зростання). Аналізуватимуться причини, клітинні і молекулярні механізми онтогенетичної мінливості геному, виникнення генотрофів та їхні особливості, адаптивність змін, що виникають, а також можливість успадкування набутих в онтогенезі ознак.

Обґрунтовуватиметься висунуте доповідачем положення про те, що рослина – це система клітинних популяцій, яка характеризується пластичністю свого генофонду, в основі якої лежить мінливість геному соматичних клітин, що за взаємодії з клітинним добром забезпечує адаптивність рослин як цілісного організму і створює можливість успадкування (передачі нащадкам за статевого розмноження) адаптивних геномних змін, набутих протягом онтогенезу.

Буде наведено фактичний матеріал, який свідчить про те, що більшість таких змін є епігеномними, оскільки вони, очевидно, не зачіпають генетичний код і, у принципі, є зворотними, що особливо яскраво виявляється у процесах дедиференціювання – редиференціювання.

**ОЦІНКА СТІЙКОСТІ СОНЯШНИКУ ДО *EMBELLISIA HELIANTHI* (HANSF.)
PIDOPLICHKO НА ІНФЕКЦІЙНОМУ ПОЛІГОНІ В ПОЛЬОВИХ УМОВАХ**

Н. М. Кутіщева, Н. О. Шугурова, Ю. В. Краснокутська

*Інститут олійних культур НААН України, Запоріжжя, Україна,
e-mail: Kutishcheva2017@gmail.com*

Нині збільшується ареал розповсюдженості ембелізії (*Embellisia helianthi* (Hansf.) Pidoplichko). Проявляється хвороба на листках, стеблах, кошиках, чашолистиках і пелюстках у вигляді спочатку дрібних некротичних плям, пізніше — діаметром до 2–3 см, темно-коричневих, із світлішими краями. На стеблах плями нерідко набувають вигляду неправильних еліпсів довжиною 1–5 см. При подальшому розвитку хвороби рослини деформуються. Хвороба раніше була включена до переліку карантинних об'єктів для України.

Інфікування соняшнику проводять у лабораторних та польових умовах методом штучного зараження рослини різними грибними збудниками. Існують методи штучного зараження, які широко використовуються у фітопатології в залежності від особливостей рослин-господарів та їх збудників хвороб.

Проте методики штучного інфікування соняшника збудником *Embellisia helianthi* в польових умовах на цей час відсутні. Розробка методу штучного інфікування вегетуючої рослини є важливою складовою для вивчення особливостей розвитку патогена та оцінки інтенсивності ураження соняшнику ембелізією в польових умовах. Лабораторією імунітету та захисту рослин спільно з науковцями лабораторії селекції міжлінійних гібридів соняшника ІОК НААН, було розроблено метод штучного інфікування збудником *Embellisia helianthi* (Hansf.) Pidoplichko.

Дослідні ділянки закладали у 2023-2025 роках на штучному інфекційному полігоні наукової сівозмینی ІОК НААН, що гарантує дотримання карантинних дій. При штучному інфікуванні даним методом, проводили зараження рослини у фазі вегетації – 3–4 пари справжніх листків соняшнику міцеліальною суспензією збудника *Embellisia helianthi* (Hansf.) Pidoplichko. Для цього проводили зараження зразків шляхом ручного розпилення 1 мл отриманої суспензії на кожен листову поверхню рослини. Для розвитку інфекції створювали умови підвищеної вологості. Для цього кожний листок окремо накривали ізолятором з пергаменту, що дозволяло підтримувати відносну вологість на рівні 60–80 %, та не шкодило подальшому розвитку рослини. Далі здійснювали спостереження за розвитком міцеліальної інфекції на листовій поверхні та проводили оцінку ураження ембелізією зразків соняшника на подальших фазах вегетації рослин. Виділення спор проводили після ураження 2/3 листової поверхні. Ступінь ураження визначали відповідно до розроблених в ІОК НААН параметрів: здорова рослина – ураження відсутнє (0 балів); поодинокі плями на листовій поверхні – дуже слабе ураження (1 бал). Площа ураженої поверхні вегетативної маси, яка не перевищує 10 % від загальної вегетативної маси, є слабким ураженням (2 бали). Ураження до 25 % поверхні вегетативної маси визначається як середнє ураження рослин (3 бали). Ураження до 50 % поверхні вегетативної маси – сильне ураження (4 бали), дуже сильне ураження – ураження до >50 % поверхні вегетативної маси (5 балів).

У дослід були залучені зразки селекції ІОК НААН: самозапилені лінії соняшнику ЗЛ22А та ЗЛ58А, гібриди Політ, Запорізький 32, Агрономічний.

Перші симптоми хвороби з'явилися на листовій поверхні після інокуляції на 10–12 день у вигляді коричневих плям з світлою облямівкою. Далі плями збільшувались, займаючи майже всю поверхню листової пластинки. При цьому порушувались процеси живлення здорових клітин листків, що призводило в подальшому до некрозу тканини рослин соняшнику.

При ураженні листової поверхні через 15-20 діб відзначали появу дрібних пікнід, які зазвичай формувались у місцях ураження. Умови дотримання достатньо високої вологості під пергаментними ізоляторами забезпечували виділення спор *Embellisia helianthi*. Оцінку ступеня ураження рослин проводили візуальним оглядом кожної рослини у фазі цвітіння.

Для тестування методу та отримання достовірних фітопатологічних даних оцінювали 5 генотипів соняшника по 100 рослин кожного, три роки поспіль (2023-2025 рр.) на ураження ембелізією в польових умовах інфекційного полігону.

Лінія ЗЛ22А в 2023 році мала 98 % уражених рослин, з них 5,6 % мали бал ураження 1, а 25,8 % бал ураження 5. Дослідження 2024 року показали, що кількість уражених рослин становила 96 %, при 1 балі ураження – 3,6 %, а при 5 балах 25,6 % рослин. При спостереженні в 2025 році виявили 95 % уражених рослин, ступінь ураження коливалась від 4,6 % (1 бал) до 26,3 (5 балів). Середній показник ураження рослин становив для лінії ЗЛ22А 96,3 %.

Лінія ЗЛ58А в 2023 році мала 96 % уражених рослин, з них 3,1% мали бал ураження 1, а 27,8 % – бал ураження 5. Дослідження 2024 року показали, що кількість уражених рослин становила 81 %, при 1 балі ураження – 3,1 %, а при 5 балах 27,8 % рослин. При спостереженні в 2025 році виявили 90 % уражених рослин, ступінь ураження коливалась від 3,1 % (1 бал) до 7,8 (5 балів). Середній показник ураження рослин становив для лінії ЗЛ58А 89,0 %.

Гібрид соняшнику Агрономічний в 2023 році мав 67 % уражених рослин, з них 23,6 % мали бал ураження 1, а 11,8 % – бал ураження 5. Дослідження 2024 року показали кількість уражених рослин становила 59 %, при 1 балі ураження – 23,6 %, а при 5 балах – 11,8 % рослин. При спостереженні в 2025 році виявили 47 % уражених рослин, ступінь ураження варіював від 33,6 % (1 бал) до 13,5 % (5 балів). Середній показник ураження рослин становив для гібрида Агрономічний становив 57,6 %.

Гібрид соняшнику Політ 2 в 2023 році мав 62 % уражених рослин, з них 31,1 % мали бал ураження 1, а 11,5 % – бал ураження 5. Дослідження 2024 року показали, що кількість уражених рослин становила 56 %, при 1 балі ураження – 31,1 %, а при 5 балах 11,6 % рослин. При спостереженні в 2025 році виявили 51% уражених рослин, ступінь ураження варіював від 33,1 % (1 бал) до 14,6 (5 балів). Середній показник ураження рослин становив для гібрида Політ 2 56,3 %.

Гібрид соняшнику Запорізький 32 в 2023 році мав 89 % уражених рослин, з них 7,4 % мали бал ураження 1, а 5,6 % – бал ураження 5. Дослідження 2024 року показали, що кількість уражених рослин становила 85 %, при 1 балі ураження 1,7 %, а при 5 балах 5,6 % рослин. При спостереженні в 2025 році виявили 77 % уражених рослин, ступінь ураження становив від 12,6 % (1 бал) до 5,6 (5 балів). Середній показник ураження рослин становив для гібрида Запорізький 32 83,6 %.

Лінії ЗЛ22А та ЗЛ58А за три роки досліджень уражувалась ембелізією на 81–98 %. Проте мали деякі відмінності за ступенем ураження. Так у 2023 році ці лінії мали ураження 98 та 96 %, в 2024 році 81–98 %, відповідно, в 2025 році – 90–95 %.

Гібрид Запорізький 32 мав досить високий ступінь ураження за роками – 89, 85, 77 %, відповідно. А зразки гібрида Агрономічний та Політ мали менший ступінь ураження – від 51,0 до 67 %, відповідно.

Слід зазначити, що відмінності за ступенем ураження протягом вказаних років пов'язані з незначними змінами у показниках температури та вологості в польових умовах інфекційного полігону наукової сівозміни ІЮК НААН.

На підставі отриманих результатів досліджень встановлено, що розроблений спосіб штучного інфікування соняшника збудником *Embellisia helianthi* (Hansf.) Pidoplichko в польових умовах інфекційного полігону забезпечує надійне інфікування рослин соняшника, швидку і вірогідну оцінку інтенсивності ураження зразків соняшнику ембелізією.

Представлений метод рекомендовано застосовувати при доборі селекційного матеріалу за ознакою стійкості при створенні батьківських компонентів та гібридів соняшнику.

СЕЛЕКЦІЯ ПШЕНИЦІ М'ЯКОЇ НА ЗБІЛЬШЕННЯ ВМІСТУ ФЕНОЛЬНИХ СПОЛУК ТА АНТОЦІАНІВ

**О. Ю. Леонов, З. В. Усова, К. Ю. Суворова,
М. М. Хухрянська, О. О. Зуза, О. І. Обозний**

*Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН України, Харків, Україна
e-mail: ppiwheat@ukr.net*

Сучасна селекція рослин спрямована на створення високоврожайних, адаптованих для умов вирощування сортів сільськогосподарських культур, які забезпечують високий вміст поживних речовин та придатні для виготовлення продуктів функціонального харчування з високим вмістом мікроелементів та вітамінів. Останніми роками створені сорти сільськогосподарських культур з нетиповим забарвленням плодів, підвищеним вмістом фенольних сполук та антоціанів. Попередніми дослідженнями сортів та селекційних ліній пшениці м'якої озимої з різним забарвленням зернівки у зразків з блакитним та фіолетовим забарвленням було встановлено високі значення загального вмісту фенольних сполук та антоціанів та загальної антиоксидантної активності. Однак ці генотипи характеризувались низькою продуктивністю та недостатньою адаптивністю до погодних умов України (Leonov et al., 2022).

Метою наших досліджень було вивчення селекційних ліній пшениці м'якої, створених за участі попередньо виділених цінних за біохімічними показниками колекційних зразків та високопродуктивних сортів української селекції, за вмістом фенолів, антоціанів, рівнем адаптації до умов вирощування і показниками продуктивності.

Джерелами нетипового забарвлення зернівки стали зразки з колекції Центру генетичних ресурсів рослин України: Чорноброва, Чорнозерна та Blue x Red (з фіолетовим забарвленням зернівки) та Scorpion, КМ 186/2, Vavilovii 2004-87, Viridiferrugineum 2022-87, Tschermakianum 2005-87 (з блакитним забарвленням зернівки). Польові досліді проводились упродовж 2023–2025 років на полях селекційних сівозмін Інституту рослинництва ім. В. Я. Юр'єва НААН за методикою кваліфікаційної експертизи сортів рослин (Методика ..., 2016). Створено близько 60 гібридних комбінацій, більше сотні селекційних ліній пройшли попереднє випробування та залучені до робочої колекції. Лабораторними методами визначали загальний вміст фенольних сполук (Bobo-García et al., 2015) та вміст антоціанів (Nogués, Baker, 2000). Для аналізу щороку включалось понад 50 зразків. Оскільки набір зразків щороку дещо змінювався, разом з абсолютними значеннями кожного року розраховувались стандартизовані величини.

У результаті гібридизації та подальших доборів за комплексом цінних господарських ознак були виділені селекційні лінії пшениці м'якої як з фіолетовим та блакитним зерном, так і червонозерні та білозерні.

Середній вміст фенольних речовин (у розрахунку на мг-екв. галлової кислоти/г) за роками майже не змінювався і склав 0,97 у 2023 році та 0,98 у 2024 та 2025 рр., з розмахом коливань від 0,52 до 1,45. За вмістом антоціанів (в умовних одиницях) виділився набір 2023 року, з середнім значенням 0,228 при варіюванні від 0,086 до 0,414, значення 2024 і 2025 років були нижчими: 0,135 та 0,110, відповідно з розмахом від 0,026 до 0,350. У цілому розмах варіювання вивченого набору зразків за вмістом антоціанів був набагато більшим порівняно з вмістом фенольних речовин. Сорти, рекомендовані для вирощування в зоні Лісостепу – Подолянка, Здобна, Гайок, Малуша, характеризувалися меншим від середнього або середнім значенням вмісту фенольних сполук і значно нижчим від середнього вмістом антоціанів.

Серед вивченого набору селекційних ліній стабільно високим за роками вмістом фенольних речовин відзначалися лінії: Вавілові 1111-22 (1,27–1,33 мг-екв. галлової кислоти/г), Гермакіанум

1076-22 (1,04–1,38), Гермакіанум 1190-22 (1,02–1,19), Уралікум 1467-21 (1,05–1,12), але більшість ліній з блакитним або фіолетовим зерном не відрізнялась високим вмістом фенольних сполук порівняно з червонозерними. Стабільно високим за роками вмістом антоціанів відзначались лінії Вавілові 1111-22 (0,212–0,414 у.о.), Вавілові 1184-22 (0,200–0,300), Гермакіанум 1076-22 (0,240–0,260), Гермакіанум 1183-22 (0,204–0,280), Гермакіанум 1228-24 (0,218–0,238), Уралікум 1467-21 (0,192–0,262). Деякі лінії як з блакитним або фіолетовим зерном, так і з червоним зерном вирізнялися високим вмістом фенолів та антоціанів лише одного з років вивчення. Слід відзначити, що усі наведені блакитнозерні лінії походять від сорту Scorpion, фіолетовозерна лінія має у своєму родоводі сорт Чорноброва. Названі лінії у 2025 р. характеризувались зимостійкістю 9 балів, висотою рослин 80–115 см, датою колосіння від 27 до 30 травня, урожайністю від 756 до 993 г/м² при середній урожайності вивченого масиву 830 г/м², тобто за цінними господарськими ознаками наближались до поширених у зоні Лісостепу комерційних сортів.

Створені цінні селекційні лінії пшениці м'якої передано для подальшого вивчення та закладки на довгострокове збереження до Центру генетичних ресурсів рослин України, а також залучено до гібридизації з метою створення конкурентоздатного за рівнями продуктивності та адаптивності сорту з високим вмістом фенольних сполук та антоціанів у зерні.

ЛІТЕРАТУРА

- Leonov O.Yu., Popov Yu.V., Usova Z.V., Pozdniakov V.V., Suvorova K.Yu., Antsyferova O.V., Zuza O.O., 2022. *Plant Breeding and Seed Production*, 121: 28–40. <https://doi.org/10.30835/2413-7510.2022.260993>
- Методика проведення експертизи сортів рослин групи зернових, круп'яних та зернобобових на придатність до поширення в Україні, 2016. 82 с. <https://doi.org/10.21498/978-966-924-587-8>
- Bobo-García G., Davidov-Pardo G., Arroqui C., Vírveda, P., Marín-Arroyo M. R., Navarro M., 2015. *J. Sci. Food Agricult.*, 95(1): 204–209. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6706>
- Nogués S., Baker N.R., 2000. *J. Exp. Bot.*, 51(348): 1309–1317. <https://doi.org/10.1093/jxb/51.348.130>

**АДАПТИВНІ РЕАКЦІЇ ФЕРТИЛЬНИХ РОСЛИН *ATRICHUM UNDULATUM*
(HEDW.) P. BEAUV. У РІЗНИХ МІКРОКЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ**

О. В. Лобачевська, Л. І. Карпінець

*Інститут екології Карпат НАН України, Львів, Україна
e-mail: ecobryologia@gmail.com*

Репродуктивна ніша мохів детермінується рівнем вологості для статевого розмноження та високоадаптивним поєднанням статевих та безстатевих стратегій. Спосіб розмноження (статевий, безстатевий чи їх поєднання) є головною ознакою життєвої стратегії мохоподібних, який впливає на їх географічний ареал, чисельність популяції та стійкість до стресового впливу антропогенно зміненого середовища. Дослідження репродуктивної біології мохів має вирішальне значення для визначення динаміки популяції та генетичних процесів, які формують їх різноманітність. Метою дослідження було з'ясувати, як впливають мікрокліматичні умови середовища на репродуктивну модель, закономірності прояву статей та варіації їх фенотипного співвідношення і продуктивності у багатодомного моху *Atrichum undulatum*.

Об'єктом дослідження був домінуючий епігейний вид моху *A. undulatum* з дослідних лісових ділянок, що відрізнялися за водним і температурним режимами та інтенсивністю освітлення: на території повного заповідання у старовіковому буковому лісі Верещицького природоохоронного науково-дослідного відділення ПЗ "Розточчя", вирубки 40-річного віку Страдцівського навчально-виробничого лісокомбінату та стаціонарної рекреації "Верещиця" Яворівського НПП. На кожній ділянці відбір зразків здійснювали навесні, влітку і восени методом конверта, загалом не менше ніж 150 зелених рослин із закритими молодими коробочками. Спочатку вимірювали довжину рослин з коробочками та без них за допомогою стереобінокуляра "Stemi 2000-C" (Carl Zeiss). Потім підраховували кількість жіночих та чоловічих особин, відзначаючи розміщення гаметангіїв (археогоніїв і антеридіїв) та їх кількість на пагоні. Для зважування виділяли лише фотосинтетично активну частину рослини без спорофіту та ризоїдної коричневої частини, яка не впливає на розподіл ресурсів для відтворення моху.

A. undulatum розмножується спорами та клонально підземними столонами. Генеративне розмноження здійснюється за допомогою гамет, які утворюються в гаметангіях на статевій стадії онтогенезу – гаметофіті. *A. undulatum* належить до багатодомних або одно-двудомних мохів, у яких жіночі та чоловічі гаметангії містяться або на одній і ті ж рослині (однодомні), або на різних рослинах (двудомні). Установлено, що на всіх дослідних ділянках в дернинках *A. undulatum* переважали жіночі рослини зі спорогонами: весною їх найбільше (73,1 %) було на заповідній території, а влітку та восени – в зоні вирубки (71,7 % та 69,5 % відповідно). Восени на заповідній території висота рослин з молодими коробочками та без них збільшувалася на 73,4 % та 82,2 % відповідно, порівняно з весняними показниками, що свідчить про найсприятливіші мікрокліматичні умови для росту моху. Менші показники збільшення висоти зафіксовані на ділянках рекреації: влітку на 22,2 % для пагонів з коробочками і 30,0 % – без коробочок та восени на 32,6 % і 35,4 %, відповідно. Найменші показники висоти рослин визначені на території вирубки. Протягом весни – літа показники жіночих рослин збільшувалися в межах 18 %, а без коробочок – лише на 10 %. Восени (до жовтня) висота рослин істотно не збільшувалася, що свідчить про гальмування росту в несприятливий період, насамперед за посушливих умов.

Результати визначення висоти і сухої маси рослин, насамперед жіночих за наявності спорогонів, свідчать про зв'язок між їх вегетативним ростом та утворенням спорофітів. На всіх дослідних ділянках жіночі рослини мали більші розміри та масу, мабуть, через потребу нагромадження значних запасів біомаси й енергетичних ресурсів для утворення гаметангіїв та підтримки розвитку спорофітів. Надлишок фенотипних жіночих особин у популяції моху пояснюється багатьма факторами: диференційоване виживання чоловічих і жіночих спор або їх проростків; переваги жіночих особин завдяки клональному розмноженню; рідкість чоловічих особин унаслідок вищої смертності на певній стадії розвитку або через вищий поріг одного з чинників навколишнього середовища. Конкретна комбінація таких факторів може впливати на експресію статі та її конкурентні переваги на різних стадіях життєвої стратегії моху, спричиняючи утворення здебільшого жіночих популяцій.

Установлено, що весною в дернинках моху переважали рослини, які є функціонально дводомними: на верхівці окремих молодих рослин здебільшого розвивалися чоловічі гаметангії (андроцеї з антеридіями), а на інших рослинах утворювалися жіночі гаметангії (гінецеї з архегоніями). У квітні на заповідній території виявляли фенотипно одностатеві чоловічі (90 %) та жіночі (10 %) рослини, тоді як на дослідних ділянках вирубки і рекреації – лише рослини з чоловічими гаметангіями. Відомо, що чоловічі рослини протягом тривалого часу дозріваннякладають більше життєвих ресурсів в розвиток гамет, ніж неспорофітні та спорофітні жіночі особини.

Влітку на всіх ділянках визначали як чоловічі, так і жіночі одностатеві рослини, проте на антропогенно порушених територіях переважали здебільшого жіночі особини. І лише на території вирубки, окрім одностатевих жіночих (45 %) і чоловічих (35 %) особин, було виявлено 20 % рослин з двостатевими гаметангіями з близьким розташуванням різностатевих гаметангії, мабуть, як прояв адаптації до нестачі води. На заповідній території протягом весни і літа визначено майже однакове співвідношення одностатевих жіночих і чоловічих рослин у дернинах моху, проте кількість антеридіїв в андроцеях влітку збільшувалася в 3,4 раза.

Восени на одній рослині закладалися дво- й одностатеві (переважно чоловічі) гаметангії, причому статеві органи містилися в безпосередній близькості на пазушних гілках. У зразках моху із заповідної території переважали (до 61,5 %) рослини з одностатевими жіночими гаметангіями, тоді як чоловічих рослин було виявлено лише 23,1 % і незначний відсоток (15,4 %) рослин з двостатевими гаметангіями. Очевидно, в стабільних мікрокліматичних умовах менший розподіл життєвих ресурсів на чоловічу функцію може відображати стратегію їх економії, оскільки одна чоловіча рослина здатна запліднити кілька жіночих. На території вирубки рослини з двостатевими гаметангіями становили більшість (67 %). Одностатевих чоловічих рослин було 33 %, при тому одностатевих жіночих – не виявляли. Хоча восени продуктивність андроцеїв зменшувалася в 2,1 рази в одностатевих рослинах і 1,3 рази в двостатевих, порівняно з літніми показниками, проте в основі двостатевих рослин виявляли по 2–3 чоловічі гілки з антеридіями на різних стадіях розвитку. Встановлено різні варіації розташування статевих структур моху. Очевидно, для відбору статевих фенотипів, які зменшують автономне самозапліднення. Вищий рівень статевого прояву чоловічих гаметангії безперечно покращував репродуктивний успіх, оскільки наявність численних антеридіїв збільшувала кількість запліднених гамет. Відомо, що мінливість таких показників навколишнього середовища, як інтенсивність освітлення, температура та низький рівень вологості, сприяють вираженню чоловічої статі у рослин. Підвищення інтенсивності освітлення та температурних показників на території вирубки створювали потенціал для достатнього утворення сперматозоїдів завдяки збільшенню кількості чоловічих гаметангіїв, мабуть, через вивільнення ресурсів, зокрема внаслідок зрушення вуглецевого балансу і/або зміни кругообігу поживних речовин та їх доступності. На території рекреації визначено найменшу (52,5 %) кількість рослин *A. undulatum* зі спорофітами, можливо, умови природного середовища безпосередньо впливали на статевий прояв моху, створюючи тиск на гени, які контролюють фенологію рослин. Влітку на цій території переважали одностатеві жіночі рослини (91,5 %), тоді як восени – чоловічі (90 %), двостатевих рослин не було виявлено. Протягом року продуктивність жіночих і чоловічих гаметангіїв на цій ділянці була низькою та неістотно збільшувалася восени. У стресових середовищах моху можуть підтримувати життєздатність популяції, виявляючи лише одну зі статей і розмножуючись виключно безстатевим способом. Мабуть, за несприятливих умов літа на території рекреації жіночі особини *A. undulatum* клонально швидше поширювалися, ніж чоловічі. Ця гіпотеза також може пояснити переважання чоловічих особин восени, вважають, що вони можуть проявляти підвищену клонову здатність там, де підвищена потреба в ресурсах для утворення спорофітів пригнічується умовами навколишнього середовища. Таким чином, отримані результати можуть свідчити про специфічний зв'язок мікрокліматичних умов навколишнього середовища у визначенні змін фенотипного співвідношення статей з різними екологічними оптимумами чоловічих і жіночих рослин.

Отже, у *A. undulatum* статеве розмноження та утворення спорофітів залежали від життєвих ресурсів, кількості чоловічих гамет та впливу екологічних умов навколишнього середовища, що проявлялося у різноманітних структурних, функціональних та часових варіаціях репродуктивних моделей. При оцінці біотопів у заповідних чи лісгосподарських лісах наявність спорофітів у мохів є набагато точнішим індикатором стабільності мікроклімату та якості субстрату, ніж просто присутність вегетативних дернин. Якщо мох заселяється, але не інвестує в статеве розмноження, це свідчить про те, що поточні умови середовища існування перебувають за межами його оптимальної репродуктивної ніші.

СПЕЦИФІКА ГРАВІЧУТЛИВОСТІ МОХІВ ЗА УМОВ ФОСФАТНОГО ДЕФІЦИТУ

О. В. Лобачевська, Н. Я. Кияк, Я. Д. Хоркавців

*Інститут екології Карпат НАН України, Львів, Україна,
e-mail: ecomorphogenesis@gmail.com*

Гравітаційне поле Землі діє як постійний екологічний фактор, що регулює просторову орієнтацію рослин. На організовому та клітинному рівнях реакція мохів на пришвидшення вільного падіння реалізується через модифікацію гравітропізму, специфіку галуження клітин і спрямований ріст гілок протонеми, як похідної від кутів їх нахилу. Унаслідок корелятивного зв'язку між тропічним згином бічних галузок і формою росту рослини видозмінюється загальна структура галуження і морфологія гаметофіту в цілому (Lobachevska et al., 2022).

Фосфати (Pi) виконують важливу фізіологічну роль у розвитку мохів і впливають на їх адаптивні та ростові реакції (Huang, et al., 2023; Лобачевська та ін., 2024). Мохи використовують органічний фосфор із субстрату завдяки фосфатазній активності ризоїдів та наявності позаклітинних фосфатаз. У поверхневому шарі ґрунту, де розростається ризоїдна протонема мохів, нестача фосфору спричиняє видозміни у галуженні стolonів та формуванні підземних вегетативних органів (Bai et al., 2013). Висока толерантність до дефіциту фосфору, що супроводжується інтенсифікацією росту, активним галуженням протонеми та її спрямованою орієнтацією до джерел фосфатів, забезпечує мохам суттєву перевагу у природних екосистемах (Turner et al., 2001; Лобачевська та ін., 2024).

Завданням роботи було визначити специфіку впливу дефіциту неорганічного фосфату (Pi) на гравітропний ріст протонеми модельних мохів *Ceratodon purpureus* та *Physcomitrium patens*. Завдяки комплексу фізіологічних і цитологічних методів, застосуванню клинoстатування і дослідних варіантів з дефіцитом фосфору, досліджено ростові реакції й гравічутливість рослин за різних умов екологічного стресу.

У природному середовищі рослини реагують на вміст фосфору морфологічною модифікацією, а міжвидові відмінності гравічутливості *C. purpureus* і *P. patens* можуть опосередковано впливати на фізіологічні процеси в умовах нестачі фосфатів. У темряві і гравітаційному полі *Ig* протонема *C. purpureus* росте вертикально вгору (негативний гравітропізм). *P. patens* відрізняється сповільненою гравітропною реакцією. В основі відмінностей гравічутливості двох видів мохів є особливості структури клітин-статocитів. Роль статocитів у мохів виконують ростучі апікальні клітини протонеми, котрі одночасно поєднують функції сприйняття гравісигналу та його реалізацію у ростову реакцію-відповідь. У *C. purpureus* чітко виражене зонування статолітів-амілопластів і осідання пластид у субапікальній зоні, у *P. patens* амілопласти відносно рівномірно розподілені в апікальній клітині, вони менші, повільніше осідають по усій довжині клітини. Експериментально визначено, що статocити є морфо-функціональною основою різної гравічутливості мохоподібних (Лобачевська та ін., 2024).

Фосфор (у формі ортофосфатів) є важливим чинником гравітропізму: низький вміст Pi зменшує гравічутливість протонеми і сповільнює реверсію росту після клинoстатування. Протонемна дернина *C. purpureus* на середовищі з вмістом 50,0 мкМ ортофосфату частіше галузилася і утворювала густішу дернину, ніж у контролі на 1,0 мМ Pi, однак гравітропний згин і вертикальна орієнтація росту проявлялися повільніше. Сповільнена реакція свідчить про вплив дефіциту Pi на ініціацію гравітропної відповіді. Після клинoстатування гравітропний ріст стolonів на середовищі з 50 мкМ Pi відновлювався значно повільніше, ніж у контролі на 1,0 мМ Pi. Нестача фосфатів посилює стресову дію клинoстатування, відповідно підвищився поріг гравічутливості протонеми, що призвело до втрати скоординованого полярного росту протонеми. Тобто елементи мінерального середовища впливають на гравітропні реакції, котрі є основою мохофізіологічної адаптації мохів до наземного життя. Посилене галуження та формування густішої дернини протонеми моху *Ceratodon purpureus* на середовищі з дефіцитом фосфатів (50 мкМ Pi, порівняно з оптимальним 1,0 мМ Pi) — це стрес-індукований морфогенез, що максимально збільшує площу поглинання елемента.

Проаналізували кути згину латеральних гілузок гравітропної протонеми мохів *C. purpureus* і *P. patens*, які росли на середовищі з 50 мкМ і 1,0 мМ Рі. У контролі середнє значення кутів латеральних гілок *C. purpureus* було $\approx 64^\circ$, під гострішим кутом вгору (50°) росли гілузки на середовищі з 50 мкМ Рі. За результатами аналізу ANOVA встановлено статистично значимий вплив дефіциту фосфору на величину кутів *C. purpureus* ($F = 36,29, p = 0,001$). Істотних відмінностей значень кутів не виявлено для *P. patens* ($F = 2,31, p = 0,137$), а також підтверджено слабкий вплив фосфору на варіабельність росту гілузок. Коли ж величини кутів гравітропного згину в межах $10\text{--}90^\circ$ розподілили за класами, то встановили діапазон кутів, які траплялися найчастіше та кількість котрих була найменшою. У такий спосіб визначили, що від впливу фосфору залежать кути росту латеральних гілузок обидвох видів. Відсоток кутів $42\text{--}57^\circ$ у *C. purpureus* на середовищі 50 мкМ Рі порівняно з контролем збільшився з 46 до 75 %, що є статистично значимою різницею. У *P. patens* збільшилася кількість латеральних гілок, що росли під кутами $58\text{--}73^\circ$, особливо значимий вплив Рі на кути $74\text{--}89^\circ$ і майже горизонтальний ріст по поверхні субстрату. Крім того, збільшилася варіабельність кутів на одній нитці протонеми. Спільною для обох видів реакцією на дефіцит Рі було зменшення відсотка кутів $10\text{--}25^\circ$ і $26\text{--}41^\circ$ на початковій стадії гравііндукції. Очевидно, що формування таких кутів відбулося унаслідок впливу нестачі ортофосфату на активність фітогормонів (ауксину і цитокініну), що загальмувало утворення латеральної меристеми і галуження клітин протонеми (Sobovliević et al., 2014). Закладання ініціалей гілузок та їх ріст зумовлені взаємопов'язаними фізіологічними і гормональними механізмами.

Отримані дані експериментально підтверджують міжвидові відмінності гравічутливості *C. purpureus* і *P. patens* залежно від вмісту фосфатів. *C. purpureus* стійкіший у збереженні просторової орієнтації росту після впливу дефіциту фосфатів, а навіть кліностатування, тоді як *P. patens* проявляє сильнішу дезорієнтацію кутів латеральних гілузок. Низькі концентрації 50 мкМ фосфатів, порівняно з 1,0 мМ Рі у контролі, $\approx$ на 40 % стимулювали гравітропний ріст латеральних гілок *C. purpureus*. В умовах низького вмісту Рі у середовищі горизонтальний ріст стolonів *P. patens* домінував над гравітропним вертикальним ростом. Кількість таких латеральних гілузок у *P. patens* досягла 36 %, у *C. purpureus* показники були набагато нижчі – 5 %.

У природному середовищі кут нахилу гілузок формується залежно від вологості, світла, рН, органічних сполук і фосфатів, які рослина може отримати внаслідок більшої швидкості росту і тропізму. Можна припустити, що завдяки високій гравічутливості протонеми *C. purpureus* нестача фосфатів сприяла вертикальному росту протонеми ($42\text{--}57^\circ$) і суттєво не впливала на дезорієнтацію кутів росту гілок. Натомість, для ефемерного виду моху *P. patens* з багаторічною каулонемною протонемою гравітропізм не є поширеною формою тропізму і, очевидно він менш залежний від Рі. Проте плагіотропізм у морфологічній структурі дернини *P. patens* і позитивний вплив нестачі фосфатів посилює переваги горизонтального росту та можливість отримати поживні речовини з більш віддалених субстратів. Вплив гравітації на форму галуження та природна толерантність до дефіциту Рі мають синергічний ефект, завдяки чому збільшується густота і щільність дернини, що оптимізує функціональну пластичність рослин. Загалом, форма галуження інтактної протонеми достатньо стабільна і генетично детермінована, проте екологічні фактори ініціюють морфофізіологічні зміни в онтогенезі мохів. Морфологічна мінливість також є важливим пристосуванням для поглинання води під час опадів і утримання її в пазухах латеральних гілок та листків, від чого залежить стан гідратації організму. При цьому залежність кута гравізгину від Рі можна розглядати як прояв морфологічної модифікації дернини мохів.

ЛІТЕРАТУРА

- Лобачевська О.В., Кияк Н.Я., Хоркавців Я.Д., Кіт Н.А. Гравічутливість мохів: значення гравітаційної сили в онтогенезі: Львів, 2014. 236 с.
- Bai H., Murali B., Barber K., Wolverton C. *American Journal of Botany*. 2013. 100(1):175-182.
- Huang, Y., Li, Y., Zhou X., Yin B., Tao, Y., Zhang Y. *Ecological Indicators*. 2023. 155,110975.
- Lobachevska O.V., Kyyak N.Ya., Khorkavtsiv Ya.D., Kordyum E.L., Kern V.D. *Life*. 2022. 12(1782):2-14.
- Sabovljević M., Vujičić M., Sabovljević A. *Botanica Serbica*. 2014. 38(1):99-107.
- Turner B.L., Baxter, R., Ellwood N.T.W., Whitton B.A. *Plant, Cell and Environment*. 2001. 24:1165-1176.

АДАПТИВНІСТЬ СОРТУ ЖИТА ОЗИМОГО «ХЛІБНА НИВА» ДО КЛІМАТИЧНИХ УМОВ

З. О. Мазур

*Верхняцька дослідно-селекційна станція Інституту біоенергетичних культур і цукрових
буряків НААН України, смт. Верхнячка, Черкаська область, Україна,
e-mail: zoya.mazur777@gmail.com*

Жито озиме (*Secale cereale* L.) є однією з найважливіших зернових культур України завдяки високій зимостійкості, невибагливості до ґрунтових умов, стійкості до несприятливих факторів середовища та стабільній урожайності. Водночас сучасні кліматичні зміни, зростання частоти посух, вплив високих температур і поширення хвороб потребують створення нових сортів із підвищеною адаптивністю та екологічною пластичністю.

Метою роботи було створення нового сорту жита озимого, який поєднує високий потенціал урожайності, стабільність прояву господарсько цінних ознак, стійкість до несприятливих умов вирощування та ураження основними хворобами.

Вихідним матеріалом були самозапильні інбредні лінії, створені шляхом багаторазового індивідуального добору із гібридних популяцій різного еколого-географічного походження. Для створення нового сорту застосовували міжлінійну гібридизацію, індивідуальний добір, оцінювання загальної комбінаційної здатності та багаторазове станційне сортовипробування.

Під час створення нового селекційного матеріалу основну увагу приділяли продуктивності рослин, зимостійкості, стійкості до вилягання, посухи та комплексу основних хвороб. Генетичне різноманіття вихідного матеріалу забезпечило широкий спектр мінливості, що дало можливість виділити перспективні лінії з комплексом господарсько цінних ознак. За результатами багаторічних досліджень до гібридизації було залучено лінії – 885, Яворець, Авель. На їх основі створено новий сорт «Хлібна нива».

Аналіз успадкування елементів структури врожайності показав, що у гібридів першого покоління за ознаками продуктивної кущистості, маси зерна з рослини та маси 1000 зерен переважав ефект наддомінування, що свідчить про високий селекційний потенціал використаних комбінацій схрещування. За висотою рослин, довжиною колоса та кількістю квіток у колосі переважало неповне домінування, що забезпечувало формування вирівняних високопродуктивних рослин.

У конкурсному сортовипробуванні сорт «Хлібна нива» стабільно перевищував стандарт за рівнем урожайності протягом шести років досліджень. Середня врожайність нового сорту становила 9,08 т/га, що на 1,33 т/га більше порівняно зі стандартом. Максимальну врожайність отримано у 2024 році — 10,2 т/га. Навіть у менш сприятливому 2023 році сорт забезпечив урожайність 7,7 т/га, що свідчить про його високу адаптивність до несприятливих погодних умов.

Під час державної науково-технічної експертизи сорт проходив випробування у двох ґрунтово-кліматичних зонах України — Лісостепу та Поліссі. Середня врожайність у зоні Лісостепу становила 7,6 т/га, у Поліссі — 6,0 т/га, що перевищувало середню врожайність сортів, зареєстрованих у попередні роки, відповідно на 1,5 та 0,6 т/га. Найвищі показники продуктивності отримано у філіях Українського інституту експертизи сортів рослин Тернопільської, Хмельницької, Сумської та Чернівецької областей.

Новий сорт характеризується високою зимостійкістю, стійкістю до вилягання, обсіпання зерна, борошнистої роси, снігової плісняви та посухи. Висота рослин залежно від умов вирощування становила 135–141 см, маса 1000 зерен — 35–42 г, що забезпечує формування високого врожаю доброї якості.

Отримані результати свідчать, що сорт «Хлібна нива» поєднує високий потенціал продуктивності, екологічну пластичність та стабільність прояву господарсько цінних ознак. Він придатний для вирощування в умовах Лісостепу і Полісся України та може бути ефективно використаний як у товарному виробництві, так і в подальших селекційних програмах для створення нових високопродуктивних сортів жита озимого.

ОЦІНКА ЛІНІЙ-ВІДНОВНИКІВ ФЕРТИЛЬНОСТІ СОНЯШНИКУ ЗА ПОСУХОСТІЙКІСТЮ В УМОВАХ ОСМОТИЧНОГО СТРЕСУ

К. М. Макляк, Д. В. Курилич, Б. П. Шепілов

*Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН України, Харків, Україна,
e-mail: yuriev1908sunflower@gmail.com*

Соняшник належить до культур із відносно високою посухостійкістю, яка переважно зумовлена комплексом морфологічних адаптацій. Проте в онтогенезі соняшнику виділяють декілька етапів, надзвичайно чутливих до впливу дефіциту вологи. В умовах України важливим є підвищення стійкості соняшнику до посухи на ранніх етапах росту рослин – під час проростання та сходів. Тому необхідно ретельне вивчення наявного генофонду для його ефективного використання в селекційній практиці.

Наразі є актуальним розвиток селекційних напрямів, які сприяють поєднанню в одному генотипі максимальної кількості корисних властивостей, що можливо завдяки використанню ефекту гетерозису та залученню до схрещувань ліній-донорів цінних господарських ознак. Відкритим залишається питання поєднання ознак посухостійкості та стійкості до рослини-паразита вовчка (*Orobanche cumana* Wallr.).

Науковцями різних країн обґрунтовано методичні підходи до оцінки соняшнику на посухостійкість. Установлено, що пророщування соняшнику в умовах осмотичного стресу, створеного розчином поліетиленгліколю з молекулярною масою 6000 (PEG 6000), супроводжується змінами схожості насіння, біомаси та лінійних розмірів проростків, а генотипи різняться за типом реакції на стресовий вплив. Проте на сучасному вітчизняному селекційному матеріалі не вивчено вплив різних концентрацій розчину PEG 6000 та не адаптовано методики пророщування насіння.

Метою наших досліджень було дослідити лінійний матеріал соняшнику шляхом пророщування насіння за різних концентрацій розчину PEG 6000. Досліджували 18 ліній-відновників фертильності соняшнику, з яких 12 ліній створено в Інституті рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН, а шість ліній – зразки колекції Національного центру генетичних ресурсів рослин України. Лінії визначено як стійкі до раси F вовчка, а ступінь ураження їх більш вірулентними расами варіював від 0,11 до 9 бульбочок паразита на одну досліджену рослину.

Пророщування насіння здійснювали в рулонах із фільтрувального паперу за температури $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Застосовували три варіанти концентрацій PEG 6000: 0 % (контроль), 10 % і 20 %. Через п'ять діб після закладання насіння на пророщування підраховували кількість пророслих насінин, вимірювали довжину корінця та гіпокотилу. Статистично опрацьовували не абсолютні значення ознак, а співвідношення кожного дослідного варіанту до контролю, виражене у відсотках.

За схожістю насіння, двофакторним дисперсійним аналізом відсотка досліду до контролю встановлено, що на ознаку значимо вплинула концентрація PEG 6000 ($p < 0,01$). Також статистично підтверджено вплив фактора «лінія» та взаємодії факторів «лінія $\times$ концентрація» ($p < 0,01$), що свідчить про значимі відмінності між досліджуваними лініями за реакцією на зміну концентрації розчину. Найбільший внесок у мінливість ознаки мав фактор концентрації PEG 6000 (30,7 %). Частка внеску фактора «лінія» в мінливість ознаки становила 29,2 %; частка внеску взаємодії факторів «лінія $\times$ концентрація» пояснювала 23,5 % загальної варіації ознаки. Лінії зменшили схожість насіння у варіанті з 10 % PEG на 0,0–27,3 %; у варіанті з 20 % PEG на 5,0–65,8 %. Серед досліджених ліній, 10 ліній показали схожість на рівні контролю у варіанті з 10 % концентрацією, з них чотири лінії мали схожість на рівні контролю у варіанті з 20 % PEG.

За довжиною корінця, двофакторним дисперсійним аналізом відсотка досліду до контролю встановлено, що на ознаку значимо вплинула як концентрація PEG 6000 ($p < 0,01$), так і фактор

«лінія» ($p < 0,01$). Статистична значимість взаємодії факторів «лінія $\times$ концентрація» ($p < 0,01$) свідчить про різну реакцію окремих ліній на варіанти досліду. Найбільший внесок у мінливість ознаки мав фактор концентрації PEG 6000 (35,87 %). Частка внеску фактора «лінія» в мінливість ознаки становила 28,62 %; частка внеску взаємодії факторів «лінія $\times$ концентрація» пояснювала 12,64 % загальної варіації ознаки. Серед досліджених ліній, у варіанті з 10 % концентрацією дві лінії статистично значимо перевищували інші лінії. Відсоток досліду до контролю становив 124,5 і 123,1 %, відповідно. Отже, довжина корінців цих ліній за пророщування в розчині PEG 6000 10 % концентрації достовірно збільшилася. Залишилися на рівні контролю довжина корінців п'ятих ліній. У варіанті з 20 % PEG всі лінії значимо зменшили довжину корінця, на 37,6–77,2 %, але виділено три лінії, кращі від інших.

За довжиною гіпокотилу двофакторним дисперсійним аналізом відсотка досліду до контролю встановлено істотний вплив фактора «лінія» ($p < 0,01$), концентрації PEG 6000 ($p < 0,01$) та взаємодії факторів «лінія $\times$ концентрація» ($p < 0,05$), що свідчить про різну реакцію окремих ліній на варіанти досліду. На ознаку найбільшим чином вплинула концентрація PEG 6000 (55,8 %), тоді як частка внеску фактора «лінія» була помірною (16,4 %), а частка внеску взаємодії факторів «лінія $\times$ концентрація» – відносно невеликою (8,2 %), але статистично значимою. Загалом лінії скоротили довжину гіпокотилу на 29,1–72,3 % у варіанті з 10 % концентрацією, і на 74,8–96,2 % у варіанті з 20 % PEG. У варіанті з 10 % концентрацією чотири лінії статистично значимо перевищили інші лінії. Ті ж самі лінії було виділено за довжиною корінця. У варіанті з 20 % концентрацією кращі лінії не визначено.

Таким чином, пророщування насіння ліній-відновників фертильності соняшнику рулонним методом у розчинах PEG 6000 дало змогу диференціювати лінії за реакцією на концентрацію розчину. Кращі лінії збільшували довжину корінця проростка або залишали її на рівні контролю у варіанті з 10 % концентрацією розчину.

БІОХІМІЧНІ АДАПТИВНІ РЕАКЦІЇ ПШЕНИЦІ ЗА ІНФІКУВАННЯ ВІРУСНОЮ ІНФЕКЦІЄЮ

**Л. Т. Міщенко¹, О. О. Молодченкова², А. А. Дуніч¹, І. І. Моцний², П. С. Тихонов^{2,4},
Я. С. Фанін², Ю. П. Ткаченко², І. А. Міщенко³, А. В. Дашченко³**

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, ННЦ «Інститут біології та медицини», Київ, Україна, e-mail: lmishchenko@ukr.net

²Селекційно-генетичний інститут-Національний центр насіннєзнавства та сортовивчення, Одеса, Україна, e-mail: olgamolod@ukr.net

³Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна

⁴Одеський державний аграрний університет, Одеса, Україна,
e-mail: pavth@ukr.net

Пшениця (*Triticum aestivum* L.), як основна продовольча культура в Україні, має велике економічне значення, водночас слугуючи критичним внеском у глобальну продовольчу безпеку. Складовими основних чинників, які лімітують реалізацію продуктивності пшениці є вірусні хвороби. Так, останніми роками в Україні констатували ураження пшениці вірусом смугастої мозаїки пшениці (ВСМП), вірусом карликовості пшениці (ВКП) та вірусом жовтої карликовості ячменю (ВЖКЯ), що призводило до зниження урожаю на 30–50 % і його якості (Міщенко, 2009; Mishchenko et al., 2021). Застосування стійких до вірусів сортів пшениці є чи не єдиним способом вирішення цієї проблеми.

Біохімічні реакції в рослинах, спричинювані вірусною інфекцією, в основному включають регуляцію фотосинтетичного апарату, зміни у системі окиснювального гомеостазу, реакцій фенольного та вуглеводного обміну та ін. Одним із важливих компонентів захисної реакції рослин на вірусне ураження є система «протеази–інгібітори». Протеази беруть участь у деградації чужорідних білків і регуляції клітинних процесів, тоді як інгібітори протеаз обмежують надмірний протеоліз та можуть виконувати антивірусну функцію (Anikina et al., 2023). Одним з механізмів захисту рослин від фітопатогенів є синтез похідних фенілпропаноїдів, флавоноїдів та інших сполук, здатних порушувати цілісність цитоплазматичних мембран фітопатогенних організмів, брати участь у каскадах складних біохімічних перетворень, що сприяють формуванню стійкості (Rashad et al., 2020). Ключовим ензимом фенольного метаболізму є фенілаланін-аміак-ліаза (КФ 4.3.1.5), який каталізує першу і лімітуючу реакцію фенілпропаноїдного шляху (дезамінування фенілаланіну). Цей ензим бере участь у біосинтезі фенольних сполук, зокрема флавоноїдів, і саліцилової кислоти. На даний час, саліцилову кислоту розглядають як фенольну сполуку з властивостями фітогормону, яка здатна функціонувати в рослині як компонент сигнальних систем клітин, що беруть участь у формуванні протекторних реакцій рослин (Pant et al., 2021). Метою даного дослідження було вивчення біохімічних адаптивних реакцій рослин пшениці за впливу вірусної інфекції.

Дослідження були проведені на зразках рослин пшениці (*Triticum aestivum* L.) сортів 'Миронівська-10', 'Ассорі', 'Вірність', 'Королева', 'Ротакс', інтрогресивної лінії пшениці '1273/25' з наявністю генів від *Aegilops tauschii* на стадії колосіння, вирощених в Полтавській, Кіровоградській та Одеській областях, уражених ВСМП та ВЖКЯ. Ідентифікацію вірусів проводили за допомогою імуноферментного аналізу у модифікації DAS-ELISA та ЗТ-ПЛР. Методи дослідження – спектрофотометричні, високоефективна рідинна хроматографія. Статистичний аналіз результатів досліджень проводили за допомогою програми "Analysis of the Data of Electron Tables Microsoft Excel" (2010), програми аналізу зображень "Imagel".

Проведені дослідження показали, що інфікування рослин пшениці ВСМП та ВЖКЯ супроводжувалося порушенням функціонування фотосинтетичного апарату рослин, що проявлялося у зниженні вмісту хлорофілу *a* в 1,2–2,1 раза, хлорофілу *b* – в 1,3–2,7 раза, вмісту каротиноїдів – в 1,4–1,8 раза, зменшенням вмісту білка (в 1,3–1,7 раза) та підвищенням рівня розчинних цукрів у 1,3–4,7 раза відносно здорових рослин. Такі реакції можуть вважатися одним із діагностичних показників вірусної інфекції. Показано, що реакція системи «протеази–інгібітори» за інфікування вірусною інфекцією мала генотип-специфічний характер. У інтрогресивної лінії

пшениці '1273/25' за інфікування ВСМП співвідношення активності нейтральної протеази до активності інгібітору трипсину зросло у 2,2 рази, тоді як у сортів 'Вірність', 'Королева' воно знижувалося у 4,4–6,3 рази відповідно. Дослідження активності ключового ферменту фенольного метаболізму фенілаланін-аміак-ліази дозволило встановити підвищення його активності в 1,3–1,4 рази за впливу ВСМП-інфекції та в 1,3 рази за інфікування ВЖКЯ відносно здорових рослин. У стійкого до ВСМП сорту 'Ротакс' підвищення активності ензиму було найбільшим (у 2,5 рази). Встановлено, що за інфікування і ВСМП, і ВЖКЯ відбувалося зростання рівня вільної форми саліцилової кислоти в порівнянні зі здоровими рослинами. Вміст вільної форми саліцилової кислоти у ВСМП-інфікованих рослин збільшився у 1,5–2 рази, особливо у стійкого до ВСМП сорту 'Ротакс' (в 2 рази) відносно контролю. За інфікування ВЖКЯ вміст вільної саліцилової кислоти підвищився у 1,3 рази. Вміст кон'югованої форми саліцилової кислоти у ВСМП-інфікованих рослин пшениці залишався на рівні здорових рослин, а за інфікування ВЖКЯ був несуттєво підвищеним, що може вказувати на залученість до захисних механізмів саме вільної форми саліцилової кислоти. Вміст флавоноїдів за інфікування ВСМП зростав у інтрогресивної лінії пшениці '1273/25' в 1,2 рази, а в рослинах сорту 'Ассорі' був незмінним. У ВЖКЯ-інфікованих рослинах сорту 'Миронівська-10' вміст флавоноїдів збільшувався також несуттєво порівняно зі здоровими рослинами. Найбільше підвищення вмісту флавоноїдів за інфікування ВСМП встановлено у рослин стійкого сорту 'Ротакс' (у 1,4 рази).

Таким чином, були виявлені генотип-специфічні зміни у біохімічних адаптивних реакціях рослин пшениці за інфікування вірусною інфекцією. Досліджені біохімічні реакції утворюють єдину багаторівневу захисну мережу, що регулює як локальну стійкість (реакцію надчутливості), так і системну набуту стійкість рослин пшениці до вірусів. Захист рослин пшениці формується внаслідок скоординованої взаємодії сигнальних, метаболічних та ферментативних систем клітини. Саліцилова кислота виконує регуляторну функцію, запускаючи системну набуту стійкість, тоді як фенілаланін-аміак-ліаза і флавоноїди забезпечують антиоксидантний захист та зміцнення клітинних стінок. Розвиток інфекції супроводжується реструктуризацією фотосинтетичного апарату та підвищенням вмісту цукрів, які виступають у ролі осмопротекторів. Комплексний аналіз цих параметрів дозволяє об'єктивно оцінити ступень стійкості генотипів пшениці за біохімічними показниками, що може бути використано для оцінки селекційного матеріалу на стійкість до вірусних хвороб.

Дослідження виконано за фінансової підтримки в рамках проєкту НФДУ № 2023.03/0244 «Механізми стійкості економічно важливих культур до вірусних хвороб в умовах воєнного стану та глобального потепління» за конкурсом «Передова наука в Україні».

ЛІТЕРАТУРА

- Міщенко Л.Т. Вірусні хвороби озимої пшениці. К.: Фітосоціоцентр. 2009. 352 с
- Mishchenko L.T. et al. *Microbiological Journal*. 2026 (1): 70-82.
- Mishchenko L. et al. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. 22(19): 10218.
- Anikina I. et al. *Front Plant Sci*. 2023. 14:1163270.
- Rashad Y., Aseel D., Hammad S., Elkelish A. *Biomolecules*. 2020.10(3). 379
- Pant S.R. et al. *MBio*. 2021.16.12(1):e03518-20.

**ДОЗОЗАЛЕЖНІ ЕФЕКТИ 2-ФЕНОКСИЕТАНОЛУ НА РІСТ, ДИХАННЯ
ТА МАРКЕРИ ОКИСНЮВАЛЬНОГО СТРЕСУ У МІКСОТРОФНИХ КУЛЬТУРАХ
*EUGLENA GRACILIS***

В. М. Мокросноп, О. К. Золотарьова

*Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України, Київ, Україна
e-mail: membrana@ukr.net*

2-Феноксіетанол ($C_8H_{10}O_2$) (ФЕ) – це органічна сполука, яку синтезують із фенолу шляхом гідроксиетилювання. Природний ФЕ також було знайдено і виділено із деяких рослин (грейпфрут, зелений чай та ін.). ФЕ широко використовують як консервант і розчинник у косметичних засобах, фармацевтичних препаратах та інших товарах, що призводить до постійного потрапляння цієї синтетичної сполуки у водне середовище (Akgündüz et al., 2020; Kilpinen et al., 2023; Trenholm et al., 2008).

Метою даного дослідження було вивчення токсичного впливу ФЕ на прісноводну фотосинтезуючу протисту *Euglena gracilis* шляхом оцінки динаміки росту культур, дихальної активності, закислення поживного середовища та реакції на окиснювальний стрес. Для цього міксотрофні культури *E. gracilis*, що культивувалися у присутності етанолу (1 %), піддавали впливу концентрацій ФЕ від 2 до 10 мМ (2, 4, 6, 8 і 10 мМ ФЕ), які додавали одноразово на початку культивування. Підрахунок концентрації клітин, вимірювання рН та аналіз вмісту поліфенольних сполук проводилися на 0, 1, 3, 6 та 12 доби вирощування усіх культур. Інтенсивність дихання оцінювали через 24 доби інкубації суспензій клітин з 6 та 8 мМ ФЕ.

Дослідження показало, що ФЕ викликає концентраційно-залежну затримку росту та часткову загибель клітин у культурах *E. gracilis*. Затримка приросту клітин у культурах супроводжувалася зниженням інтенсивності дихання їх клітин та затримкою закислення поживного середовища. Ці ефекти відображають уповільнення метаболізму етанолу як джерела карбону в кислі продукти (ацетат) у культурах з ≥ 6 мМ ФЕ протягом початкового періоду культивування порівняно з контрольною групою та культурами з нижчими дозами. Культури з 2–4 мМ ФЕ відновлювали ріст протягом 3–6 днів, тоді як тим, що зазнавали впливу 6–8 мМ ФЕ, потрібно було 6–12 днів для відновлення. Концентрація 10 мМ ФЕ мала найзгубніший ефект на культуру, оскільки з 6-ї доби до кінця дослідження спостерігали лише невелику кількість живих клітин. Підвищене накопичення поліфенолів на перший день культивування в усіх культурах може бути ознакою появи окиснювального стресу. Високі концентрації поліфенолів спостерігали у культурах з ≥ 6 мМ ФЕ по 6 добу вирощування, тоді як у контролі та варіантах з 2 і 4 мМ ФЕ з 3-ї доби вже відбулося зниження вмісту цих сполук.

Ці результати демонструють, що ФЕ в концентраціях ≥ 2 мМ діє як абіотичний стресовий фактор для *E. gracilis* та свідчать про стійкість цього організму. Хоча високі концентрації ФЕ (6–8 мМ) спричинили серйозні пошкодження та загибель частини клітин, решта популяції зберегла здатність до розмноження, що сприяло відновленню культури. Механізм негативного впливу ФЕ на *E. gracilis* та причини припинення його дії не були визначені, тож подальші дослідження ефектів, що лежать в основі токсичності та толерантності водних мікроорганізмів до ФЕ, залишаються актуальними.

ЛІТЕРАТУРА

- Akgündüz et al. *Sci. Rep.* 2020. 10:1209
Kilpinen et al. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2023. 30: 121107-121123.
Trenholm et al. *J. Chromatogr. A.* 2008. 1190: 253-262.

**БІОХІМІЧНІ МАРКЕРИ СТІЙКОСТІ РОСЛИН *GLYCINE MAX* ДО ВІРУСУ
МОЗАЇКИ СОЇ**

**О.О. Молодченкова¹, Л. Т. Міщенко², А. А. Дуніч², І. І. Моцний¹, П. С. Тихонов^{1,4},
Я. С. Фанін¹, Ю. П. Ткаченко¹, І. А. Міщенко³, А. В. Дашченко³**

¹Селекційно-генетичний інститут-Національний центр насіннєзнавства та сортовивчення,
Одеса, Україна, e-mail: olgamolod@ukr.net

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка, ННЦ «Інститут біології
та медицини», e-mail: lmishchenko@ukr.net

³Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна

⁴Одеський державний аграрний університет, Одеса, Україна, e-mail: pavth@ukr.net

Вірус мозаїки сої, ВМС (soybean mosaic virus) є одним із найпоширеніших і найбільш шкодочинних збудників вірусних хвороб сої (*Glycine max* L.) в усьому світі. Він належить до роду *Potyvirus*, родини *Potyviridae*. Встановлено, що інфікування рослин ВМС негативно впливає на продуктивність сої, структуру врожаю та якість насіння (Mishchenko et al., 2018, 2022; Molodchenkova et al., 2025). На сьогодні ідентифіковано чотири основні незалежні локуси домінуючих генів стійкості до ВМС, які позначаються як *Rsv1*, *Rsv3*, *Rsv4* та *Rsv5*. Ген *3gG2* — це один із ключових та найбільш вивчених функціональних елементів складного мультигенного сімейства у локусі *Rsv1* сої, що відповідає за розпізнавання ВМС та запуск каскаду захисних реакцій (He et al., 2025). Біохімічні протекторні реакції в рослинах включають активацію механізму антиоксидантного захисту шляхом зростання кількості різних антиоксидантів, в тому числі фенольних сполук, зміни активності пероксидази (КФ.1.11.1.7) та супероксиддисмутази (КФ 1.15.1.11). Ці ензими входять до ферментативної антиоксидантної системи рослин і мають здатність реагувати на будь-які впливи довкілля змінами наборів ізозимів та/або експресивності окремих ізоформ цих ферментів (Mishchenko et al., 2026). Пероксид водню відіграє вирішальну роль у стійкості рослин до вірусів, діючи як сигнальна молекула та прямий захисний агент. Він може запускати каскад подій, включаючи зміцнення клітинних стінок, синтез захисних сполук, таких як фітоалексини, та запрограмовану загибель клітин (реакція гіперчутливості) для стримування інфекції (Widyasari et al., 2020). Фенілаланін-аміак-ліаза (ФАЛ) має важливу роль у противірусній стійкості рослин, ініціюючи синтез фенольних сполук (Rashad et al., 2020). Саліцилова кислота (СК) є одним із ключових фітогормонів, який регулює імунну відповідь рослин. За інфікування вірусами СК відіграє роль головного сигналу для запуску як локальних, так і системних захисних механізмів (Pant et al., 2021). У різних країнах світу в програмах селекції сої успішно проводять добір вихідного матеріалу та виділення перспективних генотипів за допомогою генетичних біохімічних та молекулярних маркерів стійкості. Їх впровадження дозволяє скоротити строки створення стійких сортів та, як наслідок, отримувати високі врожаї.

Метою даного дослідження було вивчення електрофоретичних спектрів пероксидази та супероксиддисмутази, вмісту пероксиду водню та реакцій фенольного метаболізму в рослинах сої в зв'язку зі стійкістю до ВМС.

Для дослідження було взято 30 зразків рослин сої (сортів та селекційні зразки), відібраних у фазі цвітіння на полях Київської та Полтавської областях. Ідентифікацію вірусів проводили за допомогою імуноферментного аналізу у модифікації DAS-ELISA та ЗТ-ПІП. Зразки сої відрізнялися за наявністю–відсутністю гена *3gG2* в локусі *Rsv1*. Методи дослідження біохімічних реакцій – спектрофотометричні, високоефективна рідинна хроматографія, нативний гель-електрофорезу в

ПААГ. Статистичний аналіз результатів досліджень проводили за допомогою програми Prism Graph 8 (GraphPad Software, San Diego, CA, USA), програми аналізу зображень "Imagel".

Визначення вмісту пероксиду водню, вільної та кон'югованої форм ендогенної СК і активності ФАЛ в рослинах досліджених генотипів сої показало, що більшість сортів з наявністю гена *3gG2* у локусі *Rsv1* характеризувалися підвищеними активністю ФАЛ та вмістом ендогенної СК, особливо сорти Елена, Вільшанка, Діона, Апіка. У деяких сортів з наявністю гена *3gG2* у локусі *Rsv1* виявлено також підвищений рівень пероксиду водню. Це, наприклад, сорти Командор, Апіка, Арніка, Діона.

Нами було проведено дослідження компонентного складу фенольних сполук, в тому числі флавоноїдів, у листках рослин сої у фазі цвітіння. В результаті були ідентифіковані такі сполуки: хлорогенова кислота, саліцилова кислота, кавава кислота, дайдзін, геністин, нарінгін, рутин, дайдзеїн, кверцетін та геністеїн. Показано, що ступень стійкості рослин сої до ВМС зумовлений вмістом конкретних фенольних кислот та флавоноїдів, зокрема саліцилової та хлорогенової кислот, рутину.

Електрофоретичний аналіз пероксидази та супероксиддисмутази в листках рослин сої показав, що кількість ізоформ ензимів варіює залежно від генотипу від 4 до 13 ізоформ різної експресивності та відносної рухливості. Встановлено, що гетерогенність та експресивність ізоформ ензимів залежали від сортової (генотипної) специфіки, стійкості до ураження ВМС, а також від наявності чи відсутності гена *3gG2* у локусі *Rsv1*. У сортів сої з геном *3gG2* у локусі *Rsv1* виявлена наявність та висока експресивність двох високорухливих ізоформ пероксидази (POX-12, POX-13) та трьох малорухливих ізоформ супероксиддисмутази (Sod-1, Sod-2, Sod-3).

Проведені дослідження підтверджують, що одним із механізмів стійкості рослин сої до ВМС є активація комплексу захисних реакцій, які пов'язані з геном *3gG2* (локус *Rsv1*) і реалізується через підвищення активності фенілаланін-аміак-ліази, накопичення конкретних фенольних сполук, генерацію сигнальних молекул (пероксиду водню та саліцилової кислоти) та специфічну експресію ізоформ пероксидази і супероксиддисмутази. Отримані результати доповнюють результати моніторингу полів та результати ІФА і ПЛР аналізів по скринінгу сортів сої на стійкість до ураження вірусом, а також можуть слугувати маркерними ознаками в подальших дослідженнях, дозволяючи більш детально вивчати стійкість сортів сої до ВМС.

Дослідження виконано за фінансової підтримки в рамках проєкту НФДУ № 2023.03/0244 «Механізми стійкості економічно важливих культур до вірусних хвороб в умовах воєнного стану та глобального потепління» за конкурсом «Передова наука в Україні».

ЛІТЕРАТУРА

- Mishchenko et al. *Agriculture and Forestry*. 2018. 64(4): 39-47.
Mishchenko et al. *Agriculture and Forestry*. 2022. 68 (4):165-175.
Molodchenkova et al. *Food Science and Technology*. 2025. 19(2):32-42.
He et al. *Int. J. Mol. Sci*. 2025. 26(5):2106.
Mishchenko et al. *Ukr. Biochem. J*. 2026. 98(1):108-116.
Widyasari K., Alazem M., Kim K-H. *Plants*. 2020 9(2):219.
Anikina et al. *Front Plant Sci*. 2023. 14:1163270.
Rashad et al. *Biomolecules*. 2020.10(3). 379
Pant S.R. et al. *MBio*. 2021.16.12(1):e03518-20.

ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ОЗИМОЇ ПШЕНИЦІ ДО ХВОРОБ ТА ПОСУХИ ШЛЯХОМ ЗАЛУЧЕННЯ У СЕЛЕКЦІЙНИЙ ПРОЦЕС ІНТРОГРЕСИВНИХ ЛІНІЙ

**І. І. Моцний¹, О. О. Молодченкова¹, Т. П. Нарган¹, Є. А. Голуб¹, Я. С. Фанін¹,
А. В. Дашенко², І. А. Міщенко², А. А. Дуніч³, Л. Т. Міщенко³**

¹*Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннєзнавства
та сортовивчення, Одеса, Україна, e-mail: motsnyyii@gmail.com*

²*Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна,
e-mail: dannaval@ukr.net*

³*Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, Київ, Україна,
e-mail: lmishchenko@ukr.net*

Завдяки широкому запровадженню пристосованих до інтенсивних технологій вирощування сортів озимої пшениці (*Triticum aestivum* L.) вдалося суттєво перевершити рубіж її потенційної продуктивності 100 ц/га (Литвиненко, 2016). На жаль, в суворих умовах сьогодення (глобальні зміни клімату, посуха, військовий стан країни) при гострому дефіциті та дорожнечі всіх технологічних засобів, переваги сучасних високопродуктивних сортів значною мірою нівелюються (Васильківський та ін., 2017). На низьких агрофонах (за відсутності добрив, пестицидів і фунгіцидів), за неможливості дотримання жорстких вимог агротехніки (при порушеннях систем землеробства, сівозмін, посіві після малоцінних попередників), іноді за технологічних відхилень не спостерігається суттєвих відмінностей нових генотипів від старих сортів; підвищення урожайності іноді складає всього 2–3 %.

Крім того, внаслідок прискореної через м'які зими еволюції збудників постійно утворюються нові більш агресивні раси хвороб, спроможні долати гени стійкості сучасних сортів (Miedaner, Juroszek, 2021; Bouvet et al., 2022; Sadeghi et al., 2024). Виявлення нових джерел та формування донорів стійкості до абіотичних і біотичних стресових чинників може стати основою для створення сортів нового типу, здатних ефективно протидіяти цим викликам. Це дозволить реалізувати спадковий потенціал продуктивності навіть за умов низьких агрофонів, без застосування засобів захисту від поширених хвороб, шкідників та бур'янів, а також за наявності технологічних відхилень. У сучасних умовах особливо актуальним є формування генотипів, які гарантуватимуть мінімальний рівень урожайності в стресових середовищах, водночас у сприятливих умовах високих агрофонів зберігатимуть свої переваги щодо високої продуктивності (Лифенко та ін., 2021).

Випробування інтрогресивних ліній у СГІ–НЦНС проводяться уже протягом багатьох років. Щосезону в контрольному розсаднику першого року (КР-1) оцінювали близько 100 новостворених інтрогресивних ліній як вихідний селекційний матеріал, з яких за результатами первинної оцінки до контрольного розсадника другого року (КР-2) відбирали 15–20 найкращих в даних умовах генотипів. Подальший добір мав характер послідовної багатоступеневої селекції, внаслідок чого до поглибленого вивчення у вищих ланках селекційного процесу залучали всього 1–2 лінії, які відповідали встановленим критеріям за комплексом селекційно цінних ознак, перевищували найближчі стандарти за врожайністю на низькому агрофоні та характеризувалися наявністю чужинних ознак, насамперед підвищеною стійкістю до хвороб (Моцний та ін., 2025). Для створення сортів з підвищеними адаптивними властивостями та комплексом інших важливих ознак необхідно було перевірити ці лінії на високому агрофоні мінеральних добрив, за високого рівня агротехніки, в оптимальних умовах для сортів-стандартів. В зв'язку з цим, метою нашого дослідження було визначити рівень стійкості до посухи і поширених хвороб та селекційну цінність кращих удосконалених інтрогресивних ліній пшениці м'якої озимої, похідних від складних багатоетапних схрещувань, на завершальних етапах селекційного процесу – попередньому (ПСВ) та конкурсному (КСВ) сортовипробуванні, а також їхній потенціал як вихідного матеріалу для створення нових сортів з комплексом переваг, адаптованих до сучасних умов виробництва.

Генетичний матеріал включав 15 кращих інтрогресивних ліній озимої пшениці різних поколінь, ступенів насичення та походження, відібраних у КР-1 і КР-2 протягом 2016–2021 рр. (Моцний та ін., 2025), а також три сорти-стандарти для посушливої кліматичної зони (Антонівка, Куя-

льник і Наснага). Польові досліді були закладені у сівозмінах селекційних підрозділів СГІ–НЦНС згідно із загальноприйнятою схемою селекційного процесу самозапильних культур. Сприйнятливості рослин до хвороб досліджували на фоні борошнистої роси (*Blumeria graminis* (DC) Speer f. sp. *tritici* March.), листової (*Puccinia triticina* Erikss. & Henn.), жовтої (*Puccinia striiformis* West.) та стеблової (*Puccinia graminis* sp. *tritici* Erikss. & Henn.) іржі, септоріозу листя (*Septoria tritici* Rob. ex Desm.) та суміші вірусних інфекцій. Вплив патогенів на дорослі рослини оцінювали за 9-бальною інтегрованою шкалою, розробленою на основі модифікованої шкали Саарі і Прескотта (Бабаянц, Бабаянц, 2014). Вміст білка визначали за методом К'ельдаля, а масу тисячі зернин – за загальноприйнятою методикою (ДСТУ 4138-2002).

В КР кращі лінії відбиралися за продуктивністю та комплексом селекційних ознак на низькому агрофоні (при мінімальних дозах добрив), за відсутності хімічного захисту рослин і наявності визначеного тренду на зниження загальної урожайності матеріалу під впливом жорстких умов середовища. При цьому дисперсійний аналіз підтвердив вірогідність негативного впливу стресових чинників та обмеженого агрофону (фактора «Рік») на варіабельність урожайності досліджуваного матеріалу ($F(4; 59)=293,8; p < 0,001$), що відображає високу мінливість агрокліматичних умов протягом періоду досліджень. Зниження врожайності є систематичним і, отже, може вважатися загальною закономірністю зниження урожайності пшениці, яка, в цілому, збігається із світовими тенденціями і пояснюється змінами клімату та детермінованими ними абіотичними стресовими чинниками. Крім того, вона підтверджує загальновідому тенденцію до зменшення адаптивності селекційного матеріалу в умовах мінімального агротехнічного забезпечення.

Використаний нами підхід дозволив ідентифікувати генотипи з підвищеною адаптивною здатністю та стабільністю продуктивності в умовах обмеженого ресурсного забезпечення. Виділені, таким чином в КР лінії відрізнялися підвищеною урожайністю на низькому агрофоні, в порівнянні зі стандартами, ця тенденція простежувалася і в ПСВ, і в КСВ-2. При цьому спостерігалось послідовне скорочення кількості генотипів на етапах КР-1 → КР-2 → ПСВ → КСВ-2 → КСВ-1, що підтверджує ефективність багаторівневого добору за умов зниженого агрофону та природного інфекційного фону. Також, оцінювання без хімічного захисту забезпечило об'єктивну реалізацію генетично зумовленої стійкості. Окремі лінії мали перевагу за крупністю зерна або вмістом білка.

Однак, в КСВ-1, на підвищеному рівні агрофону, виділені лінії, незалежно від метеорологічних умов, поступалися або знаходились на рівні стандартів за урожайністю, що унеможливило їхню передачу на Державне сортовипробування на даному етапі. З урахуванням адаптивного та продуктивного потенціалу цих ліній, робота продовжена шляхом додаткового вивчення в різних умовах вирощування, збереження їх генотипу і покращення із залученням в гібридизацію із найкращими сортами одеської селекції. Висловлено припущення, що генетичне тло окремих інтрогресивних ліній сприятливе для реалізації позитивного впливу пшенично-житньої транслокації 1BL.1RS на їх адаптивні ознаки та можливість комбінування з іншими генами стійкості, хоча призводить до сильного зниження висоти рослин.

Отже, у результаті проведеної роботи виділено селекційні лінії-донори з ознаками стійкості до іржастих хвороб, такі, що мають підвищені значення вмісту білка, які характеризуються високою продуктивністю, адаптивністю, толерантністю до низьких агрофонів. Лінії позбавлені багатьох негативних якостей дикорослих видів та за умови збереження чужинних генних комплексів можуть становити інтерес для подальшої селекційної роботи на півдні України. Їх використання дозволяє розширити генетичну базу резистентності озимої пшениці, проте для підвищення потенційної продуктивності більш доцільною є внутрішньовидова гібридизація з екологічно віддаленими сортами.

Дослідження виконано за фінансової підтримки в рамках проєкту НФДУ № 2023.03/0244 «Механізми стійкості економічно важливих культур до вірусних хвороб в умовах воєнного стану та глобального потепління» за конкурсом «Передова наука в Україні».

ЛІТЕРАТУРА

- Васильківський С.П. Фактори експериментальної еволюції організмів. 2017. 21:47–51.
Литвиненко М.А. Сортовивчення та охорона прав на сорти рослин. 2016. 2:75–82.
Лифенко С.П. Вісник аграрної науки. 2021. 99(3):53–62.
Моцний І.І. Фактори експериментальної еволюції організмів. 2025. 37: 35–40.
Bouvet L. *Theor. Appl. Genet.* 2022. 135(3):741–753.
Miedaner T. *Theor. Appl. Genet.* 2021. 134(6):1771–1785.
Sadeghi M. *Iran. J. Pl. Protect. Sci.* 2024. 55(2):283–294.

**ПЛАСТИЧНІСТЬ АНАТОМІЧНОЇ СТРУКТУРИ ТА ВМІСТУ КАЛОЗИ У
ЛИСТКАХ ГЕЛІОФІТУ *TYPHA ANGUSTIFOLIA* ПРИ ЗМІНІ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ**

О. М. Недуха

*Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України,
Київ, Україна, e-mail: o.nedukha@hotmail.com*

Проблема стійкості та адаптації рослин до несприятливих змін довкілля залишається однією з першочергових проблем теоретичної та експериментальної біології, і суттєво загострюється у зв'язку з посиленням антропогенного навантаження на біосферу та прогнозами глобальних змін клімату. Одним з таких факторів є затоплення рослин та зміни вологості ґрунту, особливістю яких, як стресових факторів, є поєднання змін водного балансу органів рослин, порушення кисневого дихання у кореневій системі, і як наслідок – зміни на рівні росту та розвитку рослин (Jackson, Armstrong, 1999; Takahashi et al., 2014). Незважаючи на це, рослини виробляють механізми адаптації до несприятливих умов на різних рівнях організації (від морфологічного до генетичного), які допомагають їм пристосуватися до зміненого середовища. Вважається, що фенотипічна пластичність є основою для виживання та збереження популяцій, а також ключовим елементом екологічних зв'язків між видами у біотопах (Kordyum, Dubyna, 2019).

Встановлено, що полісахарид калоза є одним із компонентів клітинних стінок епідермісу, який бере активну участь у фенотипічній пластичності рослин при екологічних змінах, включаючи участь у зміні інтенсивності транспорту води та водних розчинів по симпласту, а також реагує на дію екзогенних факторів. відповідає за еластичність та гнучкість листя та стебел, осмотичний розтяг клітин. Крім того, калоза відіграє бар'єрну роль за дії на рослини важких іонів та токсинів (Chen, Kim, 2009; Nedukha, 2022). Зручною природною моделлю для вивчення адаптивної здатності рослин до зміни водозабезпечення є геліофіт – рогіз вузьколистий *Typha angustifolia* L. (родина Typhaceae), який в природних умовах пристосувався до зростання в контрастних умовах середовища: у воді та на суходолі.

Метою нашої роботи було порівняльне вивчення анатомічних ознак листків водних та суходільних рослин рогозу вузьколистого, дослідження локалізації та вмісту калози у клітинних стінках. Об'єктом дослідження були перші листкові пластинки рослин геліофіту рогозу вузьколистого *T. angustifolia*, які зростали у воді на березі Венеціанської затоки (лівий берег р. Дніпро, у зоні Києва) та на суходолі, на напівпіщаному ґрунті, близько 3–4 метрів від берега. Матеріал для досліджень збирали у фазі вегетативного росту. Лінійні розміри клітин визначали на поперечних зрізах зразків листків водного та суходільного рогозу. Для досліджень використовували метод світлової мікроскопії та лазерно-кофокальної мікроскопії. Визначення наявності калози у клітинах проводили за класичним протоколом із використанням флуоресцентного барвника анілінового синього, в конфокальному лазерному сканувальному мікроскопі LSM 5 Pascal; відносний вміст калози визначали з використанням програмного забезпечення Pascal. Статистичну обробку розмірів клітин проводили із використанням програми Origin 6.1, та тесту Ст'юдента ($P \leq 0,05$).

Польові дослідження рогозу вузьколистого показали, що рослини характеризуються черговим розміщенням листків аж до верхівки стебла. Стебло рогозу прямостояче, кругле, товсте, голе, гладеньке. Листки лінійно-ланцетні, плескаті. У водних рослин листки виправлені, тоді як листки суходільних рослин можуть бути як прямі, так і трохи згорнуті всередину. Встановлено, що вологість ґрунту, на якому зростали водні рослини рогозу становила $81 \pm 2,3 \%$, тоді як вологість ґрунту, на якому зростали суходільні рослини рогозу, була значно нижчою, і становила $57,3 \pm 1,9 \%$.

Порівняльне дослідження морфо-структурних, анатомічних та цитохімічних показників листків геліофіту *T. angustifolia*, що зростав у воді та на суходолі, показало наявність спільних та від-

мінних структурних ознак. Спільними ознаками були: лінійна форма листків, повздовжнє жилкування, розміри клітин епідермісу та палісадної паренхіми, амфістоматичний тип пластинки (продихи на обох сторонах листка), дорзовентральний тип мезофілу. Листки характеризувалися наявністю колатеральних провідних пучків, які разом із склеренхімою та клітинами губчастого мезофілу розділяли листову пластинку на ділянки, в центрі яких формувалися великі повітряні порожнини (аеренхіма). Провідні колатеральні пучки розташовані в паралельних клітинних перегородках, як із адаксіальної, так із абаксіальної сторони, ці пучки мають розширення склеренхіми, яка зв'язує судинні пучки з епідермісом. Губчаста паренхіма розміщується за палісадною паренхімою та у перегородках (із провідними пучками), які розмежовують аеренхіму. Встановлено, що аеренхіма формувалася за рахунок лізису клітин палісадної та губчастої паренхіми.

Відмінності проявлялись у збільшенні розмірів листових пластинок у суходільних рослин, та зміні площі аеренхіми у листках водних рослин. Розміри листків суходільного рогозу становили: $54,3 \pm 3,7$ см за довгою віссю та $3,2 \pm 0,4$ см за короткою. Листки рогозу, що зростав у воді були меншими, їх середній розмір становив $43,7 \pm 5,9$ см за довгою віссю та $2,1 \pm 0,3$ см за короткою. Зниження розмірів листків у рогозу, що зростав у воді, можуть бути наслідком дії ендегенних та екзогенних факторів. За даними літератури подібні відмінності можуть бути пов'язані із змінами тривалості клітинного циклу та тривалості розтягу клітин, змінами у водному та газовому балансі, а також зі змінами у живленні рослин (Takahashi et al., 2014).

Цитохімічне дослідження наявності калози в листках рогозу вузьколистого із використанням лазерно-конфокальної мікроскопії показало інтенсивну флуоресценцію цього полісахариду у клітинних стінках досліджуваних зразків незалежно від умов зростання рослин. Калоза виявлена у стінках клітин верхнього та нижнього епідермісу, клітинах фотосинтезувальної паренхіми, склеренхіми та тканинах колатеральних провідних пучків (у флоемі та ксилемі). Встановлено, що відносний вміст калози у досліджуваних зразках залежав від умов зростання геліофіту, тобто від вологості ґрунту, та від типу тканин листка. Відносний вміст калози у клітинах водних рослин був вищий, ніж у суходільних рослин. Тканини за вмістом калози можна розмістити у наступному порядку: склеренхіма > флоема провідного пучка > ксилема провідного пучка > адаксіальний та абаксіальний епідерміс > губчаста паренхіма > палісадна паренхіма. Тобто, клітинні стінки склеренхіми, паренхімних клітин обкладинки судин та ксилеми є найбільшими акумуляторами цього полісахариду незалежно від вологості ґрунту, на якому зростали рослини рогозу. Ми вважаємо, що така пластичність щодо вмісту калози сприяє збереженню оптимального водного статусу рослин та допомагає рогозу нормально зростати у водному середовищі, збільшуючи їх еластичність та життєздатність у воді під дією сильних течій та тиску води. Отримані результати свідчать не тільки про прояв структурно-функціональної пластичності листків, а й можливе використання калози як адаптаційного маркера геліофітів до зростання у різних умовах водопостачання.

ЛІТЕРАТУРА

- Chen Xiong-Yan, Kim J.Y. (2009). *Plant Signaling and Behavior*, 4(6):489–492.
- Jackson M.B., Armstrong W. (1999). *Plant Biol.*, 1:274-287.
- Kordyum E., Dubyna D.V. (2019). *International Journal of Advanced Research in Botany*, 5: 8–13.
- Nedukha O.M. (2022). Tolerance of plant cell wall to environment. In: J.N. Kimatu (Ed.), *Advances in Plant Response Mechanisms to Abiotic Stresses* (pp.325–350). IntechOpen, London.
- Takahashi H., Yamauch T., Colmer T.D., Nakazono M. (2014). Aerenchyma Formation in Plants. In: Joost T. van Dongen, Francesco Licausi (Ed.). *Low-Oxygen Stress in Plants*, pp. 247-265. Publisher: Springer Vienna

УЧАСТЬ КРЕМНІЮ В АДАПТАЦІЇ РОСЛИН *TYPHA ANGUSTIFOLIA* ДО ЗМІНИ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ

О. М. Недуха, Т. В. Воробйова, Ю. В. Овчаренко

*Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України,
Київ, Україна, e-mail: o.nedukha@hotmail.com*

Встановлено, що підтримання стійкості рослин у варіабельному природному середовищі забезпечується шляхом пластичності морфогенезу та структурно-функціональної організації клітин (Kordyum, Dubyna, 2019). Зокрема, за ґрунтової чи повітряної посухи, або ж при затопленні, рослина мобілізує всі можливі ланки метаболізму для виживання у несприятливих умовах. В першу чергу це необхідно для зниження втрат води листками, що проявляється в інгібуванні роботи продохів та зниженні кутикулярної транспірації. Інгібування кутикулярної транспірації відбувається внаслідок акумуляції кремнієвих включень в епідермісі листків, потовщення та зміни структури клітинних стінок листків та стебел (Kerstein, 2006; Liu et al., 2014). Встановлено, що іони кремнію пов'язані зі стійкістю рослин до зміни водного балансу рослин, зокрема, вони знижують поглинання сонячного світла, оптимізують тепловий та водний баланс клітин, що супроводжується експресією генів, які кодують білки дегідрини, під час зневоднення рослин за умов посухи та осмотичного стресу (Manivannan, Ahn, 2017).

Зручною природною моделлю для вивчення адаптивної здатності рослин до зміни ґрунтового водозабезпечення є геліофіт – рогоз вузьколистий *Typha angustifolia* L. (родина Typhaceae), який пристосувався до зростання в контрастних умовах середовища: у воді та на суходолі. Дослідження участі іонів кремнію в адаптації до росту у контрастних умовах, не проводилось. Тому метою нашої роботи було порівняльне вивчення локалізації та вмісту кремнію у листках водних та суходільних рослин рогозу вузьколистого. Досліджували листки рогозу у фазі вегетативного росту на початку червня. Рослини геліофіту *T. angustifolia* зростали у воді на березі Венеціанської затоки (у зоні Києва) та на суходолі, на напівпіщаному ґрунті, біля берега. Наявність кремнію у листках рогозу проводили двома методами: цитохімічним методом (на конфокальному мікроскопі) та електронно-мікроскопічним. Для цього листові пластинки рогозу фіксували прямо на березі у суміші розчинів альдегідів, потім фіксовані зразки за стандартними методиками готували для мікроскопічних досліджень. Цитохімічне вивчення наявності, локалізації та вмісту кремнію у листках рогозу проводили на лазерно-сканувальному конфокальному мікроскопі LSM 5 ("Zeiss", Німеччина) при довжині хвилі збудження 480 нм та емісії 500–530 нм. Відносний вміст кремнію визначали за програмою Pascal ("Zeiss", Німеччина). Для другого методу фіксовані та зневоднені зразки листків рогозу вивчали з використанням сканувального електронного мікроскопа JSM 6060 LA з рентгенівською установкою EX-S4175GMU (JEOL, Японія) та програмою ZAF. Для стандартного кількісного аналізу елементів вміст кремнію визначали у відсотках сканованої маси листових пластинок (mass%).

Встановлено, що вологість ґрунту, на якому зростали водні рослини рогозу, становила $81 \pm 2,3$ %, тоді як вологість ґрунту, на якому зростали суходільні рослини рогозу, була значно нижчою, і становила $57,3 \pm 1,9$ %.

Цитохімічне дослідження наявності кремнію в листках рогозу вузьколистого із використанням лазерно-конфокальної мікроскопії показало інтенсивну флуоресценцію цього хімічного елемента у клітинних стінках епідермісу досліджуваних зразків незалежно від умов зростання рослин. Кремній у вигляді аморфних та кристалічних включень виявлено в усіх клітинах обох структурних зон, які характерні для листків рогозу: в зоні пагорбів (над жилками) та в зоні продохів. В зоні продохів кремній виявлено на поверхні замикальних клітин продохів, в клітинах, що оточува-

ли продихи, та у звичайних клітинах епідермісу цієї зони. Встановлено, що відносний вміст кремнію був найбільший в зоні пагорбів (над жилками) (154 ± 14 відн. од.), вірогідно менші величини були встановлені у клітинах продихової зони (в замикальних клітинах продихів 135 ± 13 відн. од., та 81 ± 5 відн. од. – у клітинах навколо продихів та у звичайних клітинах епідермісу). Виявлено, що відносний вміст кремнію в усіх типах клітин верхнього епідермісу був більший, ніж такий у клітинах нижнього епідермісу. Встановлено, що вміст кремнію у досліджуваних зразках залежав від умов зростання геліофіту, тобто від вологості ґрунту. Відносний вміст кремнію у клітинах суходільних рослин був більшим в 1,3–1,6 рази порівняно із таким у клітинах епідермісу водних рослин. Вміст кремнію можна розмістити у наступному порядку: клітини над жилками > продихи > клітин, що оточували продихи та звичайні клітини епідермісу. Тобто, клітинні стінки над провідними пучками (зона пагорбів) є найбільшими акумуляторами цього елемента незалежно від вологості ґрунту, на якому зростали рослини рогозу.

Методом X-гау аналізу ми також встановили наявність іонів кремнезему в епідермісі листків водних і суходільних рослин рогозу вузьколистого, вміст яких залежав від екотипу та поверхні епідермісу листків. Розсіювальний рентгеноструктурний аналіз хімічних елементів у листках рогозу, що зростав у воді, показав наявність кремнію в усіх типах клітин епідермісу. Вміст кремнію (в % mass) у клітинах адаксіальної поверхні становив $\sim 0,09$ % маси у пагорбковій зоні (над жилками), та $0,05$ – $0,08$ % у замикальних клітинах продихів та у звичайних клітинах епідермісу. У клітинах абаксіальної поверхні епідермісу величини вмісту кремнію були менші майже удвічі. Використання X-гау аналізу листків суходільного рогозу показало, що вміст кремнію у листках був більший у порівнянні із таким в епідермісі листків рогозу, що зростав у воді. На верхній поверхні, у клітинах пагорбкової зони він варіював від $0,46$ % до $0,97$ %. У клітинах продихової зони його вміст складав $0,15$ – $0,19$ %, у звичайних клітинах епідермісу – $0,43$ – $0,57$ %, відповідно. На нижній поверхні листка вміст кремнію був трохи меншим, ніж на верхній поверхні.

На підставі аналізу літературних і власних даних локалізації та вмісту кремнію в листках повітряно-водних і суходільних рослин рогозу можна припустити, що саме підвищена акумуляція кремнію в клітинах епідермісу суходільних рослин сприяє збереженню оптимального водного статусу при зниженні вологості ґрунту і є одним із факторів, які зумовлюють поширення цього виду в різноманітних за екологічними умовами районах України та Європи. Отримані нами дані можуть служити основою для використання рогозу в практиці та розробки природних кремнієвих добрив для сільськогосподарських видів.

ЛІТЕРАТУРА

- Kerstiens G. (2006). *J. Exp. Bot.*, 57: 2493-2499.
- Kordyum E.L., Dubyna D.V. (2019). *Intenational Journal of Advanced Research in Botany*, 5: 8–13.
- Liu P., Yin L., Deng X., Wang S., Tanaka K., Zhang S. (2014). *J. Exp. Bot.*, 65: 4747-4756.
- Manivannan A., Ahn Y.K. (2017). *Front. Plant Sci.*, 8. Art. 1346: 1-13.

**ГЕНЕТИЧНЕ РІЗНОМАНІТТЯ ПОПУЛЯЦІЙ *CRATONEUROPSIS CHILENSIS*
З МОРСЬКОЇ АНТАРКТИКИ ЯК ОСНОВА ДОСЛІДЖЕННЯ АДАПТАЦІЇ
ДО ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВ**

**Д. О. Новожилов¹, А. М. Рабоконь¹, І. Ю. Парнікоза², В. Г. Сахарова¹, Т. С. Шуть¹,
Р. Я. Блюм¹, І. А. Козерецька², Я. В. Пірко¹, Я. Б. Блюм¹**

¹ДУ «Інститут харчової біотехнології та геноміки Національної академії наук України»,
Україна, Київ, Україна, e-mail: novozhylov@gmail.com, yaryp1@gmail.com

²Державна установа Національний антарктичний науковий центр
Міністерства освіти і науки України, Київ, Україна

Мохи є важливими модельними об'єктами для вивчення адаптації рослин до абіотичних стресорів, зокрема низьких температур, надмірного зволоження та підвищеного рівня ультрафіолетового випромінювання, характерних для Антарктики. Дослідження генетичного різноманіття природних популяцій таких видів дає змогу краще зрозуміти механізми їхньої адаптації до екстремальних умов існування, оцінити стійкість антарктичної флори до кліматичних змін і зростаючого антропогенного навантаження. З огляду на острівний характер наземних екосистем иорської Антарктики, аналіз просторової генетичної структури популяцій також має важливе значення для дослідження біогеографічних закономірностей формування флори ізольованих територій (Андреев та ін., 2012). У порівнянні зі значною кількістю досліджень, присвячених судинним рослинам Антарктики (Parnikova et al., 2011; Vera, 2011; Rabokon et al., 2019; Rabokon et al., 2024), генетичне різноманіття антарктичних мохів залишається недостатньо вивченим.

У роботі оцінили генетичне різноманіття популяцій спорадично поширеного моху – *Cratoneuropsis chilensis* із морської Антарктики та порівняли їх із популяціями з Південної Америки, де вид є більш поширеним, за допомогою маркерів, заснованих на поліморфізмі інтронів генів β -тубуліну.

За допомогою методів оцінки поліморфізму довжини інтронів генів β -тубуліну (TBP та hTBP) досліджено зразки з 37 популяцій *C. chilensis* з островів Морської Антарктики (узбережжя Грея) та 6 зразків із південної частини Південної Америки (регіон Магальянес, Чилі). Усі 43 зразки були відібрані під час 28-ї та 29-ї Українських антарктичних експедицій.

Результати аналізу свідчать про існування типового ДНК-профілю, притаманного більшості досліджених антарктичних популяцій, зосереджених переважно на островах Галіндез, Дарбо, Грін, Україна, а також частково на островах Петерман, Сомервіль, Блек, мисі Туксен та з міста Пунта-Аренас (Чилі). Найбільш відмінні профілі за обома маркерами виявлено у географічно крайніх популяціях узбережжя Грея з островів Бут та Чавез, а також у зразка з долини річки Rio de las Minas поблизу м. Пунта-Аренас. За TBP-маркером поліморфізм виявлено в окремих популяціях островів Сомервіль, Блек і мису Туксен. За hTBP-маркером поліморфними також були популяції острова Петерманн, у яких встановлено три різні ДНК-профілі. Південноамериканські популяції характеризувалися вищим рівнем поліморфізму за обома маркерами, поєднуючи як генотипи з типовим для антарктичних популяцій профілем, так і власні відмінні варіанти.

Отримані результати свідчать про високу генетичну подібність більшості антарктичних популяцій *C. chilensis*, що може бути наслідком єдиної події колонізації Морської Антарктики та порівняно однаковим часом адаптації до умов морської Антарктики. Водночас локальний поліморфізм, виявлений у популяціях з окремих островів, може бути пов'язаний з особливостями історії формування популяцій або впливом локальних екологічних чинників. Вища гене-

THIRD INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
"PLANT STRESS AND ADAPTATION"

тична різноманітність південноамериканських популяцій свідчить про імовірний вихідний пункт колонізації і джерело генетичного різноманіття виду. Отримані дані розширюють уявлення про популяційну структуру *C. chilensis* та створюють основу для подальших досліджень процесів поширення, колонізації та адаптації мохоподібних морської Антарктики.

*Дослідження виконано за підтримки Національного антарктичного наукового центру в межах проєктів № Н/03-2024 «Дослідження генетичної мінливості мохоподібних Морської Антарктики з використанням молекулярно-генетичних маркерів» (2024 р.) (№ державної реєстрації 0124U004087) та № Н/17-2025 «ДНК-профілювання популяцій *Cratoneuropsis relaxa* Морської Антарктики» (2025 р.) (№ державної реєстрації 0125U003076). Автори висловлюють вдячність Г. Євчун за зразки з острова Наварино.*

ЛІТЕРАТУРА

- Andreev I.O., Volkov R.A., Kozeretska I.A., et al. *Ukr. Antarct. J.* 2012. 10–11:282–288.
Parnikoza I., Kozeretska I., Kunakh V. *Amer. J. Plant Sci.* 2011. 2:381–395.
Vera M.L. *Polar Res.* 2011. 30:10650.
Rabokon A.M., Pirko Y.V., Demkovych A.Y. et al. *Polar Sci.* 2019. 19:151-154.
Rabokon A., Bilonozhko Y., Postovoitova A., et al. *Ukr. Antarct. J.* 2024. 22:186-197.

**ДОБІР ГІБРИДІВ ЦУКРОВОГО СОРГО З ВИСОКИМ БІОЕНЕРГЕТИЧНИМ
ПОТЕНЦІАЛОМ В УМОВАХ ПОСУШЛИВОГО СТЕПУ УКРАЇНИ**

М. Г. Носов, О. В. Яланський

*ДУ «Інститут зернових культур НААН України, Дніпро, Україна,
e-mail: maksimnosov0102@gmail.com*

Посилення проявів кліматичних змін, зокрема зростання частоти та тривалості посух у степовій зоні України, зумовлює необхідність пошуку культур із високою адаптивністю до водного дефіциту. Однією з перспективних культур для таких умов є цукрове сорго, яке характеризується високою посухостійкістю, значною продуктивністю біомаси та здатністю накопичувати велику кількість розчинних вуглеводів.

Мета досліджень – оцінити селекційний матеріал цукрового сорго та виділити перспективні гібриди з високою продуктивністю і біоенергетичним потенціалом, адаптовані до посушливих умов Степу України.

Дослідження проводились протягом 2023–2025 рр. на Синельниківській селекційно-дослідній станції ДУ Інститут зернових культур НААН. У селекційних розсадниках і конкурсному сортовипробуванні вивчали гібриди та сортозразки різного походження. Визначали врожайність зеленої маси, вміст сухої речовини, концентрацію розчинних вуглеводів у соку стебел, вихід твердого біопалива та енергії.

Встановлено значну генетичну мінливість досліджуваних гібридів за всіма господарсько-цінними ознаками. Найвищу врожайність зеленої маси у різні роки досліджень сформували гібриди F₁ (Раннє 776с × Красень) – 83,8 т/га, F₁ (Кафрське кормове 186с × Карликове 45) – 81,3 т/га, F₁ (Низькоросле 81с × Карликове 45) – 78,1 т/га та F₁ (Низькоросле 93с × Красень) – 77,1 т/га. Максимальний вміст розчинних вуглеводів сягав 22,0 %, вихід твердого біопалива – 27,6 т/га, а енергетичний вихід – 485,8 ГДж/га.

Навіть за екстремально посушливих умов окремі гібриди зберігали високі показники формування біомаси та енергетичної продуктивності, що свідчить про їхню екологічну пластичність та адаптивність до стресових факторів середовища.

Отримані результати підтверджують перспективність використання інтегральних біоенергетичних показників як критеріїв добору при створенні нових високопродуктивних і посухостійких гібридів цукрового сорго для умов України.

МЕХАНІЗМИ АДАПТАЦІЇ *CHLAMYDOMONAS REINHARDTII* ДО АБІОТИЧНОГО СТРЕСУ, ІНДУКОВАНОГО НАНОСТРУКТУРОВАНИМ ЦИНКОМ

В. Р. Петльована¹, П. М. Болтовець², С. О. Кравченко²

¹ННЦ «Інститут біології та медицини», Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, Київ, Україна, e-mail: petlovana@knu.ua

²Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, Київ, Україна

Бурхливий розвиток нанотехнологій, що спостерігається протягом останніх десятиріч, зробив актуальним дослідження впливу наночастинок на навколишнє середовище. Наноструктуровані матеріали все активніше використовуються у різних сферах людської діяльності. Це призводить до неконтрольованого надходження їх до природних екосистем і робить наноматеріали одним із факторів, що впливають на живі організми (Kumah et al., 2013). В цьому ракурсі особливу увагу привертають наночастинок на основі оксидів і сульфідів металів, зокрема цинку.

Наноструктуровані матеріали легко проникають в клітини рослин та активно взаємодіють із клітинними структурами завдяки своїм малим розмірам і великій площі поверхні. Також відомо, що наночастинок ZnO виявляють концентраційно залежний вплив на рослини (Ochoa-Chaparro et al., 2026). У низьких концентраціях вони можуть послаблювати дію абіотичних стресових факторів завдяки посиленню антиоксидантного захисту клітини. Натомість високі концентрації здатні спричинити надмірний окиснювальний стрес і пошкодження клітинних структур. Вважається, що за дії низьких концентрацій ZnO активуються механізми антиоксидантного захисту та зменшується накопичення активних форм кисню (ROS). У випадку надлишкового накопичення наночастинок у клітинах, навпаки, відбувається посилене утворення ROS, яке перевищує природну антиоксидантну здатність клітини. Для наночастинок ZnS також було показано, що в оптимальних концентраціях вони можуть підвищувати загальний вміст антиоксидантів і таким чином зменшувати прояви окислювального стресу (Thapa, 2019).

У зв'язку з цим актуальним є дослідження впливу наноструктурованого цинку (наночастинок ZnO та ZnS) на зелені водорості, які є типовим елементом як природних, так і штучних біоценозів, зокрема *Chlamydomonas reinhardtii*, що і стало метою даної роботи. Одним із підходів до оцінки фізіологічної відповіді клітин на дію наночастинок є аналіз змін вмісту фотосинтетичних пігментів, зокрема каротиноїдів та хлорофілу. Зростання концентрації каротиноїдів може свідчити про активацію антиоксидантного захисту клітини у відповідь на дію ROS, тоді як зміни вмісту хлорофілу відображають особливості функціонування фотосинтетичного апарату в умовах стресу.

Найвища концентрація хлорофілу спостерігалась в присутності наночастинок ZnO. Водночас додавання глутатіону до наночастинок ZnO супроводжувалося зменшенням концентрації каротиноїдів порівняно з варіантом, у якому клітини зазнавали впливу наночастинок ZnS. Одночасне збільшення концентрації як каротиноїдів, так і хлорофілу спостерігалось в присутності наночастинок ZnS у поєднанні з глутатіоном.

Отже, у результаті проведених досліджень встановлено відмінності у фізіологічній відповіді *Chlamydomonas reinhardtii* на дію наночастинок ZnO та ZnS. Отримані результати можуть бути використані для подальшого дослідження впливу наноматеріалів на фізіологічний стан мікрободоростей та механізми їх адаптації до абіотичного стресу.

ЛІТЕРАТУРА

- Kumah E.A. et al. *BMC Public Health*. 2023. 23: 1059.
Ochoa-Chaparro E.H. et al. *Plants*. 2026. 15: 147.
Thapa M. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2019. 142: 73-83.

**СТАБІЛЬНІСТЬ ФЕНОТИПІЧНОЇ РЕАКЦІЇ ГЕНОТИПІВ КАРТОПЛІ
НА ФУЗАРІОЗНЕ УРАЖЕННЯ БУЛЬБ ЗА УМОВ ПОВТОРНОГО
ІНОКУЛЯЦІЙНОГО ТЕСТУВАННЯ**

Н. В. Писаренко¹, Н. А. Захарчук², Т. М. Олійник²

¹Поліське дослідне відділення Інституту картоплярства НААН України,
с. Федорівка, Житомирська обл., Україна, e-mail pisarenkonatalia1978@gmail.com

²Інститут картоплярства НААН України, сел. Немішаєве, Київська обл., Україна

Суха фузаріозна гниль, спричинена комплексом видів роду *Fusarium* Lk.: Fr., належить до найбільш шкочинних хвороб картоплі в період зберігання та здатна спричинити суттєві втрати насіннєвого матеріалу і товарної продукції. Ефективність селекційного добору толерантних генотипів значною мірою визначається відтворюваністю фенотипічної реакції між роками оцінювання. За полігенної природи ознаки та вираженої взаємодії «генотип × рік» ($G \times Y$) генотипи можуть демонструвати контрастний рівень реакції в різних циклах тестування. У зв'язку з цим для практичної селекції принципово важливими є не лише величина середнього показника толерантності, а й стабільність його прояву.

Мета роботи – оцінити стабільність фенотипічної реакції генотипів картоплі до фузаріозного ураження бульб у повторних циклах інокуляційного тестування, виявити профілі толерантності та обґрунтувати критерії комплексного добору за поєднання рівня і стабільності прояву ознаки.

Дослідження проведено впродовж 2024–2026 рр. на базі лабораторії селекції і насінництва Поліського дослідного відділення Інституту картоплярства НААН. Оцінено 31 генотип картоплі різних груп стиглості шляхом штучного зараження бульб після зберігання локальною популяцією *Fusarium* spp. із п'ятиразовою повторністю. За повного трирічного циклу оцінено 22 генотипи, які використано для аналізу стабільності. Для кожного генотипу визначали середній рівень фенотипічної реакції (M), коефіцієнт міжрічної варіації (CV), амплітуду мінливості (Δ) та дисперсію стабільності Шукли (σ^2_i). Джерела фенотипічної мінливості оцінювали методом двофакторного дисперсійного аналізу з повтореннями ($N = 325$). Для інтегрального ранжування матеріалу застосовано shrinkage-кориговані середні генотипові оцінки (M^*) та Selection Index. Статистичну обробку виконували із застосуванням пакетів SciPy та Scikit-posthocs.

Двофакторний дисперсійний аналіз підтвердив статистично значимий вплив генотипу ($F = 2,835$; $p < 0,01$; $\eta^2 = 25,9\%$), року оцінювання ($F = 10,603$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 9,2\%$) та їх взаємодії $G \times Y$ ($F = 2,427$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 18,3\%$) на рівень фенотипічної реакції. Внесок $G \times Y$ -взаємодії виявився співставним із впливом генотипу, що підтверджує виражену міжрічну варіабельність реакції та обмежує прогностичну цінність одноразового тестування. Коефіцієнт повторюваності генотипічних середніх ($H^2 = 0,647$) свідчить про помірно високу відтворюваність результатів і підтверджує придатність трирічного циклу оцінювання для фенотипічного добору.

Кореляційний аналіз виявив відсутність достовірного зв'язку між середнім рівнем фенотипічної реакції та стабільністю її прояву: $r(M, \sigma^2_i) = +0,126$ ($p = 0,578$). Це свідчить про відносну незалежність рівня толерантності та міжрічної стабільності її реалізації. На основі поєднання M , CV і σ^2_i виділено чотири профілі фенотипічної реакції: стабільно толерантний ($n = 6$), помірно стабільний ($n = 9$), нестабільний ($n = 5$) та чутливий ($n = 2$). До стабільно толерантного профілю з найвищими значеннями Selection Index належали генотипи – П.15.56-10 ($SI = 6,309$), Партнер (5,505), П.17.38/16 (4,856), П.15.5/27 (4,575), П.13.42/3 (4,568) і П.17.29/21 (4,388). Водночас сорти Мирослава ($M = 6,40$) та Дивина ($M = 6,13$), попри високі середні значення показника, характеризувалися значною міжрічною нестабільністю ($CV = 28,6\text{--}31,7\%$; $\sigma^2_i = 11,84\text{--}11,95$), що знижувало їх селекційний рейтинг за інтегральним індексом.

За показниками CV ($H = 10,23$; $p = 0,006$; $\varepsilon^2 = 0,442$) та Selection Index ($H = 12,22$; $p = 0,002$; $\varepsilon^2 = 0,538$) встановлено достовірні відмінності між групами стиглості: середньоранні генотипи характеризувалися нижчою міжрічною варіабельністю та вищими значеннями інтегрального індексу порівняно з ранньостиглими. Розподіл профілів реакції між групами стиглості також був статистично значимим ($\chi^2 = 13,09$; permutation $p = 0,006$; Cramér's $V = 0,545$): 62,5 % середньоранніх генотипів належали до стабільно толерантного профілю, тоді як серед ранньостиглих такі форми були відсутні. Дескриптивний генеалогічний аналіз вказав на перспективність батьківських форм Вектар і Сантарка як компонентів схрещувань для формування стабільно толерантних рекомбінантів.

Отримані результати показали, що рівень і стабільність фенотипічної реакції картоплі на фузаріозне ураження бульб є відносно незалежними характеристиками генотипу, що зумовлює необхідність їх паралельного врахування при доборі. Генотипи П.15.56-10, Партнер, П.17.38/16, П.15.5/27, П.13.42/3 та П.17.29/21 ідентифіковано як перспективні джерела стабільної толерантності для рекомбінаційної селекції. Комплексний підхід, що поєднує аналіз $G \times Y$ -взаємодії, параметри стабільності та інтегральне ранжування, може бути використаний як методологічна основа фенотипування селекційного матеріалу за ознаками стійкості до патогенів із мінливим інфекційним фоном.

**МІСЦЕВІ ПОПУЛЯЦІЇ УКРАЇНИ – ЦІННИЙ ВИХІДНИЙ МАТЕРІАЛ
В АДАПТИВНІЙ СЕЛЕКЦІЇ ЦИБУЛІ БАГАТОЯРУСНОЇ
(*Allium proliferum* Schrad.)**

О. В. Позняк¹, С. І. Кондратенко²

¹Дослідна станція «Маяк» Інституту овочівництва і багаторічності НААН України,
с. Крути, Чернігівська обл., Україна, e-mail: olp18@meta.ua

²Інститут овочівництва і багаторічності НААН України,
сел. Селекційне, Харківська обл., Україна, e-mail: konf-dsmayak@ukr.net

Проведення системних селекційних досліджень з малопоширеними видами овочевих рослин має на меті вирішення кількох супутніх та взаємопов'язаних завдань: розширення первинних генетичних колекцій та виділення на їх основі цінних джерел господарсько-цінних ознак; створення високопродуктивних сортів з цінним комплексом споживчих властивостей, що характеризуються високим адаптивним потенціалом до змін клімату, придатних для органічних технологій вирощування; стала інтродукція і залучення у селекційний процес нових видів овочевих рослин для їх імпортозаміщення і незалежності від постачання насіннєвого матеріалу з-за кордону (Kondratenko, Pozniak, 2025).

Основою розширення селекційної бази рідкісних і нетрадиційних видів рослин є адаптивна інтродукція, в основі якої – насіннєва репродукція, дія природного і штучного доборів від покоління до покоління для підвищення адаптації рослин і забезпечення формоутворюючих процесів. Інтродукція забезпечує збагачення генетичних ресурсів, її успіх залежить від ступеня акліматизації рослин, що розглядається як процес пристосування живих організмів до комплексу умов середовища, які притаманні новій місцевості (Рябчун та ін., 2014; Рахметов, 2017). Селекція рослин базується на доборі з гетерогенних гібридних популяцій нового перспективного вихідного матеріалу, який постійно оцінюється на всіх етапах свого створення за стабільністю прояву комплексу господарсько-цінних ознак. Оскільки створений вихідний матеріал є генетичною основою нових сортів, при збиранні колекцій нових видів рослин потрібно підбирати зразки різного еколого-географічного походження з якнайширшим поєднанням господарсько-цінних показників та морфолого-ідентифікаційних ознак. Адаптаційна здатність виду є найважливішим показником можливості формування культивного ареалу за межами його природного існування (Клименко, 2012). Багаторічними дослідженнями, проведеними вітчизняними і закордонними селекціонерами, підтверджено, що дієвим шляхом поширення рідкісних, нетрадиційних видів рослин як сільськогосподарських культур є логічне продовження інтродукційного процесу – аналітична і синтетична селекція.

До цінних овочевих рослин належить цибуля багаторічна (*Allium proliferum* Schrad.). За її вирощування і використання можна значно збагатити асортимент вітамінної продукції, зокрема в несезонний період. Сортимент цього виду в Україні не достатній. Так, у Державному реєстрі сортів рослин, придатних для поширення в Україні, до 2026 р. сортів цибулі багаторічної не було. За результатами аналізу встановлено, що заявки на сорти цього виду для реєстрації в Україні не подавалися. Населення в Україні вирощує переважно місцеві популяції. Отже, робота зі створення вітчизняних сортів в сучасних умовах є актуальною, оскільки забезпечує збагачення сортових ресурсів цибулі багаторічної саме вітчизняними розробками.

Особливість багаторічної цибулі – формування замість суцвіття повітряних цибулинок, тому її інколи називають живородною. Цибулилки на стрільці утворюються в декілька ярусів (за належного розвитку рослин і залежно від сортових особливостей їх може бути до 4–5). Багаторічна цибуля – морозо-, зимо- та холодостійка рослина, на одному місці росте до 5 років (при багаторіч-

ній культурі). При цьому щорічно збільшується кількість цибулин у гнізді, а відтак зменшується площа живлення окремих цибулин і рослини в цілому.

З метою створення конкурентоспроможних вітчизняних сортів цибулі багатоярусної проведена селекційна робота з цим видом. Селекція цибулі багатоярусної базувалася на використанні клонового добору з гетерогенних гібридних популяцій нового перспективного вихідного матеріалу, якій постійно оцінювався на всіх етапах свого створення за стабільністю прояву комплексу господарсько-цінних ознак. Оскільки створений вихідний матеріал є генетичною основою нових сортів, при збиранні колекцій нових видів рослин нами підібрані зразки різного еколого-географічного походження з якнайширшим поєднанням господарсько-цінних показників та морфолого-ідентифікаційних ознак.

За результатами проведених досліджень створені два нові сорти цибулі багатоярусної, адаптовані до умов Лісостепу і Полісся України, які за результатами проведення науково-технічної експертизи з метою реєстрації сортів та прав на них внесені до Державного реєстру сортів рослин, придатних для поширення в Україні: сорт Борзенка (Патент на сорт рослини № 260128 від 16.02.2026 р.; Свідоцтво про державну реєстрацію сорту № 260153 від 16.02.2026 р.), сорт Говерла (Патент на сорт рослини № 260129 від 16.02.2026 р.; Свідоцтво про державну реєстрацію сорту № 260154 від 16.02.2026 р.).

Урожайність зеленої маси (за осінньої сівби повітряних цибулинок) у сорту Борзенка становить 23,6 т/га, сорту Говерла – 22,4 т/га. За ранньостиглістю виділений сорт Борзенка: початок збиральної стиглості настає на 27 добу після відростання. У сорту Говерла початок збиральної стиглості відмічали на 34 добу після відростання.

Морфолого-біометричні показники сорту Борзенка. Рослина: за висотою на початку стеблуння – 68,2 см; кількість листків – 8 штук; ширина листка – 2,0 см; псевдостебло: довжина етіольованої частини – 9,4 см; псевдостебло: діаметр етіольованої частини – 2,1 см; стрілка: за довжиною – 95,2 см; стрілка: висота закладання першого ярусу – 74 см; стрілка: кількість ярусів повітряних цибулинок – 2; стрілка: середня кількість повітряних цибулинок у першому ярусі – 21 штука; стрілка: діаметр у найширшому місці – 2,7 см; діаметр цибулинки у першому ярусі – 2,0–2,2 см; діаметр цибулинки у другому ярусі – 0,9 см.

Морфолого-біометричні показники сорту Говерла. Рослина: за висотою на початку стеблуння – 60,0 см; кількість листків – 6 штук; ширина листка – 1,5 см; псевдостебло: довжина етіольованої частини – 9,2 см; псевдостебло: діаметр етіольованої частини – 1,6 см; стрілка: за довжиною – 93,8 см; стрілка: висота закладання першого ярусу – 73 см; стрілка: кількість ярусів повітряних цибулинок – 1; стрілка: середня кількість повітряних цибулинок у першому ярусі – 4 штук; стрілка: діаметр у найширшому місці – 2,9 см; діаметр цибулинки у першому ярусі – 2,8–3,2 см.

Створені сорти цибулі багатоярусної є кокурентоспроможними на вітчизняному ринку і рекомендовані для освоєння в агроформуваннях усіх форм власності та господарювання та у приватному секторі.

Отже, на Дослідній станції «Маяк» Інституту овочівництва і баштанництва НААН за використання як вихідного матеріалу місцевих популяцій створені конкурентоспроможні сорти цибулі багатоярусної Борзенка та Говерла, адаптовані до умов Лісостепу і Полісся України. Нові сорти у 2026 р. внесені до Державного реєстру сортів, придатних для поширення в Україні.

ЛІТЕРАТУРА

- Клименко С.В. *Таврійський науковий вісник*. 2012. 80(2): 330–337.
Рахметов Д.Б. *Адаптація інтродукованих рослин в Україні*: монографія. 2017.
Рябчун В.К., Кузьмишина Н.В., Богуславський Р.Л. та ін. *Генетичні ресурси рослин*. 2014. 14: 6–22.
Kondratenko S., Pozniak O. Chapter «Agricultural sciences». In: *Directions for the development of science in the context of global transformations: Scientific monograph*. Riga, Latvia : Baltija Publishing. 2025. 124–154.

**ФОТОСИНТЕТИЧНИЙ АПАРАТ *SALIX* SP. І *POPULUS* SP. У ЗАПЛАВНИХ
ЕКОСИСТЕМАХ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА ЗА КОНТРАСТНИХ
СЕЗОННИХ УМОВ**

О. В. Поліщук, К. О. Романенко, І. В. Косаківська

*Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України, Київ, Україна
e-mail: mrpolishchuk@gmail.com*

Вступ. Дослідження адаптації рослин до екологічних стресів набуває критичного значення в умовах глобальних кліматичних змін та масштабних антропогенних катастроф. Руйнування греблі Каховської ГЕС у червні 2023 р. спричинило появу унікальних за масштабом техногенних територій, де сформувався рівновіковий піонерний деревостан з домінуванням верби (*Salix* sp.) та тополі (*Populus* sp.). Відсутність вікової диференціації дозволяє розглядати міжвидові та локаційні відмінності як прямий прояв фізіологічної пластичності. Серед фізіологічних процесів фотосинтез посідає особливе місце, оскільки є головним джерелом надходження органічних речовин і енергії, необхідних для життєдіяльності рослинного організму. Фотосинтетичний апарат (ФСА) одним із перших зазнає стресових впливів: зміни у пігментному комплексі, фотосистемах I і II, ланцюгу транспорту електронів здатні знизити фотосинтетичну активність і продуктивність рослини (Ashraf, Harris, 2013). Натомість міжсезонні відмінності цих показників відображають адаптивний потенціал виду. Вміст і співвідношення фотосинтетичних пігментів є інформативними показниками стресової відповіді рослин (Романенко та ін., 2023), а параметри JIP-тесту характеризують функціональний стан ФС II у реальному часі (Stirbet, Govindjee, 2011). Структурні показники листка (SLA), індекси рослинного покриття (LAI, NDVI) та показники газообміну (An) у комплексі відображають адаптивний потенціал рослини на рівнях від листка до угруповання (Flexas et al., 2004; Garnier et al., 2004).

Мета. Оцінити стан фотосинтетичного апарату та визначити морфофізіологічні показники *Salix* sp. і *Populus* sp. на дослідних ділянках заплавних лісових екосистем днища Каховського водосховища за контрастних мікрокліматичних умов весняного і літнього сезонів 2025 р.

Матеріали і методи. Досліджувались рослини родини Salicaceae: *Populus* sp. і *Salix* sp. Відбір рослинного матеріалу проводився під час двох польових виїздів у травні та липні 2025 р. на території Дніпропетровської та Запорізької областей, на п'яти локаціях днища колишнього Каховського водосховища, які охоплювали градієнт від більш зволжених до посушливих умов мікрорельєфу. У кожній локації відбирали зразки найбільших рівновікових дерев у денний час (11:00–17:30), коли фотосинтетична активність є максимальною. Вміст хлорофілів $a+b$ і каротиноїдів визначали спектрофотометрично після ДМСО-екстракції за методом Wellburn (1994). Параметри індукції флуоресценції хлорофілу a (JIP-тест) реєстрували портативним флуориметром G-REP; розраховували Fv/Fm , ψ_o , ϕE_o . Показники газообміну (чиста асиміляція CO_2 , An ; дихання листка, R ; дихання ґрунту, Rs) вимірювали газоаналізатором S-151 (Qubit Systems, Канада). Коефіцієнт питомої площі листка (SLA) обчислювали як відношення площі листових дисків до сухої маси ($cm^2 \cdot g^{-1}$). Індекс листової поверхні (LAI) визначали методом цифрової гар-фотометрії (Leblanc, Fournier, 2017). NDVI отримували *in situ* спектрометром STS-VIS та за даними супутника Sentinel-2. Статистичну обробку виконано в Python 3.10 (pandas, scipy) із застосуванням RDA-аналізу.

Результати та обговорення. Мікрокліматичні умови сезонів були різко контрастними: у травні переважали помірні температури (16–22°C) та вологість ґрунту 18–58 %, тоді як у липні зафіксовано стресові умови (температура 29–36°C, вологість 1–10 %). Пігментний комплекс видів відрізнявся між сезонами. У верби сумарний вміст хлорофілів $a+b$ зростав від 20–58 $mg \cdot cm^{-2}$ у травні до 64–69 $mg \cdot cm^{-2}$ у липні; вміст каротиноїдів — від 5,85–9,35 $mg \cdot cm^{-2}$ у травні до

10,2 мкг·см⁻² у липні. Зростання вмісту каротиноїдів у липні на ділянках із високим тепловим навантаженням свідчить про активацію фотозахисних механізмів. Вміст хлорофілів у верби влітку суттєво перевищував значення для *Salix alba* з бази даних TRY (Kattge et al., 2020), що вказує на активну підтримку асиміляційного апарату. У тополі вміст хлорофілів і каротиноїдів був стабільнішим ($\approx 48,5$ мкг·см⁻² і 8,17 мкг·см⁻² відповідно).

Параметри флуоресценції досліджених рослин у травні відповідали нормі (F_v/F_m 0,82–0,85). У липні виявлено диференційовану відповідь: у верби F_v/F_m знижувався на посушливих ділянках до 0,68–0,76, тоді як на зволжених залишався високим (0,80). У тополі зниження F_v/F_m до 0,75 вказує на помірне пригнічення фотохімічної активності. При цьому значення ψ_o та ϕE_o в обох видів зберігались на рівні 0,33–0,55, що свідчить про підтримання транспорту електронів. Показовим є розрив між збереженням пігментів і пригніченням газообміну в липні: A_n у верби склала лише 0,11–1,65 мкмоль·м⁻²·с⁻¹ через закриття продихів. У тополі валова асиміляція мала від'ємне значення, що вказує на переважання дихання. Збереження електронного транспорту за умови закриття продихів узгоджується з активацією нефотохімічного гасіння як фотозахисту.

SLA у верби знижувався з 88–136 см²·г⁻¹ у травні до 68–107 см²·г⁻¹ у липні, що свідчить про потовщення листків у відповідь на посуху. Емпіричні моделі виявили значущий логарифмічний зв'язок між вмістом хлорофілів і NDVI (*in situ* та Sentinel-2), що дозволяє масштабувати оцінку ФСА методами дистанційного зондування. Позитивна кореляція між NDVI×LAI та R_s свідчить про зв'язок між розвитком листків та карбоновим балансом екосистеми. Загалом верба демонструвала більшу міжсезонну стабільність показників порівняно з тополею.

Висновки. Рівновіковий деревостій Каховського водосховища є ефективною природною моделлю дослідження фізіологічної пластичності. Основними стратегіями адаптації є закриття продихів при збереженні функціональності ФС II, посилення каротиноїдного захисту та структурна перебудова листового апарату (зниження SLA). *Salix* sp. демонструє вищу фізіологічну пластичність порівняно з *Populus* sp., що є ключовим для прогнозування відновлення заплавних екосистем. Отримані регресійні моделі дозволяють масштабувати дані наземних досліджень для дистанційного оцінювання відновлення заплавних екосистем.

ЛІТЕРАТУРА

- Романенко К.О. та ін. *Фізіологія рослин і генетика*. 2023. 55(6): 528–538.
Ashraf M., Harris P.J.C. *Photosynthetica*. 2013. 51: 163–190.
Flexas J. et al. *Plant Biology*. 2004. 6(3): 269–279.
Kattge J. et al. *Glob. Change Biol.* 2020. 26(1): 119–188.
Leblanc S.G., Fournier R.A. *Hemispherical Photography in Forest Science*. 2017. 28: 53–84.
Stirbet A., Govindjee. *J. Photochem. Photobiol. B*. 2011. 104: 236–257.
Wellburn A. R. J. *Plant Physiol.* 1994. 144(3): 307–313.

БУФЕРНІ ВЛАСТИВОСТІ ЛИСТКІВ ПРЕДСТАВНИКІВ ВИДУ *PRUNUS SERRULATA* LINDL. ЗА УМОВ УРБОТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

О. В. Почка, Л. А. Колдар

*Національний дендрологічний парк «Софіївка» НАН України,
Умань, Черкаська обл., Україна, e-mail: lenaprocka11@gmail.com*

В сучасних умовах глобальних екологічних змін та інтенсивного використання природних ресурсів формування екологічно збалансованого міського середовища набуває особливої актуальності. Одним із ефективних способів пристосування міської інфраструктури до кліматичних змін та покращення якості життя населення є збільшення кількості зелених зон, які зменшують ефект «міського теплового острова», поглинають вуглекислий газ, очищують повітря, знижують рівень шуму, стабілізують вологість і сприяють збереженню біорізноманіття. Крім того, наявність зелених зон позитивно впливає на психоемоційний стан населення міста, знижує рівень стресу, покращує якість сну та загальне самопочуття (Kumar et al., 2025; Lu et al., 2023).

Особливої уваги, при цьому, заслуговують представники виду *Prunus serrulata* Lindl. (вишня дрібнопильчата або сакура), які не лише прикрашають міський простір, а й мають значний потенціал у покращенні урбоекологічних умов населених місць. Завдяки своїм еколого-біологічним властивостям сакура здатна ефективно очищувати повітря, поглинати пил і токсичні речовини, а також створювати комфортний мікроклімат у міських умовах. Її цвітіння має значний естетичний і культурний вплив, сприяючи формуванню позитивного іміджу міста та розвитку екотуризму.

Функціонально активним органом рослини, який швидко реагує на несприятливі природні та техногенні фактори довкілля є листок. Інтенсивність внутрішніх змін і пошкоджень листової пластини зумовлена видовими або сортовими особливостями рослин та їх здатністю підтримувати і урівноважувати кислотно-лужний баланс протопласту клітин при безперервному надходженні біогенних та інших хімічних елементів. Щоб протистояти підвищеному хімічному навантаженню, клітини мають буферні системи, які регулюють рН середовища. Відхилення рН від оптимальних значень негативно впливає на обмін речовин та роботу білково-ферментативних комплексів у листках. Тому, за величиною показника буферної ємності протопласту листків можна визначати стійкість рослин до техногенних умов (Hnativ et al., 2009; Mazepa et al., 2000). Мета нашої роботи полягала у з'ясуванні залежності буферної стійкості протопластів представників виду *P. serrulata* (*P. serrulata* 'Kanzan', *P. serrulata* 'Kiku-Shidare', *P. serrulata* 'Acolade') від інтенсивності урботехного навантаження.

Для цього територію міста Умань на якій ростуть представники виду *P. Serrulata*, умовно було поділено на дві зони: чиста (рослини, які ростуть на території дендропарку «Софіївка») та забруднена (вулиці м. Умань зі значним транспортним навантаженням). Відбір зразків рослинного матеріалу проводили з підвітряного боку дерева із середньої частини крони у період завершення повного розвитку асиміляційної системи листка (липень-серпень). Для дослідження буферної здатності представників виду *P. serrulata* було застосоване співвідношення рН протопласту після штучного підкислення (рН') до рН початкового, яке відображало ефективність внутрішнього середовища клітин протистояти зовнішньому підкисленню (Hlibovyt'ska, 2013).

Найбільша буферна стійкість для кожного з досліджуваних сортів спостерігалася у чистій зоні. Проте із підвищенням рівня забруднення повітря буферна стійкість зменшувалась. У забрудненій зоні найвищу буферну стійкість до несприятливих факторів навколишнього середовища мав *P. serrulata* 'Kiku-Shidare' (рН = $4,67 \pm 0,02$; Δ рН = $1,98 \pm 0,03$; рН' = $57,61 \pm 0,03$ %), тоді як найнижчу – *P. serrulata* 'Kanzan' (рН = $5,46 \pm 0,03$; Δ рН = $2,91 \pm 0,01$; рН' = $46,7 \pm 0,07$ %), це свідчить про вищу стійкість *P. serrulata* 'Kiku-Shidare' до загазованості повітря, порівняно із *P. serrulata* 'Kanzan'.

ЛІТЕРАТУРА

- Hlibovyt'ska N.I. *Visnyk KhNU im. V. N. Karazina. Seriiia «Biolohiia»*. 2013. 18:180–185.
Kumar P., Sahani J. et al. *Front. Sustain. Cities*. 2025. 7:1595280. doi: 10.3389/frsc.2025.1595280.
Hnativ P.S., Artemovska D.V. *Lis. akadem. nauk Ukrainy: zb. nauk. prats.* 2009. 7: 98–103.
Lu Y., Sakamoto Ferranti E.J. et al. *Urb. Forest. & Urb. Green*. 2023. 83: 127917.
Mazepa M.H., Hnativ P.S. et al. *Nauk. visnyk NLTU Ukr.* 2000. 10(2): 87–90.

СПІВКУЛЬТИВУВАННЯ ПЕТІТ МУТАНТІВ ДРІЖДЖІВ *SACCHAROMYCES CEREVISIAE* ТА *S. PARADOXUS* З *NICOTIANA TABACUM* ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ РОСЛИННО-ГРИБНИХ ВЗАЄМОДІЙ

О. В. Проніна, Ю. Ю. Римар, Б. В. Моргун

*Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН України, Київ, Україна
e-mail: olpronina@gmail.com*

Взаємодія рослин з грибними клітинами є надзвичайно складним процесом, важливий вплив на результати якого має стан мітохондрій грибною клітини (Johnson, 2025; Eduardo, 2024). Здатність дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* та деяких близькоспоріднених видів до існування при значному пошкодженні мітохондріальної ДНК (петіт мутація) надають можливість вивчення впливу пригнічення мітохондріальної ДНК на інфекційні ознаки грибів, таких як утворення псевдогіфального росту, здатність до утворення складних колоній та біоплівки, флокуляцію клітин та їх інвазію у поживне середовище. Така інформація може бути цінною при вивченні рослинно-грибних взаємодій. При цьому втрата клітинами здатності до дихання внаслідок втрати мтДНК дозволяє змодельовати стан клітин грибів, які були оброблені фунгіцидами, що пригнічують мітохондріальне дихання.

Було проведено співкультивування рослин тютюну *Nicotiana tabacum* сорту Вісконсін з дріжджовими клітинами споріднених видів *S. cerevisiae* та *S. paradoxus*. Для співкультивування використовували диплоїдні прототрофні штами Y55 (*S. cerevisiae*) та Y6.5 *S. paradoxus* та їх петіт мутанти. Останні було виділено завдяки двократній обробці клітин вихідного штаму в рідкому поживному середовищі з додаванням бромистого етидію (10 мкг/мл). Відбір петіт мутантів проводили за втратою здатності до росту на YPG середовищі, яке містило неферментоване джерело карбону гліцерин. Втрату мітохондріального геному визначали за зникненням мітохондріальних нуклеотидів при аналізі пофарбованих DAPI дріжджових клітин за допомогою люмінесцентної мікроскопії (мікроскоп Люмам-4).

Дріжджові культури відновлювали після зберігання та вирощували 2 доби в рідкому повному середовищі YPD, після цього клітини збирали центрифугуванням та відмивали дистильованою водою. Визначали концентрацію клітин та наносили дріжджову культуру смугою на чашку в розрахунку 30 мкл суспензії в концентрації 10^8 кл/мл.

Двотижневі сіянці тютюну, що росли на стерильному половинному середовищі MS, висаджували на таке саме середовище з висіяними дріжджовими клітинами по 4 сіянці на чашку Петрі, при цьому сіянці орієнтували корінцями у напрямку до дріжджових клітин (Fernandez-San Millan, 2020). Використовували по 4 чашки на варіант дріжджової культури, як контроль використовували чашки з додаванням дистилату замість дріжджів. Після 3 тижневого співкультивування сіянці пересаджували в торф'яний ґрунт, після тижневого вирощування оцінювали стан рослин ступінь розвитку над- і підповерхневої частин сіянців.

Виявлено, що на всіх етапах дослідження оптимальним був розвиток рослин без додавання дріжджових клітин, вони відзначалися найкращими розмірами під- та надземної частини рослин, кількістю коренів та їх довжиною, яскраво зеленим кольором листків та їх кількістю. Також ці рослини найкраще витримали пересаджування в ґрунт з поживного середовища та активно розвивалися в подальшому. Рослини, які співкультивували з петіт мутантами обох видів дріжджів, мали ознаки пригнічення росту у порівнянні з контрольними рослинами, відзначалося помітне скорочення кореневої системи та зменшення ступеня її розгалуження, при цьому зменшувалася і надповерхнева частина. Більша частина сіянців витримала пересаджування в ґрунтову суміш, але їх ріст після цього також був сповільненим. Найгіршим був розвиток рослин, які співкультивували з вихідними петіт позитивними клітинами дріжджів. Вони мали найменший розмір порівняно з іншими зразками, відзначалися жовтим листям та повністю загинули після пересадки. Таким чином, петіт мутанти дріжджів мали пригнічувальний вплив на сіянці тютюну, але він був слабшим відносно впливу петіт позитивних вихідних штамів дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* та *S. paradoxus*.

ЛІТЕРАТУРА

- Eduardo J.P. *Pritsch Processes* 2024, 12, 2555.
Johnson Z. *Microorganisms* 2025, 13, 99.
Fernandez-San Millan A. *Microbiological Research* 2020, 237, 126480.

**ОЦІНКА ГЕНЕТИЧНОГО РІЗНОМАНІТТЯ ПРИРОДНИХ ПОПУЛЯЦІЙ
AEGILOPS BIUNCIALIS КРИМСЬКОГО ПІВОСТРОВА ЗА ПОЛІМОРФІЗМОМ
ПЕРШОГО ІНТРОНУ ГЕНІВ β -ТУБУЛІНУ**

**А. М. Рабоконь¹, В. Г. Сахарова¹, Р. Я. Блюм¹, О. І. Созінова^{1,2}, А. В. Карелов¹,
С. І. Співак¹, Н. О. Козуб^{1,2}, Я. В. Пірко¹, Я. Б. Блюм¹**

¹ДУ «Інститут харчової біотехнології та геноміки Національної академії наук України»,
Київ, Україна, e-mail: rabokonnastya@gmail.

²Інститут захисту рослин НААН України, Київ, Україна

Aegilops biuncialis Vis. є диким алотетраплоїдним видом, близькоспорідненим із культурною пшеницею, та одним із найбільш перспективних донорів генетичних детермінант адаптації до несприятливих умов довкілля (Schneider et al., 2010; Kishii et al., 2019; Ivanizs et al., 2019). Цей вид характеризується високим потенціалом стійкості до комплексу абіотичних (посуха, засолення, температурні екстремуми) та біотичних (збудники іржі) стресових факторів, що робить його важливим джерелом алелів для створення нових стресостійких сортів пшениці (Kishii et al., 2019). Ефективне використання такого генетичного ресурсу потребує дослідження внутрішньовидового генетичного різноманіття природних популяцій та оцінки їхньої генетичної структури. Дослідження генетичного різноманіття природних популяцій *Ae. biuncialis* є важливою передумовою збереження алельного фонду, який може бути використаний для створення сортів пшениці з підвищеною адаптивністю до несприятливих умов довкілля.

Популяції *Ae. biuncialis* Кримського півострова сформувалися в умовах значної екологічної неоднорідності, що могло сприяти накопиченню адаптивного генетичного різноманіття, пов'язаного зі стійкістю до різних стресових факторів. Саме тому вони становлять особливий інтерес як потенційне джерело нових алелів адаптивності. Аналіз генетичного поліморфізму таких популяцій дозволяє оцінити їхню генетичну різноманітність і виявити генотипи, що можуть бути перспективними для подальших селекційних досліджень (Rabokon et al., 2017, Farkas et al., 2023).

Метою роботи було оцінити генетичне різноманіття природних популяцій *Ae. biuncialis* Кримського півострова як передумову ідентифікації перспективних донорів генів адаптації та стійкості до абіотичних і біотичних стресів за допомогою оцінки поліморфізму першого інтрону генів β -тубуліну (ТВР-аналіз). Цей підхід раніше успішно застосовувався для розрізнення представників роду *Aegilops* (Rabokon et al., 2017).

У дослідженні використовували зразки *Ae. biuncialis*, зібрані до 2014 р. у різних локалітетах Кримського півострова. Геномну ДНК виділяли за допомогою набору DNeasy Plant Mini Kit (QIAGEN, Німеччина) відповідно до протоколу виробника. Після ПЛР-ампліфікації з використанням праймерів до першого інтрону генів β -тубуліну (ТВР-метод) продукти ампліфікації розділяли в 6 %-му неденатуруючому поліакриламідному гелі. Аналіз електрофоретичних профілів здійснювали за допомогою програм GelAnalyzer та iTOL v7.

За результатами ТВР-аналізу виявлено поліморфізм досліджених зразків, хоча його рівень був відносно невисоким. У більшості випадків електрофоретичні профілі характеризувалися наявністю спільних ампліконів, що свідчить про значну генетичну подібність досліджених генотипів. Водночас однакові фрагменти частіше траплялися у зразків із різних локалітетів, ніж серед рослин однієї популяції, що може бути пов'язано як зі спільним походженням окремих генотипів, так і з можливим генетичним обміном між популяціями. Так, лише у двох зразків був відсутній амплікон довжиною 880 п.н.; вони походили із заповідника Херсонес Та-врійський та околиць с. Берегове. Водночас у деяких випадках простежувався зв'язок між наявністю окремих поліморфних фрагментів і місцем збору зразків. Зокрема, більшість рослин із

селища Утьос характеризувалися наявністю амплікону довжиною 1190 п.н. Виявлені відмінності можуть відображати локальну адаптацію окремих популяцій до специфічних екологічних умов їхнього існування, що робить ці генотипи перспективними для подальших досліджень механізмів стресостійкості.

Таким чином, виявлений поліморфізм підтверджує генетичну неоднорідність природних популяцій *Ae. biuncialis* та свідчить про наявність значного адаптивного потенціалу цього виду. Отримані результати створюють підґрунтя для подальшої ідентифікації генотипів, асоційованих зі стійкістю до абіотичних і біотичних стресових факторів, і можуть бути використані під час пошуку донорів адаптивно цінних алелів для селекції високопродуктивних і стресостійких сортів пшениці в умовах глобальних кліматичних змін.

*Робота виконана в рамках проекту НФДУ 2025.07/0348 «Дослідження та збереження різноманітності українських популяцій *Aegilops biuncialis* як важливого джерела корисних генів для збагачення генофонду пшениці» (2026-2028).*

ЛІТЕРАТУРА

- Schneider A., Molnár I., Molnár-Láng M. *Euphytica*. 2010. 175:357-364.
Rabokon A., Demkovych A., Sozinov A. et al. *Cell Biol. Int.* 2017. 43:1031-1039.
Kishii M. *Front. Plant Sci.* 2019. 10: 585–603.
Ivanizs L., Monostori I., Farkas A. et al. *Front. Plant Sci.* 2019. 10:1531.
Farkas A., Gaál E., Ivanizs L. et al. *Sci. Rep.* 2023. 13: 20499.

**ВПЛИВ ДИХРОМАТУ КАЛІЮ ($K_2Cr_2O_7$) НА *PISUM SATIVUM* L.
У ГІДРОПОННОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

Ю. Р. Ребекевша¹, О. В. Поліщук²

¹ННЦ «Інститут біології та медицини» Київського національного університету
ім. Тараса Шевченка, м. Київ, Україна, e-mail: rebekevshayulia24@gmail.com

²Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України, Київ, Україна

Антропогенне забруднення довкілля важкими металами є однією з актуальних екологічних проблем сучасності. Серед таких забруднювачів – хром, що надходить у навколишнє середовище внаслідок роботи металургійних, хімічних та гірничодобувних підприємств і здатний накопичуватися у ґрунтах і рослинних організмах. За оцінками дослідників, близько 14–17 % світових орних земель містять підвищені концентрації токсичних металів, зокрема хрому (Hou et al., 2025). Форма Cr^{6+} є сильним окисником із високою рухливістю та токсичністю: вона легко проникає в клітини через аніонні транспортери, де відновлюється до нижчих ступенів окиснення з утворенням активних форм кисню та розвитком окиснювального стресу (Ali et al., 2025). Фотосинтетичний апарат є однією з найбільш чутливих до дії важких металів систем, проте механізми його пошкодження хромом залишаються недостатньо вивченими (Sharma et al., 2023).

Мета роботи – дослідити ранні прояви токсичної дії дихромату калію на фотосинтетичний апарат листків *Pisum sativum* за умов помірного стресу в гідропонній культурі.

Рослини гороху посівного вирощували на поживному середовищі Кнопа. Після 10 діб вирощування їх переносили у середовище з $K_2Cr_2O_7$ у концентрації 100 або 500 мкМ на 7 діб (18–23°C, фотоперіод 12 год, 100 мкмоль·м⁻²·с⁻¹). Стан рослин оцінювали за морфологічними показниками (довжина пагонів і коренів, площа хлорозу), вмістом малонового діальдегіду (МДА), кількісним складом фотосинтетичних пігментів та параметрами флуоресценції хлорофілу *a* (РАМ-флуоресценція та ОЛР-тест).

Обробка рослин дихроматом калію спричиняла пригнічення росту пагонів і коренів та розвиток хлорозу листків, вираженість яких залежала від концентрації металу. Підвищення рівня МДА свідчило про посилення пероксидного окиснення ліпідів. Одночасно фіксувалося зниження вмісту хлорофілів *a* і *b*, що може бути пов'язане як з порушенням їх біосинтезу, так і з прискореною деградацією в умовах стресу. Аналіз параметрів флуоресценції хлорофілу *a* виявив зниження ефективності фотохімічних процесів у фотосистемі II, що свідчить про пошкодження електрон-транспортного ланцюга та пригнічення світлових реакцій фотосинтезу. Сукупність отриманих даних вказує на те, що навіть відносно помірні концентрації дихромату (100 мкМ) спричиняють функціональні зміни у фотосинтетичному апараті раніше, ніж з'являються виражені морфологічні ознаки токсичності (Hasanuzzaman et al., 2020).

Таким чином, дихромат калію у гідропонному середовищі спричиняє у рослин *Pisum sativum* комплекс відповідей на стрес: морфологічні зміни, посилення пероксидного окиснення ліпідів і порушення функціонування фотосинтетичного апарату. Отримані результати можуть бути використані для подальшого вивчення механізмів адаптації рослин до токсичного впливу важких металів.

ЛІТЕРАТУРА

- Ali S. et al. *Plants*. 2023. 12(7): 1502.
Hasanuzzaman M. et al. *Antioxidants*. 2020. 9(8): 681.
Hou D. et al. *Science*. 2025. 388(6744): 316–321.
Sharma P. et al. *Environmental Pollution*. 2023. 121049.

ВИКОРИСТАННЯ ШІ У РОСЛИННИЦТВІ: БІБЛІОМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ

Л. І. Реліна, Н. Ю. Єгорова, Д. К. Коломацький, О. О. Фатєєва, О. Г. Наумов

*Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН України, Харків, Україна,
e-mail: lianaskovna@gmail.com*

Сучасна експериментальна біологія рослин переживає цифрову трансформацію, де впровадження інструментів ШІ стає визначальним фактором у переході до методів досліджень нового покоління. В результаті стрімкої конвергенції біологічних наук та цифрових технологій кількість публікацій у сфері рослинництва почала збільшуватись великими темпами, а зростання масиву публікацій потребує систематизації, що робить бібліометричний аналіз незамінним інструментом для оцінки інтелектуального ландшафту галузі. Метою даної роботи була оцінка публікаційної активності у сфері цифровізації експериментальних досліджень рослин.

Пошук і аналіз літератури здійснювали в наукометричній базі Lens.org (<https://www.lens.org/>). Для пошуку в заголовках, ключових словах та резюме використали таку комбінацію ключових слів: (title: (plants OR crops) OR abstract: (plants OR crops) OR keyword: (plants OR crops)) AND (title: ("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning") OR abstract: ("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning") OR keyword: ("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning")) NOT (title: (taxonomy OR floristics OR paleobotany OR archaeobotany OR medicine) OR abstract: (taxonomy OR floristics OR paleobotany OR archaeobotany OR medicine) OR keyword: (taxonomy OR floristics OR paleobotany OR archaeobotany OR medicine)). Ми вирішили зосередитися саме на експериментальній біології рослин, тому виключили з пошуку роботи, пов'язані з виключно систематикою, моніторингом фітоценозів, палеоботанікою, тощо. Також з метою мінімізації «хибнопозитивних знахідок» з галузей знань було виключені всі сфери, що стосуються медицини. В аналіз були включені експериментальні та оглядові статті, випуски журналів, книги та глави книг, матеріали конференцій та дисертації.

Загалом було знайдено 52 602 роботи, опублікованих за період з 1970 р. по 2026 р. Частка конференцій в загальній кількості публікацій сягає 25,2 %. Це незвичайно високий відсоток для розподілу типів публікацій в біологічних науках (Реліна та ін., 2025), що вказує на інтенсивний вплив ІТ-спільноти. У сфері ІТ та ШІ конференції рівня Computer Vision and Pattern Recognition чи International Conference on Computer Vision вважаються престижнішими за багато журналів, а публікація виходить швидше за будь-який журнал. Цикл оновлення нейромереж може становити лише місяці. Вчені поспішають «застовпити» пріоритет на новий метод аналізу даних саме через тези доповідей. Крім того, тема ШІ зараз активно фінансується через стартапи та короткострокові проекти, результатом яких часто є саме виступи на конференціях. При цьому у структурі масиву проаналізованої літератури домінують статті (64,9 %), що свідчить про те, що використання ШІ в рослинництві вже вийшло за межі просто «ідей на конференціях» і стало солідною науковою базою з рецензованими результатами. Середньорічний темп зростання (CAGR) за період 1970–2025 рр. становить 14,5 %. У більшості сучасних сталих наукових галузей CAGR публікацій становить 8–9 % (Bornmann et al., 2014). Показник у 14,5 % — це справжня «аномалія», властива технологіям, що перебувають у стадії вибухового розвитку. На відміну від більшості напрямів наукової діяльності, де зростання публікаційної активності описується експоненціальними моделями (Zhou et al., 2024), динаміка публікаційної діяльності в цьому наборі метаданих найкраще описується поліномом 3-го порядку, про що свідчить високе значення коефіцієнту детермінації (R^2) (рис. 1А). Це пояснюється наявністю чітких «точок перегину» на графіку, які відповідають трьом різним епохам: 1) 1970–1984. Період «зародження» (по 1–8 статей). Тут експонента майже не працює; 2) 1985–2014. Епоха класичного "machine learning". Ріст повільний, лінійний (від 14 до 165 статей); 3) 2015–2025. Епоха "deep learning". Це тут можна побачити класичну експоненту, де графік іде вертикально вгору. CAGR за останні 10 років досяг неймовірно високого значення – 53,8 %. Такі темпи зростання можуть пояснюватися переходом галузі від накопичення теорії до прикладних застосувань інструментів ШІ.

Якщо для аналізу динаміки публікацій використано повний ретроспективний період, то для аналізу цитувань обрано часове вікно з 1992 року. Це дозволило усунути статистичний шум низьких значень ранніх періодів та забезпечити більшу точність апроксимації. Експоненціальна лінія тренду з високим значенням R^2 добре описує те, як зазвичай розвивається науковий інтерес до гарячих тем: спочатку довгий період «накопичення», а потім стрімкий зліт (рис. 1Б). Максимум цитування ми бачимо у статей 2021 р., проте це не означає втрату інтересу до цієї тематики, просто пізніші роботи не встигли набрати цитування, створюючи так званий цитаційний лаг, що є типовим для наукової літератури (Nakamura et al., 2011).

Таким чином, проведений аналіз дозволив виявити часові та регіональні патерни в сфері використання ІІІ в експериментальній біології рослин. Експоненціальне зростання після 2015 р. свідчить про перехід від стадії формування наукового напрямку до етапу стрімкої експансії. З показника цитування можна зробити висновок, що наукова школа США зберігає якісну перевагу. Інституційний ландшафт характеризується високою централізацією в КНР та більш диверсифікованою структурою в США, де ключову роль відіграють університети штатів. Друге місце Baskar Ganapathysubramanian серед авторів за цитуванням при меншій кількості робіт підкреслює його статус трендсеттера галузі. В світлі інтеграції України в світову наукову спільноту критично важливо інтегрувати світовий досвід використання ІІІ у вітчизняні програми.

Реліна Л.І. та ін. *Зернові культури*. 2025. 9(2):313–322.
Bornmann L., Mutz R. *J. Assn. Inf. Sci. Tec.* 2015. 66(11): 2215–2222.
Zhou Z. et al. *Front. Plant Sci.* 2024. 15:1406256.
Nakamura H. et al. *Scientometrics*. 2011. 87(2):221–232.

СОРТИ ОЗИМИХ ЗЛАКІВ, СТІЙКІ ДО ПОСУХИ

О. І. Рибалка^{1,2}, С. С. Поліщук¹, М. В. Червоніс¹

¹Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннєзнавства і сортовивчення,
Одеса, Україна

²Інститут фізіології рослин і генетики НАН України, Київ, Україна

У зв'язку зі змінами клімату та зростанням дефіциту вологи в умовах Півдня України особливої актуальності набуває створення посухостійких сортів зернових культур. До найбільш посухостійких озимих злаків належать тритикале (*×Triticosecale Wittmack*) та ячмінь (*Hordeum vulgare L.*), що зумовлено добре розвинутою кореневою системою, здатною ефективно використовувати вологу з глибоких шарів ґрунту.

Тритикале успадкувало від жита потужну кореневу систему та генетично зумовлену стійкість до посухи. Важливим механізмом адаптації культури до водного стресу є накопичення осмопротекторів, зокрема проліну, який сприяє підтриманню водного балансу клітин і фотосинтетичної активності за умов дефіциту вологи. Завдяки цьому тритикале здатне формувати врожай на малопродуктивних землях, піщаних ґрунтах та в умовах жорсткої посухи, перевищуючи за посухостійкістю більшість сучасних сортів пшениці.

Ячмінь також характеризується високою посухостійкістю завдяки потужній кореневій системі, швидкому проростанню насіння та здатності економно використовувати вологу. Крім того, культура відзначається значною адаптивністю до різноманітних ґрунтово-кліматичних умов, що забезпечує її широке поширення — від високогірних районів до посушливих степових зон.

Селекційну роботу з озимим тритикале розпочато у 1995 році, а з озимим голозерним ячменем — у 2002 році. Вихідний матеріал створювали шляхом міжсорткових схрещувань із подальшим індивідуальним добором перспективних генотипів. Оцінювання селекційного матеріалу проводили за комплексом господарсько цінних ознак, зокрема врожайністю, виповненістю зерна, натурою, масою 1000 зерен, вмістом білка та стійкістю до посухи.

У результаті схрещування сортів пшениці селекції СГІ з сортами жита різного походження було отримано лінію тритикале, яка стала основою для подальшої селекційної роботи. Значного прогресу вдалося досягти після залучення до схрещувань лінії озимого тритикале CCT(5B)5D, отриманої від американського цитогенетика Adam Lukaszewski (University California, Riverside). У цієї лінії відсутня хромосома пшениці 5B, що містить ген *ph* (*pairing homoeology*), який блокує кон'югацію між хромосомами пшениці і жита. Відсутність цього гена індукує обмін між хромосомами пшениці і жита не лише за типом Робертсонівських транслокацій, а й за типом рекомбінації у мейозі. В результаті схрещування лінії Богдан з CCT(5B)5D ми отримали популяцію з надзвичайно багатим морфологічним різноманіттям. У результаті добору з цієї популяції ми отримали серію перспективних селекційних ліній тритикале з практично ідеальним вимолотом колоса, високою посухостійкістю і добре виповненим зерном.

Виділено перспективну лінію тритикале з незвичайним для тритикале білим колосом. Лінія була передана у Держсортвипробування під назвою Альбіна і занесена до Держреєстру у 2021 році. За роки випробувань максимальна врожайність сорту Альбіна становила 107,4 ц/га. У 2021–2025 рр. сорт стабільно перевищував за врожайністю сорт пшениці Адмірал (сестринська лінія сорту Куяльник) на 7,9–21,0 %. Середня натура зерна за п'ять років становила 746 г/л, вміст білка — 9,0 % на неудобреному фоні, а вміст крохмалю досягав 79 %. Вихід абсолютного етанолу з однієї тони зерна становив близько 410 л, що свідчить про перспективність використання сорту в спирто-дистилятному виробництві.

Багаторічні дослідження озимого голозерного ячменю показали переваги дворядного типу колоса над шестирядним за комплексом господарсько цінних ознак. Селекційний матеріал голозерного ячменю з дворядним колосом дає можливість отримати відмінно вирівняне за розмірами зерно, і практично ідеальний вимолот зерна у колосі. Тому всі наші програми з озимим голозерним ячменем орієнтовані виключно на отримання селекційного матеріалу з дворядним колосом. Особливу увагу під час добору приділяли стійкості рослин до вилягання. У результаті реалізації селекційної програми з популяції складного походження Маскара × [(Аламо × Основа) × Артемівський] було виділено перспективну лінію озимого голозерного ячменю, передану у 2025 році на державне сортовипробування під назвою Бен-Гуріон.

Максимальна урожайність цієї лінії становила 96,3 ц/га. Маса 1000 зерен досягала 50 г, кількість зерен у колосі — до 40 шт., натура зерна перевищувала 800 г/л, а вміст білка варіював від 13,2 до 14,1 %. Важливою особливістю лінії була стабільно максимальна оцінка виповненості зерна (5 балів) протягом усіх років випробувань, включаючи посушливі роки, що свідчить про її високу адаптивність до умов водного дефіциту.

Таким чином, у результаті проведеної селекційної роботи створено високопродуктивний посухостійкий сорт озимого тритикале Альбіна та перспективний сорт озимого голозерного ячменю Бен-Гуріон. Отримані генотипи актуалізують питання часткової заміни кукурудзи як основної кормової культури в умовах Півдня України. Відомо, що внаслідок кліматичних змін та зменшення кількості атмосферних опадів ефективність вирощування кукурудзи в степовій зоні України суттєво знизилася. За нашими даними, річна сума опадів становила: у 2021 р. – 475 мм, у 2022 р. – 390 мм, у 2023 р. – 403 мм, у 2024 р. – 401 мм, у 2025 р. – 370 мм. Водночас для формування стабільного врожаю кукурудза потребує не менше 400 мм опадів на рік за умови достатнього вологозабезпечення рослин у критичні фази розвитку – цвітіння, формування та наливу зерна.

За весь період сортовипробування сорти озимого тритикале Альбіна та озимого голозерного ячменю Бен-Гуріон забезпечували стабільно високий рівень урожайності навіть за умов недостатнього зволоження. З огляду на їхню високу продуктивність, посухостійкість та кормову цінність зерна, зазначені сорти можуть розглядатися як перспективна альтернатива кукурудзі для кормового використання в степовій зоні України.

ВНУТРІШНЬОВИДОВІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОДИХОВОГО АПАРАТУ СОРТІВ ПШЕНИЦІ М'ЯКОЇ

Ю. Ю. Римар, О. В. Проніна, В. П. Дуплій, Б. В. Моргун

*Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН України, Київ, Україна,
e-mail: yuryumar@nas.gov.ua*

Пшениця – найважливіша сільськогосподарська культура, яку людина вирощує та споживає у вигляді різних харчових продуктів тисячоліттями. Проте посуха призводить до зменшення врожайності й зниження якості зерна цієї культури. В цьому контексті потрібно звернути увагу на такі листкові структури, як продихи. Продихи – клітинні структури, які відіграють ключову роль у газообміні між рослинним організмом та навколишнім середовищем. Під час транспірації через продихи до рослинних клітин надходить вуглекислий газ, який є необхідним компонентом для фотосинтетичних реакцій. Водночас через продихові щілини випаровується близько 80–90 % вологи від загальних витрат рослини. Зважаючи на це, вивчення морфології продихового апарату є важливим аспектом для ширшого та детальнішого розуміння закономірностей стресостійкості та ефективного використання рослиною вологи.

Метою нашої роботи було вивчити особливості морфології продихового апарату й знайти відмінні фенотипи серед сортів і селекційних ліній пшениці м'якої різного еколого-географічного походження.

Для оцінки продихового апарату озимої м'якої пшениці використовували 17 зразків рослин пшениці (14 сортів і 3 селекційні лінії), які вирізняються еколого-географічним походженням. Рослини вирощували у польових умовах Київської області (селище Глеваха) за традиційною технологією. Зразки відбирали на стадіях від цвітіння до ранньої молочної стиглості зерна (ВВСН-код 59-73). Оцінку продихового апарату проводили методом відбитків із середини адаксіальної та абаксіальної сторони прапорцевого листка. Плівки з відбитками поверхні листової пластини вивчали під світловим мікроскопом Carl Zeiss Jena Amplitval під 100–200-кратним загальним збільшенням з подальшим фотографуванням та обрахунком за допомогою програми ImageJ (Media Cybernetics). Статистичну обробку даних здійснювали за допомогою програми Microsoft Excel 2007, порівняння отриманих даних проводили з використанням коефіцієнта Стюдента (для порівняння двох вибірок) або методом ANOVA з подальшим використанням тесту Тьюкі.

Серед досліджуваних сортів та селекційних ліній рослин пшениці м'якої знайдено достовірні відмінності для всіх вивчених 7 морфологічних ознак продихового апарату, але найбільш контрастні відмінності відзначені за кількістю продихів на одиницю площі й загальною площею продихових щілин на одиницю площі листової пластини. Кількість продихів на одиницю площі на адаксіальній поверхні листової пластини у рослин сорту французької селекції Колонія була найбільшою ($74 \pm 1,26$ шт/мм²), а у північноамериканської селекційної лінії «Короткоостиста» ($45 \pm 1,07$ шт/мм²) – найменшою. На абаксіальній поверхні найбільшу кількість продихів мали листки рослин сортів французької селекції Реформ – $54 \pm 1,69$ шт/мм², Колонія – $54 \pm 0,69$ шт/мм², а найменша кількість була характерна для рослин українського сорту Здоба Київська – $37 \pm 1,9$ шт/мм² й болгарського сорту Дрогана – $40 \pm 1,38$ шт/мм². Крім того, на абаксіальній поверхні листка рослини українського високоврожайного сорту Здоба Київська містилася достовірно менша кількість продихів, ніж у інших досліджуваних сортів української селекції (Богдана, Миронівська 61, Зимоярка, Подолянка). Аналогічна статистична різниця за кількістю продихів спостерігалася й на адаксіальній поверхні листка у порівнянні із сортами Богдана, Миронівська 61 та Подолянка.

Ширина замикальних клітин на адаксіальній поверхні листка у рослин сортів Дрогана та Зимоярка була найбільшою ($4,80 \pm 0,16$ мкм та $4,77 \pm 0,13$ мкм, відповідно). Найменше значення ши-

рини замикальних клітин було притаманне рослинам сорту німецької селекції Етана і становило $3,58 \pm 0,15$ мкм. На абаксіальній поверхні листка рослини селекційної лінії «Короткоостиста» мали найбільше значення ширини замикальних клітин ($5,06 \pm 0,13$ мкм) серед проаналізованих зразків рослин. Рослини австрійського сорту Паннонікус характеризувалися найменшими значеннями ширини замикальних клітин на абаксіальній стороні листка ($3,91 \pm 0,12$ мкм).

Довжина замикальної клітини у рослин французького сорту Колонія була найменшою на обох поверхнях листка (на адаксіальній – $42,34 \pm 0,62$ мкм, на абаксіальній – $40,5 \pm 0,75$ мкм). Найбільша довжина замикальних клітин на адаксіальній поверхні листка була притаманна рослинам Здоба Київська ($52,12 \pm 0,93$ мкм), а на абаксіальній поверхні листка – сорту Дрогана ($52,73 \pm 0,7$ мкм).

За шириною продихової щілини мінімальні значення на обох поверхнях листової пластини є характерним для українського сорту Богдана (на адаксіальній – $2,8 \pm 0,09$ мкм, на абаксіальній – $2,8 \pm 0,13$ мкм). Найбільші значення цієї ознаки на адаксіальній поверхні листової пластини мав сорт Реформ ($4,8 \pm 0,18$ мкм), а на абаксіальній стороні листка найбільшу ширину мали сорти Колонія та Корелі. Довжина продихової щілини варіювала на адаксіальній поверхні листка від $28,42 \pm 0,63$ мкм до $36,56 \pm 0,69$ мкм на абаксіальній поверхні – $28,29 \pm 0,54$ мкм до $35,17 \pm 0,63$ мкм. Мінімальні значення довжини продихової щілини на адаксіальній поверхні характерні для рослин сорту Корелі, а максимальні – для рослин сорту Паннонікус.

Найменша площа продихової щілини на адаксіальній стороні листової поверхні характерна для рослин французького сорту Нордіка ($78,52 \pm 2,8$ мкм²), а найбільша у сорту Реформ ($155,26 \pm 7,52$ мкм²). На абаксіальній поверхні найбільша площа окремої продихової щілини зафіксована у пшениці сорту Корелі ($141,12 \pm 4,3$ мкм²), а найменша у сорту Богдана ($81,53 \pm 4,39$ мкм²). Найбільш цікавим параметром є загальна площа продихових щілин на одиницю площі листової пластини, оскільки він враховує як кількість продихів, так і розмір щілини, які є важливими структурами для фізіологічного функціонування продихового апарату. Загальна площа продихових щілин на одиницю площі адаксіальної поверхні листка у рослин сорту Реформ була найбільшою серед досліджуваних зразків (10247 ± 525 мкм²), а у пшениці селекційної лінії «Остиста, короткостеблова» мала найменші значення (4184 ± 217 мкм²). На абаксіальній поверхні найменша загальна площа щілин спостерігалася у рослин сорту Богдана (3587 ± 209 мкм²), а максимальне значення - у сорту Реформ (6436 ± 257 мкм²).

У підсумку, контрастними фенотипами за характеристикою продихового апарату серед проаналізованих зразків пшениці м'якої є сорти Колонія, Реформ, Здоба Київська і селекційні лінії «Короткоостиста» та «Остиста, короткостеблова». Знайдені морфологічно відмінні фенотипи за параметрами продихового апарату є цінним дослідним матеріалом для поглибленого молекулярно-генетичного вивчення біогенезу продихів пшениці.

Автори висловлюють вдячність Інституту фізіології рослин і генетики НАН України за наданий рослинний матеріал.

Робота фінансувалася в рамках тематики Національної академії наук України, номер держреєстрації 0125U001842.

**РЕГУЛЯЦІЯ ПІГМЕНТНОГО КОМПЛЕКСУ ПШЕНИЦІ ЗА ДІЇ СВИНЦЕВОГО
ЗАБРУДНЕННЯ ШЛЯХОМ ПРАЙМУВАННЯ ЗЕРНІВОК САЛІЦИЛОВОЮ
КИСЛОТОЮ ТА АЦИЛГОМОСЕРИНЛАКТОНОМ**

К. О. Романенко, Л. В. Войтенко, Л. М. Бабенко, І. В. Косаківська

*Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України, Київ, Україна,
e-mail: katernaromanenko4@gmail.com*

Вступ. Забруднення ґрунтів важкими металами є одним із антропогенних чинників, що суттєво обмежує продуктивність сільськогосподарських культур. Свинець (Pb) легко накопичується у рослинних тканинах, пригнічує синтез фотосинтетичних пігментів, порушує роботу фотосинтетичного апарату та індукує окиснювальний стрес (Kosakivska et al., 2025). Праймування зернівок природними регуляторами росту дозволяє активувати захисні реакції рослини до початку дії стресового чинника (Moshynets et al., 2019; Щербатюк та ін., 2026). Саліцилова кислота (СК), фітогормон стресових відповідей рослин, модулює захисні системи, регулює поглинання та транспорт елементів і підтримує процеси росту і розвитку за дії важких металів (Щербатюк та ін., 2026). Ацилгомосеринлактони (АГЛ) є молекулами-медіаторами бактеріального походження, що беруть участь у передачі сигналів між бактеріями фітосфери та рослиною-господарем. АГЛ стимулюють ріст рослин, впливають на архітектуру кореневої системи, підвищують стійкість до патогенів та покращують фотосинтетичну активність (Shrestha et al., 2020). Зокрема, N-гексаноїл-L-гомосеринлактон (С₆-ГГЛ) при передпосівному праймуванні озимої пшениці позитивно впливав на схожість, розвиток проростків та врожайність (Moshynets et al., 2019). Показано, що С₆-ГГЛ пом'якшує негативний вплив кислотних дощів на пшеницю через зміни морфологічних та функціональних характеристик листового апарату (Babenko et al., 2024), однак роль АГЛ-праймування у підвищенні толерантності рослин саме до важких металів залишається недостатньо вивченою.

Мета. Оцінити вплив праймування зернівок розчинами СК та С₆-ГГЛ на пігментний комплекс 14-добових рослин *Triticum aestivum* L. сорту Подолянка за дії різних концентрацій свинцю.

Матеріали і методи. Об'єктом дослідження були рослини пшениці м'якої (*Triticum aestivum* L.) сорту Подолянка. Зернівки стерилізували у 70 % розчині етилового спирту, промивали дистильованою водою та замочували на 3 год за температури +22°C.

Праймування проводили трьома способами: водою (контроль), розчином саліцилової кислоти (СК, 10⁻⁵ М) або N-гексаноїл-L-гомосеринлактону (С₆-ГГЛ, 100 мкМ) впродовж 21 год. Після пророщування у темряві проростки переносили у пластикові посудини з модифікованим розчином Кнопа. У варіантах із важким металом до живильного розчину додавали Pb(NO₃)₂ до кінцевих концентрацій Pb²⁺ 0,05 і 0,5 мМ. Рослини вирощували 14 діб у вегетаційній камері: температура 22°C, освітленість 190 мкмоль/(м²·с), фотоперіод 16/8 год, вологість 70 ± 5 %. Вміст хлорофілів *a*, *b* та каротиноїдів визначали спектрофотометрично у ДМСО-екстрактах за методом Wellburn (1994) у розрахунку на сиру масу листя. Досліди проводили у трьох біологічних і трьох аналітичних повторях. Результати опрацьовували у Microsoft Excel: розраховували середні значення та стандартні відхилення, достовірність різниці між варіантами оцінювали за t-критерієм Стюдента ($p \leq 0,05$).

Результати та обговорення. За низької концентрації Pb (0,05 мМ) у непраймованих рослин вміст хлорофілу *a* зростав на 17 %, хлорофілу *b* — на 20 %, каротиноїдів — на 21 % порівняно з контролем; сумарний вміст хлорофілів збільшувався за незмінного співвідношення *a/b*. Праймування додатково посилювало цю відповідь: у варіантах СК+Pb і С₆-ГГЛ+Pb сума хлорофілів перевищувала контроль на 26 % і 16 % відповідно, а співвідношення *a/b* зростало. За високої концентрації Pb (0,5 мМ) картина змінювалася на протилежну: вміст хлорофілу *a* зменшувався на 28 %, хлорофілу *b* — на 15 %, каротиноїдів — на 12 %, а співвідношення *a/b* зменшувалося на 10 % порівняно з контролем.

хлорофілу *b* — на 21 %, каротиноїдів — на 29 %, співвідношення *a/b* знижувалося, що вказує на деградацію хлорофілу *a* та дестабілізацію світлозбиральних комплексів. У праймованих рослин ці зміни були менш вираженими: у варіанті СК+Pb сума хлорофілів знижувалася лише на 5 % відносно контролю, у C₆-ГГЛ+Pb — на 14 %, тоді як у непраймованих рослин — на 26 %. СК та C₆-ГГЛ без свинцю не змінювали вміст пігментів порівняно з контролем, що свідчить про відсутність негативного впливу цих сполук на пігментний комплекс.

Збільшення вмісту пігментів за низької концентрації свинцю узгоджується з концепцією гормезису — явища, при якому низькі дози стресового чинника стимулюють фізіологічні процеси, тоді як високі пригнічують їх. Стимуляція синтезу хлорофілів низькими дозами важких металів показана для інших видів рослин (Agathokleous et al., 2020). Так, низькі концентрації Pb стимулюють фотосинтетичні показники завдяки помірній активації протекторних систем, а за вищих доз цей ефект змінюється на інгібуючий (Małkowski et al., 2020). СК-праймування додатково підсилювало відповідь на слабе свинцеве навантаження, що може свідчити про взаємодію СК-опосередкованих сигнальних шляхів із механізмами адаптації до слабого стресу, спричиненого дією важкого металу. Захисна дія СК при токсичній концентрації Pb узгоджується з даними про її здатність підтримувати вміст хлорофілів у злакових за дії важких металів через активацію антиоксидантних систем (Colak et al., 2025). Захисну дію C₆-ГГЛ щодо фотосинтетичного апарату пшениці за свинцевого стресу показано вперше; ймовірний механізм пов'язаний зі здатністю АГЛ активувати ферменти антиоксидантного захисту та підвищувати стійкість клітин до окиснювального пошкодження.

Висновки. Свинець спричиняє дозозалежні зміни пігментного комплексу рослин пшениці: низька концентрація (0,05 мМ) стимулює накопичення хлорофілів і каротиноїдів за механізмом гормезису, висока (0,5 мМ) призводить до деградації пігментів і порушення організації фотосистем. Адаптивна відповідь фотосинтетичного апарату залежить не лише від концентрації металу, а й від попереднього праймування: за слабого стресу воно посилює стимулюючий ефект, за токсичного забезпечує збереження пігментного комплексу. СК виявилася ефективнішим протектором порівняно з C₆-ГГЛ, проте обидві сполуки підвищують стійкість фотосинтетичного апарату пшениці до свинцевого стресу, що підтверджує перспективність їх застосування для праймінгу при вирощуванні рослин у забруднених важкими металами умовах.

ЛІТЕРАТУРА

- Щербатюк М. та ін. 2026. *Фізіол. росл. генет.* 58(2): 95–116.
Agathokleous E. et al. 2020. *Trends Plant Sci.* 25(11): 1076–1086.
Babenko L. et al. 2024. *Appl. Soil Ecol.* 193: 105151.
Colak N. et al. 2025. *Plant Biol.* 27: 79–91.
Kosakivska I.V. et al. 2025. *Cereal Res. Commun.* 53(4): 2063–2075.
Małkowski E. et al. 2020. *Int. J. Mol. Sci.* 21: 2099.
Moshynets O. et al. 2019. *PLoS ONE* 14(2): e0209460.
Shrestha A. et al. 2020. *Front. Microbiol.* 11: 1545.
Wellburn A.R. 1994. *J. Plant Physiol.* 144: 307–313.

**NOSTOC COMMUNE ЯК ОСНОВА БІОПРЕПАРАТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ
СТРЕСОСТІЙКОСТІ ЗЛАКІВ ПРИ ФІТОРЕКУЛЬТИВАЦІЇ ТЕХНОГЕННИХ
СУБСТРАТІВ**

П. О. Романенко¹, О. А. Футорна^{2,3}, К. О. Романенко²

¹Таврійський державний агротехнологічний університет ім. Дмитра Моторного,
Запоріжжя, Україна

²Навчально-науковий інститут високих технологій
Київського національного університету ім. Тараса Шевченка, Київ, Україна

³Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України, Київ, Україна
e-mail: katernaromanenko4@gmail.com

Вступ. Хвостосховища гірничодобувних підприємств є масштабними джерелами техногенного забруднення довкілля. В Україні значна частина успадкованих з радянських часів хвостосховищ розташована поблизу населених пунктів і характеризується високим вмістом важких металів, а після 2022 року додатковим чинником ризику стали воєнні дії на промислових територіях. Відкриті поверхні таких об'єктів під дією вітру генерують значну кількість пилу, що забруднює атмосферне повітря, шкодить здоров'ю населення та знижує продуктивність прилеглих сільськогосподарських угідь. Одним із найефективніших методів закріплення поверхні хвостосховищ і запобігання пиловим викидам є фіторекультивация із залученням злакових культур, здатних до швидкого формування розгалуженої мичкуватої кореневої системи. Проте умови хвостосховищ є стресовими для рослин через дефіцит поживних речовин, несприятливий гідрологічний режим, високу щільність субстрату та присутність токсичних елементів, що значно ускладнює проростання і укорінення рослин, пригнічує їхній ріст в процесі онтогенезу.

Ґрунтові азотфіксувальні ціанобактерії позитивно впливають на життєдіяльність вищих рослин на всіх стадіях розвитку та підвищують їхню стійкість до абіотичних і біотичних факторів (Roque et al., 2023). Вони здатні фіксувати атмосферний азот, підвищувати доступність поживних речовин, покращувати структуру субстрату, утримувати воду, а також стимулювати ріст рослин через вивільнення біологічно активних сполук — амінокислот, вітамінів, вуглеводів та фітогормонів (Santini et al., 2021). Завдяки цьому ціанобактерії активно використовуються у сільському господарстві та біоремедіації (Garlapati et al., 2019). Використання біопрепаратів на їхній основі для підвищення стресостійкості рослин при фіторекультивации хвостосховищ є новим і перспективним підходом.

Мета. Дослідити вплив біопрепаратів на основі *Nostoc commune* на посівні якості насіння, ростові процеси та стан фотосинтетичного апарату жита (*Secale cereale* L.) та сорго (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) при вирощуванні на залізорудному шламі.

Матеріали і методи. Дослідження проводили з двома біопрепаратами виробництва ТОВ «Носток технологі» (Київ): Nostoc-M (рідке поживне середовище після культивування *N. commune*, насичене продуктами життєдіяльності ціанобактерій) у чотирьох концентраціях (25 %, 50 %, 75 %, 100 %) та Nostoc-L (жива біомаса *N. commune* без розведення). Залізорудний шлам відбирали з хвостосховища Полтавського ГЗК (м. Горішні Плавні); субстрат містив 66,7 % SiO₂ та 19,4 % Fe при критичному дефіциті біофільних елементів і відсутності гумусу. Посівні якості насіння (енергію проростання, лабораторну схожість, дружність і швидкість проростання) оцінювали відповідно до ДСТУ 4138:2002 (n = 100). Морфометричні показники та вміст фотосинтетичних пігментів визначали у 14-добових проростків, вирощених у контейнерах на шламі (n = 30 рослин; пігменти — n = 6). Вміст хлорофілів *a*, *b* та каротиноїдів визначали спектрофотометрично у ДМСО-екстрактах за методом Wellburn (1994) у розрахунку на сиру масу листків. Статистичний аналіз включав однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA) з post-hoc тестом Тьюкі (P ≤ 0,05) та розрахунок величини ефекту η² (Cohen, 1988).

Результати та обговорення. Встановлено, що ефективність біопрепаратів суттєво відрізнялася залежно від умов вирощування, що свідчить про відмінності у характері їхньої дії на рослини. За оптимальних умов проростання (чашки Петрі) 25 % розчин Nostoc-M виявив найвищу стиму-

люючи активність: енергія проростання та лабораторна схожість сорго зросли більш ніж в 1,6 рази, дружність проростання — на 40 % порівняно з контролем. У жита ефект був менш вираженим, що пояснюється його вищою базовою енергією проростання. 50 % концентрація препарату пригнічувала проростання (енергія проростання знизилася на 6 % у жита та на 19 % у сорго), а концентрації 75 % та 100 % не виявляли статистично значущого ефекту. Nostoc-L у цих умовах виявив нейтральну дію на всі показники посівних якостей.

В умовах стресового шламового субстрату спостерігали протилежну картину. Nostoc-M не забезпечував покращення ростових показників жита та сорго. Усі морфометричні параметри залишалися на рівні контролю або були дещо нижчими. Натомість Nostoc-L суттєво стимулював розвиток обох культур. Найвиразніший ефект зафіксовано для кореневої системи: довжина кореня збільшилася у 1,9 рази у жита та у 3,3 рази у сорго, суха маса коренів — у 1,5 та 4,2 рази відповідно порівняно з контролем. Довжина надземної частини зросла на 19 % у жита та на 18 % у сорго, а суха маса пагонів сорго — на 61 %. Значення η^2 для довжини кореня становили 0,708 у жита та 0,899 у сорго, що відповідає великому ефекту чинника передпосівної обробки на розвиток кореневої системи.

Характерною особливістю відповіді на Nostoc-L стала адаптивна зміна розподілу біомаси між органами. Співвідношення пагін/корінь знизилося з 2,96 до 1,87 у жита та з 3,76 до 1,35 у сорго, а частка кореня у загальній довжині рослини зросла з 25 % до 35 % у жита та з 21 % до 43 % у сорго. Такі зміни свідчать про активний розвиток кореневої системи, що є адаптивною стратегією, яка забезпечує ефективніше поглинання води та мінеральних елементів у збідненому на поживні речовини шламовому субстраті. Інтенсивний розвиток мичкуватої кореневої системи злаків на ранніх етапах онтогенезу має важливе прикладне значення: він забезпечує механічну стабілізацію дрібнодисперсних часток шламу та закріплення поверхні хвостосховища. Nostoc-L також стимулював фотосинтетичний апарат обох культур, хоча ступінь відповіді був видоспецифічним. У проростків жита вміст хлорофілу *a* збільшився на 53%, хлорофілу *b* — на 38 %, каротиноїдів — на 26 %. У сорго приріст пігментів був меншим: хлорофіл *a* збільшився на 19 %, хлорофіл *b* — на 6 %, каротиноїди — на 11 %. Сума хлорофілів (*a+b*) зросла на 49 % у жита та на 16 % у сорго; при цьому значення η^2 становили 0,793 та 0,218 відповідно, що в обох випадках відповідає рівню великого ефекту чинника праймування, проте вказує на значно вищу чутливість фотосинтетичного апарату жита до праймування. Підвищення вмісту хлорофілів може свідчити про адаптивну відповідь на дефіцит поживних речовин у шлам: посилення біосинтезу пігментів забезпечує ефективніше поглинання світлової енергії в умовах стресу. Зміна співвідношення *a/b* (зростання на 10 % у жита та на 13 % у сорго за дії Nostoc-L) вказує на перебудову пігментного комплексу фотосистем зі збільшенням частки хлорофілу *a*.

Стимулюючий ефект живої біомаси Nostoc-L в умовах стресу пояснюється її здатністю активно функціонувати в субстраті: фіксувати атмосферний азот (дефіцитом якого характеризуються шлами), продукувати ауксини безпосередньо в ризосфері у відповідь на стресові сигнали, синтезувати екзополісахариди, що покращують структуру субстрату та утримання вологи, а також зв'язувати важкі метали (Garlapati et al., 2019; Santini et al., 2021). Натомість Nostoc-M є рідким поживним середовищем, що містить продукти метаболізму ціанобактерії — фітогормони, амінокислоти та вітаміни, які ефективно активують проростання насіння за оптимальних умов. Однак за множинного техногенного стресу цих метаболітів виявляється недостатньо для компенсації несприятливих властивостей шламу як субстрату.

Висновки. Біопрепарат Nostoc-L на основі живої біомаси *N. commune* виявив високу ефективність як стимулятор росту жита та сорго на залізорудному шламі, забезпечуючи потужний розвиток кореневої системи та підвищення вмісту фотосинтетичних пігментів. Отримані результати підтверджують перспективність його використання як екологічно безпечного методу підвищення стресостійкості злаків при фіторекультивациі хвостосховищ і запобіганні вітровій ерозії техногенних ландшафтів.

ЛІТЕРАТУРА

- Cohen J. (1988). Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. Routledge.
Garlapati et al. (2019). *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 103: 4709–4721.
Roque et al. (2023). *Plant Soil*, 493: 115–136.
Santini et al. (2021). *Plants*, 10(4): 643.
Wellburn A.R. (1994). *J. Plant Physiol.*, 144(3): 307–313.

ФОРМУВАННЯ КОЛЕКЦІЇ ОЗИМОЇ М'ЯКОЇ ПШЕНИЦІ ЗА СТІЙКІСТЮ ДО ЗНЕВОДНЕННЯ НА СТАДІЇ ПРОРОСТАННЯ ЗЕРНІВОК

Н. І. Рябчун, В. В. Поздняков, О. В. Анциферова

*Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН України, Харків, Україна,
e-mail: zima012012@gmail.com*

Підвищення середньорічної температури повітря та зниження кількості опадів в останні десятиріччя, що призводить до аридизації клімату як у світі, так і в Україні, зокрема в осінній період (Tadesse, 2019; Polevoy, 2024; Vozhehova, 2026), ставить перед дослідниками вимогу виявити та створити генофонд озимих колосових культур з високим рівнем адаптації до осмотичного стресу в період проростання насіння (Kolupaev et al., 2023). Одним із критичних чинників, що обмежують ріст, розвиток, загартування рослин і, в результаті, продуктивність озимої пшениці є дефіцит вологи в ґрунті на початкових етапах онтогенезу (Nykytiuk et al., 2025), оскільки в період утворення проростків формуються основні механізми пристосування до осмотичного стресу та закладається основа всіх майбутніх складових урожайності. Різні сорти індивідуально реагують на вплив водного дефіциту на цьому етапі розвитку, тому важливо проводити скринінг широкого спектра сучасних сортів шляхом оцінки виживаності проростків та їх ростової активності за умов водного дефіциту. Ефективне оцінювання сортового різноманіття дає можливість виділити пластичні форми, які слугуватимуть складовою частиною ознакової колекції та джерелами високої посухостійкості для використання в селекційному процесі.

Метою роботи було встановити особливості диференціації зразків генофонду озимої м'якої пшениці за стійкістю до дефіциту вологи в період проростання насіння, виявити сорти-еталони рівнів стійкості та сформувати колекцію сортів за стійкістю до зневоднення. Для оцінки стійкості зернівки пророщували на 14 % розчині ПЕГ 6000.

Для формування ознакової колекції озимої м'якої пшениці за витривалістю до дефіциту вологи встановлено стійкість 72 сортів пшениці у фазі проростків. Диференціація генофонду за ознакою стійкості до дефіциту вологи у фазі проростків проявилась в широкому діапазоні, зокрема за відсотком пророслого насіння на розчині ПЕГ6000 відносно контролю – від 22,8 % у сорту Августіна до 77,2 % у сорту Антонівка. Найвищий рівень виживаності проростків встановлено у сортів Антонівка (77,2 %), Tobak (76,1 %), Запашна (75,9 %), Досконалість одеська (74,8 %), Мелашка (74,4 %), Альянс (74,1 %), Проня (73,7 %), Зелений гай (72,0 %). Сортом-еталоном високого рівня прояву цієї ознаки (7 балів) визначено сорт Tobak (76,1 %), вище від середнього рівня (6 балів) – Здобна (68,0 %), середнього (5 балів) – Землероб (51,0 %), нижче від середнього (4 бали) – Aliot (42,4 %), низького (3 бали) – Altigo (32,3 %), дуже низького (1 бал) – Либідь (20,5 %).

Важливою характеристикою стійкості сортів, залучених до колекції, є активність росту проростків та його складових (паростків і первинних коренів) за морфометричними та гравіметричними показниками. Сортами-еталонами різних рівнів прояву активності росту паростків у довжину встановлено: дуже високий рівень (8 балів) – Антонівка, високий (7 балів) – Tobak, вищесередній (6 балів) – Подолянка, середній (5 балів) – Altigo, слабкий (3 бали) – Августіна. До групи з дуже високим рівнем стійкості (8 балів) віднесено також сорти Мелашка, Запашна, Альянс, Мальованка, Проня, Здобна, Антонівка, Манера одеська, Досконалість одеська, Українка одеська та ін. Сортами-еталонами різних рівнів прояву активності росту первинних коренів у довжину встановлено: дуже високий рівень (8 балів) – Tobak, високий (7 балів) – Антонівка, вищесередній (6 балів) – Подолянка, середній (5 балів) – Августіна, слабкий (3 бали) – Altigo. До групи з дуже високим рівнем стійкості за ознакою активності росту первинних коренів у довжину (8 балів) віднесено со-

рти та лінії Українка одеська, лінія ЛЗ-430-21, Мелашка, Бунчук, лінія ЕР 1698-23, Приваблива, Альянс, Вигадка.

Формування високої маси пагонів та первинної кореневої системи в умовах зневоднення свідчить про активне накопичення метаболітів в проростках, що забезпечує кращі передумови для отримання сходів озимої пшениці в посушливих умовах. До колекції включено сорти-еталони рівнів формування маси пагонів у відсотках до контролю (пророщування на дистильованій воді): дуже високий рівень (8 балів) – Манера одеська (73,3 %), високий (7 балів) – Подолянка (65,9 %), вищий від середнього (6 балів) – NE 10507 (58,3 %), середній (5 балів) – Мусій (49,5 %), слабкий (3 бали) – Altigo (40,1 %). Дуже високу стійкість (8 балів) мали сорти Манера одеська (73,3 %), Tobak (72,9 %), Альянс (72,7 %), Запашна (72,3 %), Мальованка (71,8 %), Катруся одеська (71,5 %), Мелашка (71,4 %). Сортами-еталонами активності формування маси первинних коренів встановлено: дуже високий рівень (8 балів) – Запашна (72,3 %), високий (7 балів) – Антонівка (70,2 %), вищесередній (6 балів) – Malibu (59,7 %), середній (5 балів) – Августіна (49,2 %), слабкий (3 бали) – Altigo (38,4 %).

Виявлено сорти, які поєднують високу стійкість до дефіциту вологи у ювенільному періоді розвитку за кількома показниками: виживаністю проростків, активністю росту паростків, масою паростків та масою кореневої системи – Запашна, Мальованка, Проня, Манера одеська, Катруся одеська; виживаністю проростків, активністю росту паростків та масою паростків – Мелашка, Альянс; виживаністю, масою паростків та кореневої системи – Tobak; за довжиною та масою всіх частин проростків – Здобна; за виживаністю, активністю росту всіх частин проростків та масою кореневої системи – Українка одеська.

Варіативність масиву даних за показниками була в межах від 19,5 % за ознакою «маса пагонів у відсотках до контролю» до 24,3 % за ознакою «виживаність проростків у відсотках до контролю», що свідчить про їх помірну однорідність. Найбільш тісна кореляція спостерігається між ознаками «маса паростків» та «маса кореневої системи», коефіцієнт кореляції (r) дорівнює 0,954, дещо нижчий рівень кореляції між виживаністю проростків та активністю росту кореневої системи, $r = 0,723$.

Таким чином, сформовано ознакову колекцію озимої м'якої пшениці за стійкістю до зневоднення, яка включає 72 зразки, у тому числі 64 сорти і 8 ліній, та відображає генетичне різноманіття за 14 ознаками. Залучені до колекції генотипи походять з 14 країн Європи, Америки та Азії. Виявлено сорти, які поєднують високу стійкість до дефіциту вологи у ювенільному періоді розвитку за кількома показниками: за виживаністю проростків, активністю росту пагонів, масою пагонів та масою кореневої системи – Запашна, Мальованка, Проня, Манера одеська, Катруся одеська; за виживаністю проростків, активністю росту пагонів та їх масою – Мелашка, Альянс; за виживаністю, масою пагонів та кореневої системи – Tobak; за довжиною та масою всіх частин проростків – Здобна; за виживаністю, активністю росту всіх частин проростків та масою кореневої системи – Українка одеська. Встановлено нові сорти-еталони за ознакою стійкості до дефіциту вологи у фазі проростків, які включені до складу ознакової колекції. Генотипи з дуже високим та високим рівнем прояву вивчених ознак є джерелами високої стійкості до дефіциту вологи в ґрунті на стадії проростання насіння. Вони рекомендовані для залучення в селекційний процес зі створення посухостійких сортів.

ЛІТЕРАТУРА

- Polevoy A. *J. Ec. Eng.* 2024. 25(6): 194-205.
Vozhehova R.V. *J. Ec. Eng.* 2026. 27(3):112-124.
Tadesse W. *Cr. Br.* 2019.1:e190005.
Kolupaev Yu.E. et al. *Agricult. & Forest.* 2023. 69(2):83-99.
Nykytiuk Yu. *Sci. Hor.* 2025. 28(11):20-27.

**ГЕНЕТИЧНЕ РІЗНОМАНІТТЯ ВАСИЛЬКІВ СПРАВЖНІХ
OCIMUM BASILICUM L. В КОЛЕКЦІЇ УСТИМІВСЬКОЇ ДОСЛІДНОЇ
СТАНЦІЇ РОСЛИННИЦТВА**

О. С. Силенко

*Устимівська дослідна станція рослинництва Інституту рослинництва ім. В.Я. Юр'єва
НААН України, с. Устимівка, Полтавська обл., Україна, e-mail udsr@ukr.net*

Одна з маловивчених культур – васильки справжні або базилік звичайний, яка широко використовуються у більшості країн світу, набуває популярності в Україні. Васильки справжні мають багато сфер застосування завдяки своєму унікальному хімічному складу та цінним властивостям.

В Устимівській дослідній станції рослинництва у 2005 році створено колекцію васильків справжніх, яка на даний час налічує 15 зразків різного екологічно-географічного походження (з України, Грузії, Азербайджану, Німеччини, Іраку, Португалії, Росії).

Зразки представлено видом *Ocimum basilicum* L. (форми без антоціану – 12 зразків, фіолетові форми – 3 зразки). За біологічним статусом колекцію розподілено на селекційні сорти – 6 зразків, із них 4 походженням з України, сорти та форми народної селекції – 8 зразків, між них 3 з України, одна селекційна лінія іноземної селекції.

У 2024–2025 рр. в колекційному розсаднику проведено вивчення зразків васильків справжніх, які оцінено за наступними параметрами: фенологічні спостереження за термінами проходження фаз вегетації рослинами, біометричні вимірювання, визначення динаміки урожайності зеленої маси, виходу стандартної продукції, зразки оцінено згідно з методиками дослідної справи в овочівництві та баштанництві. Опис колекційних зразків проводився за "Методикою проведення експертизи сортів рослин картоплі та груп овочевих, баштанних, пряно-смакових на придатність до поширення в Україні".

Досліджувані зразки згруповано за тривалістю міжфазних періодів. Васильки справжні – тепло- і світлолюбива рослина, насіння проростає за температури 15–20°C, сходи з'являються на 7–14 добу, зразки оцінено в порівнянні з сортом-стандартом UG8500018 Рутан (UKR).

Період розвитку рослин тривав у середньому: від посіву до масових сходів 7–10 діб. Коротким (7 діб) цей період був у зразків: UG8500014, UG8500079, UG8500018 Рутан (UKR); UG8500009, UG8500011 (GEO); UG8500010 (AZE); UG8500002 (DEU). Найдовше (10 діб) очікували появу масових сходів у сорту: UG8500044 Фіолетовий опал (UKR).

Утворення першої пари листків у зразків UG8500003 Бадьорий, UG8500036 Перекотиполе (UKR); UG8500033 Гвоздичний (RUS); UG8500008 (IRQ); UG8500012 Mangerico verde folha (PRT) відбувалося повільніше, порівняно з іншими зразками. Найшвидше формування першої пари листків відбулось у сорту-стандарту UG8500018 Рутан (UKR).

Найдовший період утворення третьої пари листків спостерігався у сорту UG8500044 Фіолетовий опал (UKR) – 56 діб, що на 14 діб довше, ніж у стандарті сорту UG8500018 Рутан (UKR) – 42 доби. Найшвидший у зразків: UG8500079 (UKR) та UG8500010 (AZE) – 45 діб. Загалом, період від сходів до бутонізації бокових суцвіть тривав 75–92 доби залежно від зразка. Так, найкоротшим цей період був у сорту-стандарту UG8500018 Рутан (UKR) – 75 діб, а найтривалішим у: UG8500014 (UKR) – 90 діб; UG8500044 Фіолетовий опал (UKR) – 92 доби.

За одержаними результатами мінливість тривалості періодів життєвого циклу рослин васильків справжніх зумовлена варіюванням температури і режиму зволоження. Недостатня кількість опадів на ранніх етапах росту і розвитку рослин сприяє подовженню їх тривалості, а підвищені літні температури і нестача вологи зменшують тривалість періоду формування генеративних органів. Загалом тривалість вегетаційного періоду у досліджуваних зразків варіювала від 115 діб у

сорт-стандарту UG8500018 Рутан (UKR) до 140 діб UG8500044 Фіолетовий опал (UKR). В результаті оцінки виділено ранньостиглі сорти: UG8500003 Бадьорий (UKR), UG8500036 Перекотиполе (UKR) (120 діб від сходів до дозрівання насіння).

Під час проведення біометричного аналізу було вивчено наступні морфологічні ознаки васильків справжніх: висота рослин, діаметр куща, кількість листків на рослині, кількість пагонів першого порядку. Такі морфологічні ознаки, як висота рослин, діаметр рослин, кількість листків на рослині не тільки мають безпосередній вплив на продуктивність культури, але й використовуються у селекції для створення сортів, придатних для механізованого збирання. Як показали результати проведених досліджень, висота рослин була досить мінливою ознакою. У досліджуваних зразків показник був на рівні 38,6–58,0 см, висота рослин у сорт-стандарту Рутан (UKR) в середньому становить 42,5 см, два зразки мали нижчі показники, всі інші вищі. Вважається, що чим вищий і щільніший кущ, тим більша його придатність до якісного механізованого збирання. Низькорослі рослини васильків справжніх можуть бути використані у селекції для створення декоративних сортів. Середньорослі та низькорослі сорти васильків справжніх мають також більшу стійкість до вилягання, що може бути використане в селекції на цю ознаку.

Найбільшу кількість листків відзначено у UG8500044 Фіолетовий опал, (UKR) показники якого були на рівні 285,9 шт./роsl. У стандарті Рутан (UKR) – 244,5 шт./роsl., його перевищили зразки UG8500003 Бадьорий (UKR) – 251,7 шт./роsl.; UG8500012 Mangerico verde folha (PRT) – 266,4 шт./роsl.; UG8500009 (GEO) – 267,2 шт./роsl.

Серед колекційного матеріалу виділено зразки васильків справжніх, які перевищують за урожайністю зеленої маси сорт-стандарт UG8500018 Рутан, (UKR) з ознакою 12,0 т/га. Так, вищу урожайність зеленої маси відзначено у зразків: UG8500003 Бадьорий, (UKR) – 12,4 т/га, UG8500014 (UKR) – 12,3 т/га, UG8500009 (GEO) – 12,5 т/га, UG8500012 Mangerico verde folha, (PRT) – 12,1 т/га. За показником маса 1000 насінин виділено 7 зразків: UG8500003 Бадьорий, (UKR) – 2,1 г; UG8500008, (IRQ) – 2,1 г; UG8500009, (GEO) – 2,0 г; UG8500010, (AZE) – 2,0 г; UG8500012 Mangerico verde folha, (PRT) – 2,0 г; UG8500011, (GEO) – 1,9 г; UG8500033 Гвоздичний, (RUS) – 1,9 г, які перевищують стандарт UG8500018 Рутан, (UKR) з показником 1,8 г.

Таким чином, що вивчення генетичного різноманіття колекції васильків справжніх та виділення джерел господарсько цінних ознак вказує на те, що зразки колекції можуть слугувати, як джерела вихідного матеріалу за будь яким напрямком селекції.

**СЕЛЕКЦІЙНА ЦІННІСТЬ ЛІНІЙ І СОРТІВ ГОЛОЗЕРНОГО ВІВСА
(*AVENA NUDA* L.)**

В. П. Солодушко

*ДУ «Інститут зернових культур НААН України», Дніпро, Україна,
e-mail: solodushko.nv@gmail.com*

Суттєвим резервом у вирішенні проблеми виробництва дієтичних харчових продуктів є вирощування голозерних сортів вівса, які використовуються як для харчових, так і для кормових цілей без попереднього оброблення, що знижує витрати і собівартість продукції. Голозерні форми вівса за показниками кількості і якості білка перевершують будь-яку злакову культуру. В зерні цієї форми накопичується 16,6–18 % рослинного білка, що перевищує його вміст у зерні вівса плівчастого на 38–60 %. Голозерні сорти відрізняються від плівчастих меншою кількістю спирторозчинних білків, що вказує на кращу збалансованість їх за амінокислотним складом.

Дослідження із селекції голозерного вівса успішно проводяться в Англії, Франції, Канаді, Чехії та інших країнах, але через низьку врожайність зерна, невирівняність його за розмірами, опушеність зернівки він не отримав широкого розповсюдження як в нашій країні, так і за її межами. До того ж, постійне вищеплення у сучасних голозерних сортів 5–10 % плівчастих зернівок ускладнює використання їх зерна на харчові цілі. Дана ознака домінуюча і контролюється одним основним геном і двома-трьома генами – модифікаторами.

Основними напрямками селекційно-генетичного поліпшення вихідного матеріалу голозерних форм вівса були підвищення урожайності зерна і покращання його якості (білок, жир, крохмаль тощо), збільшення маси 1000 насінин, зниження опушеності зернівки, подвійних і порожніх насінин, кількості вищеплених плівчастих зернівок. Також значна увага приділялася вирівняності зерна за крупністю, усунення проростання на корені, селекції на стійкість до хвороб, оптимізація морфологічного типу рослини.

Метою досліджень стала оцінка генотипів голозерного вівса за урожайністю і показниками якості зерна, що необхідно для створення голозерних сортів вівса у зоні Степу. Дослідження проводили в ДУ «Інститут зернових культур НААН» впродовж 2023–2025 рр.

Як вихідний матеріал використовували високопродуктивні, крупнозерні голозерні сорти Ballion, Byas, Neon, Абель, Rhea, Nuprime, Plater, Adam, Дієтичний, Спонтано, Синельниківський 211, Дніпровський 316, Адріана та інші, а також отримані гібридні комбінації, маса 1000 насінин яких становила 23,6–29,4 г.

У розсадниках впродовж вегетаційного періоду проводили фенологічні спостереження, аналізували тривалість міжфазних періодів та загального періоду вегетації вівса, стійкість до вилягання, обсіпання, посухи, ураження хворобами. Статистичний аналіз даних проведено стандартними методами.

Довжина волоті головного стебла найбільш продуктивних генотипів голозерних форм виявилася в діапазоні 21,9–23,8 см, мінливість даної ознаки була незначною ($V = 7,4\text{--}9,3\%$). Кількість колосків з рослини в різних сортозразках була в межах 53,4–61,6 шт., варіабельність даної ознаки в усіх гібридних комбінаціях середня ($V = 15,4\text{--}17,8\%$). Кількість насінин з рослини в сортозразках була від 121,2 до 142,2 шт. ($V = 20,5\text{--}25,0\%$). Серед гібридних комбінацій нижчою мінливістю цього показника характеризувалися Rhea × Абель, $F_4\text{--}F_6$ ($V = 20,5\%$), Plater × Абель, $F_4\text{--}F_6$ ($V = 21,7\%$) і (Синельниківський 211 × Rhea) × Абель, $F_4\text{--}F_6$ ($V = 21,7\%$). За масою зерна з рослини найбільш продуктивними були гібридні комбінації Plater × Абель, $F_4\text{--}F_6$, Дніпровський 316 × (Rhea × Ballion), $F_4\text{--}F_6$, Адріана × Byas, $F_4\text{--}F_6$, в яких даний показник виявився на рівні 4,05; 3,99 і 3,94 г відповідно. Мінливість маси зерна з рослини за винятком гібридної комбінації Адріана × Byas, $F_4\text{--}F_6$ була значною ($V = 22,6\text{--}25,7\%$).

Маса 1000 насінин це відносно стабільна генетично обумовлена ознака, в зв'язку з чим селекційна робота має позитивні результати. У вищенаведених генотипів маса 1000 насінин становила 27,9–29,4 г, коефіцієнт варіації був незначним (7,1–9,1 %).

За продуктивністю голонасінні форми вівса зазвичай поступалися плівчастим на 35–45 %, а окремі сортозразки навіть на 55 %, але враховуючи непоживну частину врожаю (плівку), різниця між цими формами становила лише 5–15 %.

У конкурсному сортовипробуванні в середньому за 2023–2025 рр. виділилося 6 ліній голозерного вівса Ск 1024/10, Сс 732/10, Рс 72/09, Сс 1136/09, Сп 547/10, Сп 234/10, урожайність зерна яких в середньому за 3 роки становила 2,16–2,32 т/га. Вони мали істотне перевищення (0,21–0,37 т/га) над стандартним сортом Скарб України. Вегетаційний період новостворених ліній склав 86–92 доби. Особлива увага в дослідженні селекційного матеріалу приділялася визначенню таких фізичних показників якості зерна як виповненість, натура і наявність плівчастих зернівок в генотипах. Показник «маса 1000 насінин» свідчить про запас поживних речовин, схожість і життєздатність насіння. Маса 1000 насінин найбільш перспективних ліній голозерних форм конкурсного випробування виявилася на рівні 28,6–29,5 г, що перевищувала показники сорту-стандарту на 2,4–3,3 г. За цією ознакою виділилися лінії Сс 1136/09, Сп 547/10 і Сп 234/10.

Зерно з високою натурою має добру виповненість, великий відсоток ядра. Значення цього показника у кращих ліній конкурсного випробування були на рівні 650–685 г/л. Найбільшу натуру зерна мали зразки Сп 547/10, Сс 1136/09, Рс 72/09 та Ск 1024/10. Наявність плівчастих зернівок у голозерних формах не повинна перевищувати 4 %, оскільки більший їх уміст ускладнює використання зерна на харчові цілі. Лінії за стійкістю проти борошнистої роси і корончастої іржі оцінені в 8–9 балів, за стійкістю проти летючої сажки – в 7–9 балів. За вмістом білка (16,9–17,5 %) виділилися генотипи Сп 547/10, Ск 1024/10, Сп 234/10 і Сс 732/10. Уміст клітковини в новостворених лініях становив 3,8–4,2 %, уміст крохмалю – 45,9–49,0 %.

Сортозразок Ск 1024/10, який впродовж останніх років за урожайністю зерна та іншими показниками мав істотне перевищення над стандартом, в 2025 р. під назвою Бредлі занесений до Державного реєстру сортів рослин, придатних для поширення в Україні. Сорт отриманий в результаті складної гібридизації з використанням багаторазового індивідуального добору з негативним вибракуванням рослин за голозерністю, вирівняністю і крупністю зерна із застосуванням в якості вихідного матеріалу зразків Nuprime (Франція) і Plater (Польща). За результатами конкурсного сортовипробування в середньому за 2023–2025 рр. сорт Бредлі за урожайністю зерна перевищив національний сорт-стандарт Скарб України на 0,32 т/га, або на 16,4 %. В екологічному випробуванні урожайність зерна сорту становила 2,96 т/га і перевищувала стандарт на 0,44 т/га. Сорт Бредлі мав підвищену натуру зерна – 678 г/л, масу 1000 насінин – 28,6 г, тоді як у стандарту значення даних показників складали, відповідно 595 г/л та 26,2 г. Сорт стійкий до вилягання і обсіпання, вміст білка в зерні знаходився на рівні 16,9 %, крохмалю – 49,0 %, жиру – 5,7 %, вміст плівчастих зернівок в сорті становив 2,6 %, тоді як у стандарту даний показник був на рівні 3,8 %. Вегетаційний період сорту Бредлі на шість діб довший в порівнянні зі стандартом і становив 92 доби.

За роки державного випробування (2024–2025) урожайність зерна сорту Бредлі в зоні Лісостепу становила 4,98 т/га, в зоні Полісся – 3,52 т/га. За даними Сумської філії УІЕСР урожайність зерна виявилася на рівні 5,92 т/га, за даними Тербовлянського сектора польових досліджень Тернопільської філії УІЕСР урожайність зерна сорту Бредлі становила 5,85 т/га. Маса 1000 насінин в зоні Лісостепу була 40,5 г, у зоні Полісся – 29,9 г. Сорт стійкий до біотичних і абіотичних чинників довкілля, має харчовий напрям використання. Сорт Бредлі рекомендований для вирощування в зонах Лісостепу і Полісся.

До Реєстру сортів рослин, придатних для поширення в Україні в 2020 році занесений сорт голозерного вівса Родоніт і рекомендований до вирощування в зонах Полісся і Лісостепу. Сорт за результатами державного випробування перевищив усереднену врожайність сортів, що пройшли державну реєстрацію за п'ять попередніх років в лісостеповій зоні на 0,35 т/га, в поліській зоні – на 0,24 т/га. В зоні Лісостепу сорт Родоніт за даними Сумської філії УІЕСР сформував урожайність 3,86 т/га, за даними Білоцерківської філії УІЕСР – 3,64 т/га, що вище від стандарту відповідно на 1,12 і 0,90 т/га. Максимальну врожайність (3,95 т/га) було отримано в зоні Полісся, в умовах Чернігівської філії УІЕСР, де приріст додатково одержаного зерна в порівнянні зі стандартом сягав 1,06 т/га.

Таким чином, проведені оцінка та підбір генотипів з комплексом господарсько-цінних ознак для створення голозерних сортів вівса для різних природно-кліматичних зон вирощування. Створені лінії голозерних форм вівса Ск 1024/10, Рс 72/09, Сс 732/10, Сс 1136/09, Сп 547/10, Сп 234/10 заплановано в подальшому залучити до програми з селекції нових високопродуктивних голозерних сортів із заданими параметрами різних господарсько-цінних ознак.

ОЦІНКА АДАПТИВНОГО ПОТЕНЦІАЛУ СОРТІВ ЯРОГО ЯЧМЕНЮ

П. М. Солонечний, Н. І. Васько, О. В. Зимогляд, О. В. Солонечна

*Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН України, Харків, Україна
e-mail: pashabarley86@gmail.com*

За останні 20 років в Україні сформувалися два стійкі кліматичні тренди – зростання середньої температури та зниження річної кількості опадів, що свідчить про поступову аридизацію клімату. Відбувається системне зрушення термінів сівби: озимі культури висівають пізніше, ярі – раніше, щоб уникнути посушливого періоду.

Селекція ячменю, як і інших сільськогосподарських культур, є одним із головних збільшення врожайності та валових зборів. Запорука цього – підвищення генетичного потенціалу нових сортів та їхньої генетичної стійкості до основних біо- та абіотичних чинників. Важливою частиною селекційних програм є визначення адаптивних особливостей вихідного та перспективного селекційного матеріалу до можливих змін клімату. Для цього традиційно використовують екологічне випробування в різних кліматичних зонах або в одній зоні, але за контрастних погодних умов під час періоду вегетації культури. Зручним інструментом для аналізу одержаних результатів випробування є GGE biplot та АММІ аналіз.

Метою досліджень було дослідити особливості адаптивного потенціалу 20 сортів ячменю ярого в умовах східної частини Лісостепу України та виділити найбільш перспективний вихідний матеріал для селекційних програм по цій культурі.

Польові дослідження виконували в селекційній сівозміні експериментальної бази Інституту рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН у 2023–2025 р. Як вихідний матеріал використано 20 сортів ярого ячменю селекції установ НААН – Август, Аграрій, Аміл, Бальзам, Вдячний, Вісник, Геркулес, Девіз, Експерт, Ельф, Захисник, Інер, Кречет, Мирослав, Подив, Світоч, Троян, Хорс, Шарм, Шедевр. Роки досліджень значно різнилися за погодними умовами під час вегетації ярого ячменю, що дозволило оцінити адаптивність та стабільність досліджених сортів в різних умовах.

АММІ модель дисперсійного аналізу показала, що існували достовірні відмінності для середовища, генотипу та їхньої взаємодії. Особливістю цієї моделі дисперсійного аналізу є те, що взаємодія генотип-середовище розкладається на першу та другу вісь головних компонентів взаємодії (IPCA1 та IPCA2), з допомогою яких можна визначити стабільність генотипів. У нашому дослідженні врожайність зерна ярого ячменю значно залежала від фактору середовище, який становив 94,1 % від загальної варіації ($G + E + GE$), тоді як генотип та взаємодія генотип-середовище становили 3,1 % та 2,6 % відповідно. Великий відсоток впливу фактору середовище свідчить про те, що погодні умови років досліджень були різноманітними, що спричинило значну варіацію врожайності за роками.

Значна мінливість за врожайністю спостерігалася як за роками, так і між дослідженими сортами кожного року та в середньому за три роки. Так, різниця середньої врожайності сортів ячменю між найбільш несприятливим 2024 р. і найбільш сприятливим 2025 р. становила співвідношення 1 до 4 (1,66 т/га та 6,60 т/га відповідно). Різниця між сортами також була значною – так, їх середня врожайність за три роки мала розмах від 2,80 т/га до 4,29 т/га, тобто фактично 1,50 т/га.

Мінливість врожайності в залежності від умов року найнижчою була у сортів Хорс, Аграрій, Шарм, Аміл, але ці ж сорти були і найменш врожайними (2,80–3,58 т/га); найвищою врожайність була у сортів Ельф, Троян, Світоч, Захисник, Інер, Подив (4,00–4,29 т/га), але також найбільшою була і різниця між несприятливим 2024 р. та сприятливим 2025 р. Тому для більш детального аналізу даних врожайності було проведено оцінку стабільності генотипів за допомогою АММІ аналізу та візуалізацію врожайності і стабільності, а також їх поєднання за графіками GGE biplot.

На основі показників вісі 1 та 2 головних компонентів взаємодії (IPCA1 та IPCA2) кожного сорту розраховано показник стабільності ASV (AMMI Stability Value) та відповідно – ранжування сортів за цим показником. Так, найбільший рівень стабільності мав сорт Подив, на другому місці сорт Інер, на третьому сорт Захисник і т.д. За даним показником найбільш стабільними за роками були сорти Подив, Інер, Захисник, Авгур, Бальзам та Аміл. За поєднанням високої врожайності та стабільності (індекс селекції генотипу – GSI) виділилися сорти Захисник, Інер та Подив.

Для візуального аналізу даних екологічного випробування було використано GGE biplot аналіз, яка складається з двох концепцій: biplot та GGE, що використовуються для візуалізації даних екологічного випробування. Ця методологія використовує графіки biplot для відображення факторів генотип та взаємодія генотип-середовище, які є важливими для оцінки генотипу.

GGE biplot «Врожайність та стабільність» використовується для візуального ранжування генотипів за їх середньою врожайністю та стабільністю в ряді середовищ (років). Середня координата середовища (вісь X) ранжує генотипи за їх врожайністю. Вісь Y, або вісь стабільності є перпендикулярною до осі X. Середня врожайність генотипів оцінюється за проекцією своїх маркерів на вісь X. Сорти Ельф, Троян, Інер та Захисник мали найвищу середню врожайність, а сорти Шарм та Вдячний – найнижчу. Врожайність сортів Хорс, Аграрій та Девіз була найбільш варіабельною (найменш стабільною), тоді як сорти Подив, Бальзам, Ельф, Інер та Захисник характеризувався високою стабільністю. Таким чином, GGE biplot допоміг виділити сорти ярого ячменю, які поєднували високу врожайність та стресостійкість, що є важливим для аграрного виробництва.

GGE biplot також дає змогу ранжувати генотипи за «селекційною цінністю». Чим більше генотип наближений до «ідеального», тим ціннішим він є, адже поєднує високу врожайність та стабільність. У наших дослідженнях найбільш наближеними до «ідеального» генотипу були сорти Ельф, Троян, Захисник та Інер, що робить їх цінними для виробників зерна та як вихідний матеріал для селекції ячменю.

Таким чином, з використанням моделі AMMI та GGE biplot для аналізу врожайності 20 сортів ячменю ярого за 2023–2025 рр., було виділено найбільш врожайні (Ельф, Троян, Інер, Захисник – 4,29–4,06 т/га) та найбільш стабільні (Подив, Бальзам, Ельф, Інер, Захисник) сорти, а також сорти, які поєднували обидва показники – Ельф, Інер та Захисник, що було підтверджено графіком GGE biplot «ідеальний генотип». Обидві моделі оцінки адаптивних особливостей генотипів показали дуже високу кореляцію, але при оцінці стабільності були окремі відмінності. Ці два види аналізу можна використовувати як взаємодоповнюючі.

Виділені сорти ярого ячменю (за рівнем врожайності Ельф, Троян, Інер, Захисник; за стабільністю – Подив, Бальзам, Ельф, Інер, Захисник) є цінним вихідним матеріалом для селекційних програм з яромго ячменю. Сорти, які різняться за реакцією на контрастні умови років досліджень, у виробничих умовах доповнюватимуть один одного при формуванні сортового складу. Генотипи, що є близькими до «ідеального» (Ельф, Троян, Захисник, Інер), поєднують високу врожайність із стресостійкістю та можуть бути рекомендованими для стабільного отримання врожаю ярого ячменю.

**ЦИТОГЕНЕТИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ СТІЙКИХ ДО АБІОТИЧНИХ СТРЕСІВ
РОСЛИН *DESCHAMPSIA ANTARCTICA* ТА *SECALE CEREALE***

М. О. Твардовська, О. Г. Алхімова, В. А. Кунах

*Інститут молекулярної біології і генетики НАН України, Київ, Україна,
e-mail: maryana.tvardovska@gmail.com*

Зростання частоти та інтенсивності абіотичних стресів, зумовлених глобальними кліматичними змінами, зокрема посухою, засоленням, різкими змінами температури, робить дослідження механізмів адаптації рослин до несприятливих умов середовища одним із пріоритетних напрямів сучасної біології рослин та аграрної науки. Значну увагу приділяють злаковим культурам, які складають основу продовольчої безпеки та водночас зазнають значних втрат урожаю внаслідок дії стресових чинників. *Secale cereale* є референтною моделлю серед культурних злаків, тоді як *Deschampsia antarctica* слугує моделлю вивчення адаптації рослин до екстремальних умов середовища. Це робить обидва види перспективними об'єктами для порівняльного аналізу геномних змін, пов'язаних із формуванням механізмів стресостійкості.

Метою нашої роботи було проведення цитогенетичного аналізу різних генотипів *D. antarctica* та деяких сортів *S. cereale*. Цитогенетичний аналіз колекції рослин *in vitro* *D. antarctica* відділу генетики клітинних популяцій Інституту молекулярної біології і генетики НАН України, показав, що більшість генотипів були диплоїдними ($2n=26$) (Kunakh et al., 2021). Поряд з цим, виявлено три нові хромосомні форми: гіпотриплоїд з Робертсонівською транслокацією Y66 ($2n=36-39$), місоплоїд Y67 (з числами хромосом від 13 до 38 і модальним класом $2n=26$) та диплоїди з В хромосомами DAR12 ($2n=26+0-3B$) та BE1 ($2n=26+1-4B$). FISH аналіз показав, що диплоїдні генотипи містять 10 сайтів 5S та 4 сайти 45S рДНК, тоді як у гіпотриплоїда виявлено 14 та 6 сигналів 5S та 45S рДНК, відповідно (Amosova et al., 2015). При проведенні цитогенетичного аналізу диплоїда з В хромосомами DAR12 знайдено два типи В хромосом, які мали різні DAPI/C-бенди, а сайти 5S рДНК виявлено у субтеломерній ділянці однієї В хромосоми. У рослинах генотипу BE1, поряд із знайденими додатковими хромосомами, вперше виявлено явище псевдовівіпарії, яке вважають адаптивною реакцією, а також перевагою стресостійких рослин за несприятливих умов існування. Відомо, що наявність додаткових хромосом у каріотипі підвищує стійкість рослин до умов абіотичного стресу. Як правило, вони нейтральні за своїми фенотиповими проявами, проте їх підвищена кількість може впливати на широкий спектр фенотипових ознак та фертильність виду (Кунах, 2010; Houben, 2017). Виявлені В-хромосоми і явище псевдовівіпарії у деяких генотипах *D. antarctica* є свідченням різноманітних механізмів, які можуть сприяти підтриманню життєздатності рослин в екстремальних умовах Антарктики.

При проведенні молекулярно-генетичного аналізу *S. cereale* ($2n=2x=14$) як маркери використовували субтеломерні послідовності pSc200 та pSc250, які є некодуючими та житоспецифічними повторами і складають близько 5 % геному виду. У більшості сортів повтор pSc200 розташований на кінцях обох плечей усіх хромосом. У рослин сорту Життедайне показано відсутність pSc200 на довгому плечі хромосоми 5R. У сорту Imperial сигнал pSc200 знайдено на всіх плечах семи пар хромосом, окрім довгого плеча хромосоми 4R. Сателітний повтор pSc250 наявний на хромосомах 1R та 3R в усіх досліджених сортів. Між Selgo, Imperial та Petkus показано відмінності у розподілі сигналу послідовності pSc250. У сорту Petkus послідовності pSc200 містяться на кінцях усіх хромосом, а pSc250 – на кінцях коротких плечей усіх хромосом, а на довгих – лише на 1R та 3R (Alkhimova et al., 2004).

У досліджених сортах *S. cereale* 45S рДНК локалізована на короткому плечі хромосоми 1R, тоді як 5S рДНК – на коротких плечах трьох хромосом (1R, 3R, 5R). Проведений нами FISH аналіз різних сортів *S. cereale* виявив міжсортний поліморфізм у розподілі субтеломерних повторів pSc200 і pSc250, тоді як локалізація 5S та 45S рДНК залишалася переважно консервативною. Встановлені відмінності у локалізації повторюваних послідовностей та варіації копійності рДНК свідчать про структурну мінливість геному жита. Оскільки субтеломерні ділянки хромосом характеризуються високою динамічністю та залучені до процесів перебудови геному, виявлений поліморфізм, ймовірно, пов'язаний із механізмами геномної пластичності, які забезпечують адаптацію рослин до дії абіотичних стресових чинників.

Отримані результати цитогенетичного аналізу *D. antarctica* та *S. cereale* розширюють уявлення про організацію геному цих видів та створюють підґрунтя для подальших досліджень взаємозв'язку між структурними особливостями хромосом, адаптивним потенціалом і стресостійкістю. Використання сучасних методів молекулярної цитогенетики, зокрема FISH, може забезпечити можливість детального картування окремих ділянок геному, у нашому випадку теломерних та субтеломерних послідовностей, та дозволить встановити їх роль у формуванні адаптивних ознак. Також отримані результати можуть бути використані для оцінки генетичного різноманіття, ідентифікації генотипів із підвищеним адаптивним потенціалом та вдосконалення селекційних програм, спрямованих на створення сортів жита, стійких до несприятливих умов довкілля.

ЛІТЕРАТУРА

- Kunakh V., Twardovska M., Andreev I. et al. *Pol. Polar Res.* 2023. 44: 41–68.
Amosova A.V., Bolsheva N.L., Samatadze T.E. et al. *PLoS ONE*. 2015. 10: 1–17.
Кунах В.А. *Вісн. Укр. тов. генет. селекц.* 2010. 8: 99–139.
Houben A.B. *Front. Plant Sci.* 2017. 8: 210.
Alkhimova O.G., Mazurok N.A., Potapova T.A. et al. *Chromosoma*. 2004. 113: 42–52.

**ВПЛИВ ПОСУХИ НА ПІГМЕНТНИЙ АПАРАТ ПРЕДСТАВНИКІВ
РОДИНИ AIZOACEAE (*TETRAGONIA TETRAGONIOIDES*
I DOROTHEANTHUS APETALUS)**

Н. М. Топчій, В. В. Дадика, О. В. Поліщук, Ю. М. Акімов, О. К. Золотарьова

*Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України, Київ, Україна,
e-mail: ntopchiy@ukr.net*

Рослини родини Аїзові (Aizoaceae, Caryophyllales), які природно адаптовані до посухи, спеки та бідних, кам'янистих або піщаних ґрунтів, приваблюють дослідників надзвичайною здатністю виживати в екстремальних умовах. Їх вивчають з метою розробки методів адаптації сільськогосподарських культур до глобального потепління та пошуку нових біотехнологічних рішень. Представники родини Aizoaceae поширені переважно у тропічних та субтропічних регіонах світу, більшість видів є листовими посухостійкими сукулентами або напівсукулентами. Об'єктами дослідження в цій роботі були *Tetragonia tetragonoides* (Pall.) Kuntze та *Dorotheanthus apetalus* (відомий як *Cleretum apetalum*).

T. tetragonoides – солестійка однорічна витка ліана з невеликими трикутними листками. Походить із Нової Зеландії, має великий потенціал для екстракції солі із засолених ґрунтів. Завдяки високій солестійкості ця рослина є ключовим об'єктом досліджень у галузі сталого землеробства на засолених ґрунтах та гідропонного вирощування.

D. apetalus – невеликий сукулентний однорічний вид, який походить із Південної Африки. Належить до так званих “крижаних рослин” (ice plants), поверхня яких вкрита дрібними блискучими клітинами, що нагадують краплі льоду. Рослина адаптована до прямого інтенсивного сонячного світла і може витримувати тривалі періоди посухи.

Фотосинтетичний апарат (ФСА) і пігментний комплекс *D. apetalus* досліджені лише фрагментарно. ФСА *T. tetragonoides* вивчався переважно у контексті реакції на сольовий стрес. Показано, що при легкому та помірному засоленні зберігається високий рівень фотосинтезу з ефективним захистом хлоропластів від фотоінгібування. За умов помірної солоності синтез хлорофілу (*Хл*) та каротиноїдів (*Кар*) може додатково стимулюватися, що дозволяє рослині активно вегетувати в умовах, токсичних для більшості звичайних культур (Atzori, 2020). Метою роботи було вивчення змін у пігментному складі *T. tetragonoides* та *D. apetalus* за умов посухи.

Рослини вирощували у горщиках у ґрунті протягом 8 тижнів за умов нормального поливу, температури 16–20°C, вологості 40–60 %, фотоперіоду (світло/темрява) 14/10 год, після чого полив припиняли. Втрата тургору у *T. tetragonoides* спостерігалася на 5-ий день, у *D. apetalus* – на 9-ий день посухи. Після втрати тургору листки відбирали для аналізу.

Відносний вміст води (RWC) у листках визначали за формулою: $RWC = (FW - DW) / (TW - DW) \times 100$, де FW і DW – сира та суха маси листків відповідно, TW (тургорна маса) – максимальна маса листків після повного насичення водою впродовж 4 годин. Фотосинтетичні пігменти екстрагували диметилсульфоксидом (ДМСО), додаючи 7 мл ДМСО до 20 мг дрібно нарізаних листків. Екстракцію проводили за температури 35°C протягом 17 год до повного знебарвлення листків, як описано у Tait (2003). Концентрацію хлорофілів *a*, *b* та *Кар* визначали спектрофотометрично за Wellburn (1994). Вміст пігментів розраховували в мг на 1 г сухої речовини. Для сканувальної електронної мікроскопії висічки листків діаметром 2 мм фіксували протягом 4 год у 2,5 % розчині глютарового альдегіду на фосфатному буфері (pH 7,2) із застосуванням вакуумної інфільтрації, відмивали дистильованою водою та ліофілізували протягом 4 год. Зразки після напилення шаром золота досліджували за допомогою мікроскопа JSM-6060 LA.

При візуальному спостереженні рослини *D. apetalus* виявилися більш стійкими до посухи і значно довше зберігали тургор, ніж *T. tetragonoides*. RWC, що характеризує водний статус рос-

THIRD INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
"PLANT STRESS AND ADAPTATION"

лининних тканин, складав для *T. tetragonioides* $91,09 \pm 1,34$ в контролі і $52,62 \pm 1,21$ після посухи. Для *D. apetalus* RWC в контролі $\sim 87,94 \pm 1,99$ і після посухи $\sim 72,53 \pm 4,61$. Тобто, незважаючи на довший стрес, *D. apetalus* значно краще утримував вологу, ніж *T. tetragonioides*. Результати аналізу пігментного складу листків наведено у таблиці.

Вміст (мг/г сухої маси) та співвідношення фотосинтетичних пігментів у листках
T. tetragonioides та *D. apetalus*

	<i>Хл a</i>	<i>Хл b</i>	<i>Хл a + Хл b</i>	<i>Кар</i>	<i>Кар/Хл</i>	<i>Хл a/b</i>
<i>D. apetalus</i> , контроль	$8,24 \pm 1,28$	$1,51 \pm 0,53$	$9,37 \pm 1,81$	$2,08 \pm 0,22$	$0,22 \pm 0,02$	$5,84 \pm 1,49$
<i>D. apetalus</i> , посуха	$15,11 \pm 0,82$	$5,17 \pm 0,31$	$20,28 \pm 1,11$	$3,17 \pm 0,31$	$0,15 \pm 0,01$	$2,92 \pm 0,07$
<i>T. tetragonioides</i> , контроль	$16,01 \pm 3,9$	$4,86 \pm 0,99$	$20,87 \pm 4,89$	$3,01 \pm 0,59$	$0,14 \pm 0,01$	$3,27 \pm 0,14$
<i>T. tetragonioides</i> , посуха	$13,71 \pm 1,69$	$4,12 \pm 0,41$	$17,84 \pm 2,11$	$2,85 \pm 0,25$	$0,16 \pm 0,03$	$3,32 \pm 0,09$

Видно, що пігментний склад *T. tetragonioides* дещо змінювався після 5-денної посухи. Вміст *Хл a*, *Хл b* і *Кар* знижувався незначно, в межах статистичної похибки, співвідношення *Кар/Хл* та *Хл a/b* практично не змінювалося. Пігментний склад *D. apetalus* після 9-денної посухи, навпаки, змінювався драматично. Вміст *Хл a*, *Хл b* та *Кар* у *D. apetalus* суттєво зростає, тоді як співвідношення *Кар/Хл* та *Хл a/b* достовірно знижувалися. Такі результати принципово відрізняються від багатьох спостережень щодо впливу посухи на пігментний склад СЗ-, С4 і САМ рослин, згідно з якими при помірному та сильному водному стресі прискорюється деградація хлорофілу та гальмується його синтез, що призводить до зниження вмісту *Хл a*, *Хл b* та загального *Хл* (Tuba, 1984; Monteoliva et al., 2021; Wang et al., 2025). Співвідношення *Хл a/b* при цьому знижується. Вміст захисних пігментів (таких як каротиноїди) при стресі часто збільшується. Це діє як захисний механізм, що дозволяє знешкоджувати активні форми кисню. Суттєві розбіжності між літературними даними і реакцією *D. apetalus* на посуху можуть бути пояснені анатомічними особливостями цих видів. За результатами сканувальної мікроскопії епідерміс аїзових рясно вкритий ідіобластами (міхурцевими клітинами). Згідно з літературними даними вони діють як лінзи, заломлюючи світло та підтримуючи стабільне функціонування хлорофілу всередині листка навіть за екстремальних температур. Раніше подібна до *D. apetalus* реакція на посуху була виявлена у іншого представника Aizoaceae – *Mesembryanthemum crystallinum* (He et al., 2020). Таким чином, наявні дані дозволяють припускати, що ідіобласти епідермісу “крижаних рослин” виконують функцію спеціалізованих оптичних елементів, що захищають зелені тканини, які локалізовані під ними.

ЛІТЕРАТУРА

- Atzori G., Nissim W., Macchiavelli T. et al. *Agricult. Water Manag.* 2020, 240:106261.
 He J., Chua E.L., Qin L. *PLoS ONE* 2020. 15(3): e0229897.
 Monteoliva M. I., Guzzo M. C., Posada G.A. *Gene Technol.* 2021. 10(165):10-35248.
 Tait M.A., Hik D.S. *Photosynth. Res.* 2003. 78(1): 87-91.
 Tuba Z. *J. Plant Physiol.* 1984. 115: 331-338.
 Wang S., Ma Q., Li C., Zhang S., Liu X. *Int. J. Mol. Sci.* 2025, 26(24):11872.
 Wellburn A.R. *J. Plant Physiol.* 1994. 144(3):307-313.

ІЗОФЕРМЕНТНИЙ АНАЛІЗ ЕСТЕРАЗ ПРИ АДАПТАЦІЇ ПРОРОСТКІВ ГОРОХУ ДО ВОДНОГО ДЕФІЦИТУ

Н. М. Топчій, О. Б. Онойко, О. К. Золотарьова

*Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України, Київ, Україна,
e-mail: elena_onoiko@ukr.net*

Естерази в рослинах відіграють ключову роль у метаболізмі складних ефірів, включаючи жири, воски, кутин і пектин, і беруть участь у рості, розвитку та захисті від стресів. Вони (наприклад, пектинестерази) необхідні для формування та деградації клітинних стінок, мобілізації запасних ліпідів у насінні, синтезу вторинних метаболітів, а також у реакціях на стрес та взаємодії з патогенами. Рослинні естерази, зокрема GDSL-естерази/ліпази (GELP), є ключовими білками, які активуються у відповідь на абіотичний стрес. Вони перепрограмують структуру клітинних стінок, причетні до регуляції транспортування води, передачі гормональних сигналів, забезпечуючи виживання та адаптацію рослин. Естерази та ліпази (особливо сімейство GDSL) під час посухи відіграють ключову роль в перебудові клітинних мембран (Dong et al., 2026), розщеплюють ефірні зв'язки мембранних ліпідів рослин відбувається, що супроводжується руйнуванням полярних ліпідів та накопиченням вільних жирних кислот.

Горох — важлива бобова культура прохолодного сезону, яка використовується як харчова та кормова культура завдяки високому вмісту білка. Потенційна врожайність рослин гороху часто обмежується через різні абіотичні стреси, такі як спека, посуха, засоленість та мороз. Ці стреси характеризуються складним кількісним успадкуванням, що робить традиційну селекцію повільною та трудомісткою через тривалі цикли поколінь. Це підкреслює необхідність застосування підходів до прискореної селекції та розробки функціональних маркерів, які дозволяють заощадити час при розробці нових фенотипів гороху, стійких до абіотичного стресу (Verma et al., 2026). Потужним біохімічним та генетичним маркером стресу є ізоферментний профіль деяких ферментів. Оскільки високополіморфні естерази життєво важливі для детоксикації та метаболізму, кількісні і якісні зміни їх ізоферментного спектру можуть слугувати швидкими індикаторами стресу. Метою роботи було вивчення кореляції між рівнем фізіологічного стресу, викликаного водним дефіцитом, та рівнем і розподілом естеразної активності білкової фракції, ізольованої з листків проростків гороху.

Об'єктом дослідження були рослини гороху посівного *Pisum sativum*, які вирощували протягом 10 діб при фотоперіоді 12 годин та густині потоку фотонів ФАР $200 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на живильному середовищі Кнопа. На 11 добу у частини проростків імітували водний стрес шляхом додавання до середовища 10 % ПЕГ 6000. На 14–15 добу вирощування дослідні рослини втрачали тургор. Після цього листки контрольних і дослідних рослин відбирали для аналізу. Визначали відносний вміст води (RWC), вміст та співвідношення фотосинтетичних пігментів за Wellburn (1994) вміст розчинних білків за Bradford (1976), естеразну активність білкової фракції листків, а також її розподіл в гелях після електрофоретичного розділення.

Для оцінки функціонального стану фотосинтетичного апарату визначали максимальний квантовий вихід фотосистеми II (Fv/Fm), початкову флуоресценцію F_0 листків і рівень нефотохімічного тушення (NPQ) листків.

Розчинні білки листків ізолювали за Makino et al. (1992). Нативний електрофорез білків проводили в ПААГ за методом (Ornstein, Davis, 1964). Активність естерази у розчині визначали шляхом відстеження зміни оптичної густини 1 mM *n*-нітрофенол ацетату (4-NPA) при довжині хвилі 348 нм протягом 3 хвилин при температурі 25°C під час його перетворення на іон *n*-нітрофенілату згідно з Verpoorte та ін. (1967). Візуалізацію естеразної активності в гелях визначали за методом

Kumar et al. (2022) Після електрофорезу гелі інкубували протягом ночі в буфері Tris-HCl (pH 7,4), що містив субстрат β -нафтилацетат (75 мкМ у етанолі) та азобарвник Fast-Blue-BB. Вивільнений β -нафтол вступає у реакцію з FB-BB, надаючи фіолетового забарвлення ділянкам з естеразною активністю.

У міру розвитку посухи в проростках гороху знижувався загальний вміст пігментів у листках. Спочатку рівень хлорофілу a і b може частково зберігатися або навіть трохи зростати через зневоднення (зменшення об'єму клітин). Співвідношення Хл a/b у дослідному варіанті знижувалося до 2,55 порівняно з контролем (2,94), що свідчить про збільшення відносного вмісту Хл b за умов стресу. Це відбувається тому, що Хл a (пігмент основного реакційного центру) є більш чутливим до окиснювального пошкодження, спричиненого посухою, ніж хлорофіл b . З іншого боку, активність ферментів, які беруть участь у перетворюванні Chl b назад на Chl a , за даними деяких досліджень, за умов посухи зменшується, внаслідок чого зростає відносна частка Chl b . Вміст захисних пігментів (таких як каротиноїди) при розвитку посухи закономірно зростає. Параметри індукції флуоресценції хлорофілу, свідчили про зростаюче порушення функціонального стану фотосинтетичного апарату. Максимальний квантовий вихід фотосистеми II (Fv/Fm), як базовий параметр стресу, залишався стабільним під час слабого стресу, захищаючи реакційні центри рослини від негайного необоротного пошкодження, а при зростанні водного дефіциту знижувався, що вказує на фотоінгібування і пошкодження реакційних центрів. Квантовий вихід фотохімії фотосистеми II (Φ_{PSII}) помітно знижується в умовах дефіциту води, що свідчить про зменшення швидкості світлозалежного транспорту електронів. Реальний квантовий вихід транспорту електронів (Y_{II}), суттєво знижувався, а нефотохімічне гасіння флуоресценції (NPQ) зростало через розсіяння надлишкової світлової енергії у вигляді тепла, щоб захистити фотосинтетичний апарат. За умов посилення водного дефіциту естеразна активність сумарної фракції листків зростала. При візуалізації естеразної активності в ПААГ було виявлено декілька смуг, які відповідали високо- і низькомолекулярним ізоформам α - і β -естераз. Кількість і інтенсивність виявлених смуг змінювалися у міру посилення водного стресу. Отримані дані дозволяють виявити кореляцію між стійкістю рослин до посухи і накопиченням естеразних ізоферментів.

ЛІТЕРАТУРА

- Bradford M.M. *Anal. Biochem.* 1976, 72(1-2): 248-254.
Dong K., Sarwar R., Liang Y. et al. *Int. J. Mol. Sci.* 2026, 27(9): 3872
Edwards L.J., Patton R. L. *Stain Technol.* 1966. 41(6): 333.
Kumar D., Behal S., Bhattacharyya R., Banerjee D. *Ind. J. Clin. Biochem.* 2022. 37(1):124–125.
Makino A., Sakashita H., Hidema J. et al. *Plant Physiol.* 1992. 100:1737-1743.
Verma N., Dhali R.K., Yadav S. et al. *Front. Plant Sci.* 2026, 17:1762081.
Verpoorte J.A., Mehta S., Edsall J.T. *J. Biol. Chem.* 1967, 242(18):4221-4229.
Wellburn A.R. *J. Plant Physiol.* 1994. 144(3):307-313.

ОЦІНКА ЗРАЗКІВ ГРЕЧКИ ЗА ЦІННИМИ ГОСПОДАРСЬКИМИ ОЗНАКАМИ

О. В. Тригуб

*Устимівська дослідна станція рослинництва Інституту рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН
України, с. Устимівка, Полтавська область, e-mail: trygub_oleg@ukr.net*

Формування колекцій сільськогосподарських культур має не лише фундаментальне значення для збереження генетичного різноманіття наявної флори Землі, воно має важливе прикладне значення для дослідницьких, і особливо селекційних, програм як джерело вихідного матеріалу (Рябчун та ін., 2022). Цінність зразків колекції визначається наявною інформацією про генофонд, ступенем його вивчення та оцінки в контрастних умовах середовища (Рябчун та ін., 2014). Україна має один із найбагатших банків генетичних ресурсів рослин обсягом понад 154 тис. зразків. Дублетна колекція насіння Національної колекції генетичних ресурсів рослин зберігається в Устимівській дослідній станції рослинництва Інституту рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН (Полтавська обл.). Поряд з накопиченням і збереженням насіннєвого фонду проводиться широке вивчення матеріалу колекції за комплексом господарських і селекційно цінних ознак. Частиною колекції станції є зібрання генетичного різноманіття гречки звичайної (*Fagopyrum esculentum* Moench.) та її диких споріднених видів (Тригуб, 2016). Щорічно проводиться комплексне вивчення до 100 зразків колекції з дотриманням вимог методичних стандартів. Дослідження проводяться для опису матеріалу – рівнів прояву біологічних (тривалість вегетації та її періодів, реакція на умови середовища тощо) та морфологічних (будова рослини та її органів) характеристик, які слугують ідентифікаторами колекційного матеріалу. Також проводиться вивчення господарських показників та технологічних властивостей.

Вивчення дослідного матеріалу проводиться за ознаками: урожайність, продуктивність рослини (кількість зерен, вага зерна), кількість суцвіть та гілок на рослині, висота рослини, крупність зерна (маса 1000 зерен) та ін. Визначено індексні характеристики – озерненість суцвіть та індекс насіннєвої продуктивності. Отримані результати проаналізовані із застосуванням варіаційної статистики (середнє значення, граничні рівні варіювання, коефіцієнт варіації) та ін.

Рівень прояву ознаки урожайності має значне варіювання в змінних умовах середовища, через свою багатокомпонентність, але дозволяє провести диференціацію матеріалу колекції з визначенням потенціалу ознаки. За період 2021–2025 років, високою урожайністю (понад 250 г/м² і варіюванням не нижче 200 г/м²) вирізнялась група зразків колекції. Це в основному сучасний сортовий – Покровська (Київська обл.), Арно (Канада), Сімка, Оксана, Ювілейна 100 та Ярославна (Сумська обл.) та селекційний – КДМ-9-16, КДС-22-23, КДС-20-23, КДС-19-23 (Сумська обл.), П-470, П-609 (Полтавська обл.), Зеленоквіта 8/19 (Київська обл.) та інший матеріал. Сорти стандарти вирізнялися середнім, але стабільним рівнем урожайності: с. Українка – 217 г/м² та с. Софія – 226 г/м².

Зважаючи на значну залежність рівня урожайності від продуктивності рослини, маси 1000 зерен та озерненості суцвіть, ці характеристики є обов'язковими про дослідженні колекцій. У гречки продуктивність рослини може варіювати в значних межах (особливо у матеріалу місцевого походження) і прийнятною вона вже є починаючи з 3,0 г/рослина. За роки вивчення середній і високий рівень продуктивності відзначено у зразків Покровська та Зеленоквіта 8/19 (Київська обл.), КДС-22-23, КДС-20-23, КДС-19-23, Оксана, Сімка (Сумська обл.), УС0101183 (Закарпатська обл.), П-470, П-383, П-192, П-375, П-158, П-332, П-609 (Полтавська обл.), М НФ-84Б (Хмельницька обл.), Собо (Канада), УС0100607 (Харківська обл.), УС0100361 (Польща) та ін. Досить високим рівнем продуктивності вирізнялися сорти стандарти – Українка – 2,10 г та Софія – 1,90 г.

Ознака кількості суцвіть на рослині має значну залежність від типу росту рослини – індетермінант чи детермінант. Індетермінанти мають більш подовжені вегетативний і генеративний періоди і формують зазвичай більшу кількість суцвіть. Більш об'єктивною характеристикою є озерненість суцвіття (вага сформованих зерен на суцвітті). У зразків групи вивчення варіювання рівня ознаки було значним. Понад 3,0 г/суцвіття мали зразки Надежда (Хмельницька обл.), Покровська, Воля, Червоноквіта, Зеленоквіта 8/19 (Київська обл.), UC0101896 (Рівненська обл.), UC0101892 (Одеська обл.), П-192 (Полтавська обл.), Арно (Канада) та ін., високим рівнем озерненості вирізнялися сорти стандарти – Українка (2,6 г) та Софія (2,8 г).

До важливих для переробної промисловості показників належать крупність зерна, його вирівняність, пливчастість тощо. Маса 1000 зерен (крупність) є досить сильно обумовленою генотипом ознакою. До зразків із технологічно доцільною крупністю (в межах 28–31 г/1000 зерен) належать – П-353, П-441, П-426, П-365, П-169, П-383, П-192, П-190 (Полтавська обл.), КЗС-24-23, КЗС-22-23, Селяночка, РС-10-13, РС-9-13, Оксана, Сімка, Зоряна (Сумська обл.), Глорія (Львівська обл.), Детермінант 1/19, Зеленоквіта 8/19, Покровська (Київська обл.), Арно (Канада), UC0101174 (Закарпатська обл.), UC0100352 (Хмельницька обл.) та ін. Сорти стандарти мали масу 1000 зерен на рівні – 28,1 г у с. Українка та 27,6 г у с. Софія.

Висота рослини є також технологічною характеристикою для гречки. Вона визначає тип росту рослини і є для більшості сортів ознакою стійкості до абіотичних чинників середовища. Особливо цінною для селекційної практики є поєднання низькорослості та продуктивності. До групи зразків із висотою рослини до 100 см і продуктивності понад 1,5 г/рослина належать – П-441, П-358, П-450, П-156, П-371, П-169, П-383, П-192, П-597, П-194 (Полтавська обл.), РС-10-13, РС-9-13, Зоряна, Крупинка (Сумська обл.), Надежда (Хмельницька обл.), UC0102238 (Ізраїль), Ольга, Червоноквіта (Київська обл.), UC0100808 (Житомирська обл.) та ін. У сортів стандартів рівень вираження ознаки був 126 см у с. Українка та 84 см у с. Софія.

До технологічних характеристик рослини належить розмір першого (нижнього) міжвузля, що визначає потенційну стійкість до вилягання рослини. Міжвузля повинне бути коротким і товстим. Серед досліджуваного матеріалу виділені зразки із коротким (до 6 см) і товстим (понад 1,0 см) нижнім міжвузлям – Детермінант 1/19, Червоноквіта, Українка, СИН 3/02, Ольга, Рута, Надійна (Київська обл.), Оксана, Сумчанка (Сумська обл.), П-169, П-445, П-614 (Полтавська обл.), UC0100808 (Житомирська обл.), Арно, (Канада) та ін.

Весь перелічений вище матеріал є джерелами окремих чи комплексу ознак, що вже знайшли своє використання в селекції. Частина з них є сортами придатними для вирощування у виробничих мовах.

ЛІТЕРАТУРА

- Рябчун В.К., Кузьмишина Н.В., Богуславський Р.Л. *Генетичні ресурси рослин*, 2022. № 30. С. 11–21.
Рябчун В.К., Кузьмишина Н.В., Богуславський Р.Л. та ін. *Генетичні ресурси рослин*, 2014. № 14. С. 5–21.
Тригуб О.В. *Сортовивчення та охорона прав на сорти рослин*, 2016. № 1. С. 45–49.

ФЕНОЛЬНІ СПОЛУКИ ЕХІНАЦЕЇ ПУРПУРОВОЇ ПРИ КАДМІЙ-ІНДУКОВАНОМУ ГОРМЕЗИСІ ТА ОКИСНЮВАЛЬНОМУ СТРЕСІ

В. С. Феденко

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна,
e-mail: opticlaf.fedenko@gmail.com*

Інтегрованість реакцій рослин на дію металів включає захисну роль спеціалізованих метаболітів з антиоксидантними та хелатувальними властивостями, які зумовлюють детоксикацію та підвищення толерантності (Asiminicesei et al., 2024). Серед метаболітів із захисними функціями розглядають фенольні сполуки, для яких встановлена залежність акумуляції залежно від дози металу (Wang et al., 2023). Дозова залежність прояву фізіологічної відповіді рослин на дію металу включає стадію гормезису (стимулювання при малих концентраціях) і стан окиснювального стресу, який характеризується пригніченням ростових процесів та акумуляції захисних метаболітів (Carvalho et al., 2020). У контексті розвитку концепції нелінійних ефектів відповіді не з'ясовано вплив металів на зміни фенольних метаболітів при різних функціональних станах рослин. Якщо підвищене накопичення фенольних сполук за дії металів розглядають як маркерну ознаку адаптивних змін (Carvalho et al., 2020), то одним із маркерів стресу може бути окиснювальна модифікація фенольних метаболітів, що проявляється в побурінні тканин кореня як неспецифічна реакція рослинного організму на токсичну дію. Для бурого пігменту підтверджена полімерна структура, що включає окиснені форми коричневих кислот, які зв'язані з лігніном і суберином у клітинних стінках (Franke, Schreiber, 2007). У разі метал-індукованої токсичності функція суберину полягає в блокуванні надходження металу в цитоплазму (Chen et al., 2022). Оскільки виділення цього пігменту може призвести до руйнації його нативної структури, для ідентифікації *in vivo* доцільно використовувати неруйнівні методи, такі як твердофазна спектрофотометрія у видимому діапазоні (Fedenko, Shemet, 2012).

Серед тест-об'єктів із підвищеним накопиченням фенольних метаболітів розглядають ехінацею пурпурову *Echinacea purpurea* (L.) Moench з урахуванням перспективності для фіторе mediaції територій, забруднених сполуками металів (Pretorius et al., 2018). Як репрезентативний поліютант серед важких металів привертає увагу кадмій, зважаючи на його токсичність для біоти. Крім того, іони кадмію можуть бути одними з екзогенних абіотичних еліситорів накопичення біологічно активних сполук у суспензійній культурі клітин *E. purpurea* (Açikgöz et al., 2018). Разом з тим дозовий ефект Cd^{2+} на ростові процеси та накопичення спеціалізованих метаболітів *E. purpurea* на стадіях гормезису та окиснювального стресу не досліджено.

Мета – дослідити дозові залежності показників росту та накопичення фенольних сполук рослин ехінацеї пурпурової за умов дії йонів кадмію різних концентрацій.

Вплив іонів кадмію у діапазоні концентрацій 0–1 мМ досліджували в модельному експерименті на проростках ехінацеї пурпурової. Ефект Cd^{2+} оцінювали за лінійним розміром коренів та надземної частини. Паралельно вимірювали довжину зони кореня із бурю пігментацією як показник окиснювального стресу. Ефект токсичної дії Cd^{2+} визначали за індексом толерантності, а також за відносним числом тест-рослин із наявністю бурю пігментації коренів та відносною довжиною цієї зони (Fedenko, Shemet, 2012). Загальний вміст гідроксикоричневих кислот (основного компонента фенольних сполук *E. purpurea*) визначали спектрофотометричним методом у розрахунку на відносний вміст цикорієвої кислоти (у відсотках на суху масу). Спектри відбиття коренів отримували в діапазоні 350–800 нм на спектрофотометрі Specord M40, додатково обладнаному приставкою з фотометричною кулею і касетою «Data Handling I» для математичної обробки результатів вимірювання, що дозволило проводити згладжування спектральних кривих із виключенням випа-

дкових шумових піків. Інтенсивність спектрів відбиття наводили в одиницях абсорбції. Для встановлення дозових залежностей показників використовували регресивний аналіз. Адекватність рівнянь регресії визначали за величиною коефіцієнта детермінації.

Встановлено суттєвіше пригнічення росту кореня порівняно із надземною частиною (3,1–68,2 % та 10,0–37,1 % відповідно), що зумовлено зниженням транслокації Cd^{2+} в тканинах завдяки бар'єрній функції кореневої системи. Виявлено нелінійний дозовий ефект різних концентрацій Cd^{2+} на накопичення гідроксикоричних кислот у коренях та надземній частині тест-рослин. Така тенденція проявлялась у формі оберненої U-подібної кривої, яка відповідала рівнянню регресії полінома другого ступеня, та спостерігалась до певної граничної концентрації Cd^{2+} залежно від ступеня токсичного впливу на органи рослин. Для коренів у разі суттєвішого токсичного впливу Cd^{2+} ефект гормезису в накопиченні фенольних метаболітів спостерігався при меншій концентрації йона металу порівняно із надземною частиною (від 0,025 до 0,25 мМ Cd^{2+} на 17,6–49,4 % та від 0,025 до 0,5 мМ Cd^{2+} на 30,6–104,1 % відносно контролю відповідно). Розраховано залежності показників росту вегетативних органів як параболічна функція від вмісту в них захисних метаболітів на фоні різних концентрацій іонів металу, що підтвердило координованість ростових процесів та адаптивних метаболічних змін. У такому випадку доза токсиканту використана опосередковано як фактор, що спричинив індуковані метаболічні зміни, на відміну від відомого підходу щодо аналізу окремих дозових залежностей параметрів росту або маркерів адаптивних змін (Calabrese, Agathokleous, 2021).

При зниженні індексу толерантності на фоні збільшення концентрації Cd^{2+} відбувалась поступова зміна тенденцій: зниження ефекту гормезису та підсилення окиснювального стресу. Як маркери підсилення окиснювального стресу виявлено підвищення кількості тест-рослин із бурою пігментацією кореня та відносною довжини цієї зони. Оскільки у разі Cd^{2+} -індукованої фітотоксичності роль цього полімерного пігменту полягає у блокуванні надходження металу в цитоплазму, можна стверджувати про наявність координованої метаболічної адаптації залежно від дози токсиканту.

Ідентифікація бурого пігменту, який утворюється в коренях *de novo* внаслідок окиснювальної модифікації фенольних метаболітів, проведена із використанням твердофазної спектrophотометрії у видимому діапазоні. У спектрі відбиття коренів контрольного варіанта спостерігались максимуми при 416 та 470 нм. Утворення бурого пігменту в коренях дослідного варіанта (концентрація 1 мМ Cd^{2+}) спричинило батохромне зміщення максимумів до 419 та 540 нм відповідно. При цьому відзначено розширення довгохвильової смуги, що характерно саме для супряжених хроміфорних систем полімерної природи.

Отримані результати розширюють уявлення щодо явища гормезису при адаптації рослин до стресорної дії металів, координованої зміни адаптивних стратегій та захисних механізмів металотійкості. Запропоновані методичні підходи можуть бути застосовані у подальших дослідженнях фізіології стресу для стимулювання розвитку рослин за умов праймінгу екзогенними елісіторами.

ЛІТЕРАТУРА

- Açikgöz M.A., Yarılgac T., Kara Ş.M. *Indian J. Pharm. Educ. Res.* 2018. 52: 140–145.
Asiminicesei D.M., Fertu D.I., Gavrilescu M. *Plants*. 2024. 13: 913.
Calabrese E.J., Agathokleous E. *Environ. Pollut.* 2021. 274: 116526.
Carvalho M.E., Castro P.R., Azevedo R.A. *J. Hazard. Mater.* 2020. 384: 121434.
Chen A., Liu T., Wang Z., Chen X. *Front. Plant Sci.* 2022. 13: 1056008.
Fedenko V.S. *J. Chem. Technol.* 2025. 33: 43–52.
Fedenko V.S., Shemet S.A. *Fiziologiya i Biokhimiya Kul'turnykh Rastenij*. 2012. 44: 434–439.
Pretorius T.R., Charest C., Kimpe L.E., Blais J.M. *PloS One*. 2018. 13: e0208325
Wang B., Lin L., Yuan X., et al. *Front. Plant Sci.* 2023. 14: 1088285.

ЕКОЛОГІЧНА ПЛАСТИЧНІСТЬ СЕЛЕКЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ СОЇ ЯК КРИТЕРІЙ ДОБОРУ ГЕНОТИПІВ, АДАПТОВАНИХ ДО АБІОТИЧНИХ СТРЕСІВ

П. В. Чернишенко, А. О. Василенко, В. О. Скидан, О. М. Глибокий

*Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН України, Харків Україна,
e-mail: chernko83@gmail.com*

Сучасні тенденції зміни клімату, що супроводжуються збільшенням тривалості посушливих періодів, нерівномірним розподілом атмосферних опадів та зростанням частоти екстремальних погодних явищ, істотно впливають на продуктивність сої. Для України проблема адаптації сортів до мінливих умов набуває особливого значення, оскільки нестабільність погодних факторів призводить до значного варіювання урожайності та показників якості насіння.

Пріоритетним напрямом селекції сої є створення сортів, здатних забезпечувати стабільний рівень продуктивності та якості насіння за мінливих умов вирощування. Одним із найінформативніших критеріїв оцінки такого потенціалу є екологічна пластичність, що характеризує здатність генотипу гнучко реагувати на зміну факторів середовища та забезпечувати стабільну реалізацію цінних господарських ознак.

Метою дослідження було оцінити селекційний матеріал сої за показниками екологічної пластичності та стабільності врожайності, вмісту білка й олії та виділити генотипи з високим адаптивним потенціалом.

Дослідження проводилися у 2021 р. та 2023–2025 рр. на полях наукової сівозміни Інституту рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН, в умовах типових для східної частини Лісостепу України. Експериментальними об'єктами були селекційні номери конкурсного сортовипробування (КСВ) та перспективні селекційні лінії. Реакцію генотипів на мінливість умов вирощування визначали за коефіцієнтом пластичності (b_i), варіансою стабільності (Si^2) та індексом умов року (I_j).

Встановлено, що найсприятливіші умови для формування продуктивності сої склалися у 2023 р., коли середня врожайність становила 2,55 т/га, а індекс умов року (I_j) – 1,17. Найнижчу врожайність (0,88 т/га) отримано у 2024 р. за значення індексу умов року – 0,56. Водночас 2024 рік виявився найбільш сприятливим для накопичення білка та олії в насінні: середній уміст білка становив 40,1 % ($I_j = 3,34$), олії – 18,7 % ($I_j = 0,75$), а сумарний уміст білка й олії – 58,8 % ($I_j = 1,59$). Найменші значення вмісту білка (36,4 %, $I_j = -0,50$) і сумарного вмісту білка й олії (55,7 %, $I_j = -0,86$) відзначено у 2023 р., тоді як найнижчий уміст олії (18,4 %, $I_j = 0,64$) – у 2025 р. Отримані результати свідчать, що погодні умови по-різному впливають на формування врожайності та показників якості насіння сої.

Аналіз отриманих результатів свідчить про наявність істотної диференціації за ступенем прояву ознак урожайності та показників якості насіння залежно від умов року вирощування. Найбільш перспективним генотипом виявився КСВ 55-18, який поєднував високу пластичність за врожайністю, вмістом білка та олії. Лінія Л 149 характеризувалася високою пластичністю за врожайністю і вмістом білка. Лінії Л 18-17, Л 721-23, Л 732-23, Л 778-21 та Л 795-23 проявили високий рівень пластичності за показниками якості насіння, тоді як КСВ 17-19, КСВ 35-19 та Л 2-21 поєднували високу пластичність за врожайністю із підвищеним сумарним вмістом білка й олії.

Практична цінність дослідження полягає у виділенні генотипів, які можуть бути використані як батьківські компоненти в селекційних програмах. Застосування показників екологічної пластичності та стабільності дозволяє підвищити ефективність добору та прогнозувати поведінку генотипів в умовах зростаючого впливу абіотичних стресів.

Отримані результати підтверджують ефективність комплексної оцінки селекційного матеріалу сої за показниками продуктивності та якості насіння й обґрунтовують використання показників екологічної пластичності та стабільності для добору генотипів у селекції на стійкість до абіотичних стресів.

**ФОРМУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ СТРУКТУРИ ВРОЖАЮ ЯРОГО ТРИТИКАЛЕ
ЗА ВЕСНЯНОГО ТА ОСІННЬОГО ПОСІВУ**

**С. В. Чернобай, В. С. Мельник, В. К. Рябчун, Т. Б. Капустіна,
О. Є. Щеченко**

*Інститут рослинництва ім. В. Я. Юр'єва НААН України, Харків, Україна,
e-mail: melnik.triticale@gmail.com*

В останні десятиліття в Україні відзначається небезпечна тенденція до збільшення повторюваності посух. Кількість вологи, що надходить на територію України, не зменшилася, але змінився характер атмосферних опадів. Дощі випадають істотно рідше й часто мають зливовий характер. Кількість води, що надходить на поля у дуже короткий проміжок часу, фізично не може бути поглинута орним шаром і стікає, збільшуючи ерозію ґрунту (Писаренко та ін., 2019). Україна зазнає сильних посушливих умов кожних два-чотири роки. Посуха являє собою найбільш характерну небезпеку для сільськогосподарського сектору (Walz et al., 2018). На стадії проростання посуха спричиняє нерівномірну появу сходів, погіршує мінеральне живлення, пригнічує ріст надземних частин. На стадії кушіння формується менше продуктивних пагонів, знижується інтенсивність фотосинтезу, скорочується період проходження фенологічних фаз. Посуха під час колосіння призводить до зменшення кількості зерен у колосі. Під час цвітіння нестача вологи негативно впливає на фертильність та життєздатність гамет, а під час дозрівання зерна, пригнічує поділ клітин ендосперму та погіршує якість зерна (Сидоренко та ін., 2020). Тому важливим завданням землекористувачів є пошук та впровадження ефективних прийомів із накопичення й раціонального використання наявних запасів вологи у ґрунті.

Одним із таких агроприйомів є зміщення строків сівби з метою запобігання збігу критичних фаз розвитку рослин з посухою та для кращого вологозабезпечення. Пізньоосіння сівба ярих зернових (підзимній посів) дозволяє рослинам використати зимові та ранньовесняні запаси вологи, які втрачаються до початку весняної посівної (Hall, 2013). Сівба ярих зернових восени також використовується за несприятливих погодних умов для сівби озимої пшениці, щоб зберегти структуру посівних площ зернових культур. Для використання зимової вологи на Півдні України практикується сівба у «лютневі вікна» – під час відлиги у лютому, переважно для тритикале (Чернобай, 2019). Серед ярого тритикале для цих агрозаходів рекомендується сорт Борівітер харківський (Леонов та ін., 2025).

Яре тритикале є високоадаптивною культурою, що зумовлюється її високою холодостійкістю, невибагливістю до ґрунтів, толерантністю до небажаних попередників та конкурентною здатністю щодо бур'янів. Ця культура вирощується в усіх агрокліматичних зонах України, за різних агротехнологічних умов (Rozhkov, 2014; Klima et al., 2015). Враховуючи біологічні та господарські властивості, доцільним є вивчення можливості пізньоосінньої (підзимньої) сівби ярого тритикале. У зв'язку з цим, порівняльна оцінка формування врожайності та елементів структури врожаю сортів ярого тритикале за весняної та осінньої сівби є актуальним науково-практичним завданням для оптимізації елементів технології вирощування.

Метою досліджень було порівняння врожайності та основних елементів структури врожаю у сучасних сортів ярого тритикале за весняної та пізньоосінньої сівби в умовах східної частини Лісостепу України.

Дослідження проводили у сезон 2024/25 рр. на селекційній базі Інституту рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН, розташованій у східній частині Лісостепу України. Ґрунт – потужний слабо вилужений чорнозем на пиловато-суглинистому лесі. Обробіток ґрунту – дискування, закриття вологи та передпосівна культивування. Добрива не вносили. Попередник – чорний пар. Сівбу сортів ярого тритикале Борівітер харківський (стандарт), Булат харківський, Свобода харківська та ІР Легіт проводили у два строки: осінній – друга декада жовтня 2024 р. та весняний – третя декада квітня 2025 р. на ділянках площею 5 м² у дворазовій повторності. Норма висіву 4,5 млн. схожих насінин/га. Визначали висоту рослин, урожайність та елементи її структури (продуктивна кущистість, довжина колосу, кількість та маса зерен з колосу за методикою проведення кваліфікаційної експертизи (Київ, 2016). Масу 1000 зерен визначали за ДСТУ 4138-2002.

Погодні умови сезону 2024/25 рр. були задовільними для осінніх посівів тритикале та вкрай несприятливими – для весняних. Друга половина літа та вся осінь 2024 р. пройшла в умовах жорсткої посухи, тому осіння сівба проводилася у сухий ґрунт. У листопаді температура повітря (+2,7°C) була на

1,1°C вищою від норми, а кількість опадів (48 мм) – близькою до середніх багаторічних показників. Зимовий період був аномально теплим (середньомісячна температура повітря на 2,0–2,5°C вища за норму) зі значним дефіцитом вологи (55 % від норми). Найнижчі нічні температури фіксувалися у січні й досягали -12 – -14°C. Сніговий покрив переважно був тонкий з частими та тривалими відлигами. У період весняної та літньої вегетації тритикале спостерігались підвищена температура повітря та нерівномірні опади. За період з березня по липень 2025 р. сума активних температур становила 1957,8°C, що на 352,8°C більше від середньої багаторічної кліматичної норми. Сума опадів за цей час становила 194 мм, що на 55 мм менше від норми. При цьому опади були нерівномірними, зливи чергувались з тривалими періодами посухи під час критичних етапів органогенезу ярого тритикале за весняного висіву. Сильна посуха спостерігалась у I декаді травня (ГТК = 0,34) у період кушіння, у II декаді червня (ГТК = 0,35) у період колосіння та у I декаді липня (ГТК = 0,36) у період наливу зерна.

У середньому за сортами у варіанті осіннього висіву спостерігався істотно вищий прояв урожайності та більшості її елементів. Висота рослин становила 110–120 см. Густота продуктивного стеблестого 434–623 шт./м², найвищою вона була у сорту ІР Легіт, а найнижчою – у сорту Булат харківський. Середня довжина колоса становила 12,6 см. Найдовший колос мали сорти ІР Легіт (13,2 см) та Булат харківський (13,1 см). Залежно від сорту колос формував 30–35 колосків. Кількість зерен із колоса становила 58–105 шт., а маса зерна з колоса залежно від сорту варіювала від 3,24 до 5,50 г. Кращим за кількістю та масою зерна з колоса був сорт Свобода харківська. У всіх сортів спостерігалось формування високої маси 1000 зерен: від 52,5 г у сорту Свобода харківська до 58,0 г у сорту Булат харківський. Найвищу врожайність зерна мав сорт Булат харківський – 8,10 т/га. У стандарту Борівітер харківський урожайність становила 7,00 т/га. Сорти Свобода харківська та ІР Легіт поступались стандарту, їх урожайність становила відповідно 6,50 та 5,80 т/га.

У варіанті весняної сівби висота рослин становила від 81 см у сорту Свобода харківська до 91 см у сорту Борівітер харківський. Густота продуктивного стеблестого варіювала від 350 до 574 шт./м², найвищою вона була у сорту Борівітер харківський. Найдовший колос мав сорт Булат харківський (10,0 см), а найкоротший – сорт Свобода харківська (8,5 см). При цьому колос сорту Свобода харківська відрізнявся високою щільністю та формував найбільшу кількість колосків у колосі (26 шт.) та кількість зерен у колосі (59 шт.). У інших досліджуваних сортів кількість колосків у колосі, яка становила 24–25 шт., а озерненість 40–44 шт. Маса зерна з колоса варіювала від 1,84 до 2,34 г. Найвищою вона була у сортів Булат харківський (2,34 г) та Свобода харківська (2,33 г). Середня за сортами врожайність зерна становила 3,14 т/га. Найвищу врожайність формували сорт Свобода харківська (3,40 т/га). Урожайність сорту Булат харківський становила 3,20 т/га, сорту ІР Легіт – 3,10 т/га, сорту Борівітер харківський – 2,85 т/га.

Таким чином, в умовах жорсткої весняної та літньої посухи і теплої зими, пізня осіння сівба ярого тритикале забезпечила кращі умови для формування цінних господарських ознак. У середньому за сортами урожайність підвищувалась на 3,21 т/га. Елементи структури врожаю мали істотно вищі показники за осінньої сівби. Найбільш придатним для пізньоосінньої сівби є сорт Булат харківський, який за цього строку формували високу врожайність (8,10 т/га), перевищуючи раніше відомий для даного агрозаходу сорт Борівітер харківський на 1,10 т/га. Порівняно з весняною сівбою сорт Булат харківський підвищував урожайність на 4,90 т/га.

Виділено сорти Свобода харківська та Булат харківський, які за весняного посіву в посушливих умовах формували вищий рівень врожайності – відповідно 3,40 та 3,20 т/га, за врожайності стандарту Борівітер харківський 2,85 т/га.

ЛІТЕРАТУРА

- Писаренко В.М. та ін. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2019. 1:134–146.
- Walz Y. et al. *Policy Report / UNU-EHS*. 2018. 3. 31.
- Сидоренко М.В. та ін. *Вісн. Одес. нац. ун-ту. Біологія*. 2020. 25. 1 (46):67–87.
- Hall R.-M. *Current Trends in Agronomy for Sustainable Agriculture*. 2013. 110–120.
- Чернобай С.В. *Корми і кормовиробництво*. 2019. 88:43–49.
- Леонов О.Ю. та ін. *Каталог сортів і гібридів польових культур*. Харків, 2025.
- Rozhkov A.O. *Scientific Progress & Innovations*. 2014.1:17–21.
- Klima K. et al. *J. Res. Appl. Agric. Eng.* 2015. 60(3):142–145.

**ІННОВАЦІЙНА СИСТЕМА «СМАРТ СЕЛЕКЦІЇ» ЗЕРНОВИХ
І ЗЕРНОБОБОВИХ КУЛЬТУР**

В. В. Чернуський

*Інституті біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України, м. Київ, Україна,
e-mail: vadimchernuskiy_58@ukr.net*

В Інституті біоенергетичних культур і цукрових буряків під керівництвом академіка М.В. Роїка розроблена парадигма «смарт-селекції», яка насамперед відрізняється тим, що демонструє перехід від класичного аналізу даних до систем, які працюють із багатовимірними просторами станів, динамічними графами зв'язків та самоадаптивними моделями. Для сучасної селекції рослин це означає можливість перейти від простого порівняння параметрів величин компонентних ознак до побудови цифрових фазових просторів «генотип–фенотип–середовище–епігеном». У такій системі кожен селекційний зразок гороху, проса, пшениці чи буряку може бути представлений не окремим набором ознак, а траєкторією у багатовимірному просторі адаптивності. Тоді селекційний процес перетворюється на завдання з пошуку оптимальних атракторів фенотипу. Формально це можна описати через вектор стану: $\mathbf{X}(t) = [\mathbf{G}, \mathbf{E}, \mathbf{P}, \mathbf{Epi}, \mathbf{T}]$, де $\mathbf{G}$ — генетичний блок параметрів, $\mathbf{E}$ — параметри середовища, $\mathbf{P}$ — фенотипові характеристики, $\mathbf{Epi}$ — епігенетичні модифікації, $\mathbf{T}$ — часовий онтогенетичний фактор. Тоді еволюція селекційного зразка в часі може бути описана системою: $d\mathbf{X}/dt = \mathbf{F}(\mathbf{X}, t)$, де $\mathbf{F}$ — нелінійна функція адаптивної динаміки. Саме така модель відкриває шлях до створення цифрових двійників сортів та селекційних популяцій.

Подібну багатовимірну мультиколінеарну об'єднану систему AMMI та GGE biplot аналізів для обробки результатів екологічного випробування гороху, що не виключають один одного, а навпаки, надають більш розгорнуту і повну інформацію про результати дослідження наведено в публікації (Василенко та ін., 2025).

У практичному аспекті така філософія формує нову архітектуру селекційного процесу: цифрове фенотипування → формування гіперматриць → побудова фазових портретів → моделювання адаптивних ландшафтів → прогноз траєкторій популяції → оптимізація добору через алгоритми штучного інтелекту. Таким чином, селекція перетворюється з емпіричного мистецтва на високоточну систему керування біологічною еволюцією культурних рослин.

Зокрема на нашій платформі структура інноваційної селекції включає декілька взаємопов'язаних блоків. Перший блок — точне фенотипування, де цифрове зображення рослини перетворюється на математичну матрицю параметрів. У цьому випадку рослина описується числовими векторами ознак:

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3 \dots x_n],$$

де $x_1 \dots x_n$ — морфометричні, колірні, текстурні, спектральні та часові характеристики. Далі формується гіперматриця: $\mathbf{H}(i, j, k, t)$, де i — генотип, j — ознака, k — умови середовища, t — час розвитку. Саме така структура дозволяє перейти від локального аналізу до цифрового двійника популяції або сорту. У сучасній феноміці та цифровій агробіології подібні підходи вже вважаються основою майбутньої селекції.

Другий блок — математичне моделювання адаптивного простору. У такій системі селекційна популяція розглядається як динамічний потік у фазовому просторі:

$$d\mathbf{X}/dt = \mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{E}, t),$$

де $\mathbf{F}$ — функція еволюції системи. Тут виникає поняття атрактора селекції — області фазового простору, до якої прагне популяція під впливом добору. Якщо класична селекція фактично працювала емпірично, то інноваційна селекція намагається прогнозувати траєкторії руху популяції до

оптимального адаптивного стану. Саме тому особливого значення набувають нейромережі, генетичні алгоритми, марковські процеси, аналіз Ляпунова та інші методи штучного інтелекту.

Відповідно до цих методів у практичних селекційних моделях нами застосована агентна архітектура, яка може перетворити селекційний процес на багаторівневу систему цифрових асистентів. Один агент аналізує RGB-зображення рослин і формує гіперматрицю ознак; другий будує фазово-параметричний портрет; третій прогнозує реакцію на стрес; четвертий перевіряє відповідність моделі польовим даним. Це відповідає ідеї «цифрового двійника» морфотипу гороху, проса чи пшениці.

Ще більш перспективним є поєднання таких систем із адаптивними поверхнями Уоддінгтона. У класичному вигляді ландшафт Уоддінгтона описує рух організму по «долинах» розвитку. У селекції це можна перетворити на поверхню селекційної оптимізації:

$$W(x,y,z)=f(G,E,Epi),$$

де координати поверхні описують стани фенотипу. Тоді локальні мінімуми стають атракторами стабільних адаптивних сортів. При використанні цифрових двійників і нейромереж можливо моделювати переходи між цими атракторами під дією стресових факторів. Саме це відкриває шлях до епігенетичної селекції, де стрес використовується не як випадковий негативний чинник, а як механізм спрямованого переведення популяції в новий адаптивний стан.

Так в межах практичної селекції нами проведена диференціація селекційних зразків на ніші інтенсивних і пластичних сортів, керуючись розумінням, що у парадигмі «смарт селекції» — це не просто агрономічні категорії, а різні області в фазово-параметричному просторі адаптивності, які відповідають різним типам реакції системи «генотип → морфогенез → продуктивність» на екоградієнт. Формально це можна описати через функцію продуктивності як функцію середовища:

$$Y(G,E) = \mu(G) + \beta(G) \cdot E + \gamma(G) \cdot E^2 + \varepsilon,$$

де Y — врожайність, $\mu(G)$ — потенціал сорту (genetic yield potential), $\beta(G)$ — коефіцієнт пластичності (slope of reaction norm), $\gamma(G)$ — стабілізаційний параметр (curvature), ε — випадкова складова. У цьому представленні інтенсивні сорти мають високий $\mu(G)$, але також високий $\beta(G)$, тобто різко реагують на покращення умов, тоді як пластичні сорти характеризуються помірним $\mu(G)$, але низьким $\beta(G)$ і мінімальним $\gamma(G)$, що забезпечує стабільність у широкому діапазоні екоградієнтів.

Зокрема у сучасній світовій селекції подібні підходи вже переходять у концепцію AI-driven breeding — селекції, керованої штучним інтелектом, де нейромережі аналізують величезні масиви фенотипових та геномних даних для прогнозу селекційної цінності і адаптивності генотипу в умовах дії стресових факторів (Hiei et al., 2014; Fahad S. et al., 2017; Seleiman M.F. et al. 2021; Grossman, 2023).

Таким чином, теоретично обґрунтована і неодноразово апробована на практиці парадигма «смарт-селекції» зернових і зернобобових культур заслуговує на подальше застосування у широкій селекційній практиці в т.ч. для пришвидшення процесу добору в селекції рослин на 10–15 %.

ЛІТЕРАТУРА

- Василенко А.О. та ін. *Селекція і насінництво*. 2025. № 127.
Fahad S. et al. *Frontiers in Plant Science*. 2017. DOI: 10.3389/fpls.2017.01147
Grossman J.J. *New Phytologist*. 2023. DOI: 10.1111/nph.18617
Hiei Y., Ishida Y., Komari T. *Frontiers in Plant Science*. 2014. DOI: 10.3389/fpls.2014.00628
Seleiman M.F. et al. *Plants*. 2021. DOI: 10.3390/plants10020259

**ПРАЙМІНГ МЕЛАТОНІНОМ ПІДВИЩУЄ ПРОДУКТИВНІСТЬ РОСЛИН
ПШЕНИЦІ ПРИ ВИКОРИСТАННІ НАСІННЯ ЗІ ЗНИЖЕНОЮ СХОЖІСТЮ**

**М. В. Шевченко¹, Д. А. Тарабан^{1,2}, З. О. Кондакова¹, Г. А. Лугова¹,
Ю. В. Карпець¹, Ю. Є. Колупаєв^{2,3}**

¹*Державний біотехнологічний університет, Харків, Україна*

²*Інститут рослинництва ім. В. Я. Юр'єва НААН України, Харків, Україна,
e-mail: plant_biology@ukr.net*

³*Полтавський державний аграрний університет, Полтава, Україна*

Проростання насіння – перший етап у житті рослини, що має особливе значення для їх подальшого розвитку і формування продуктивності сільськогосподарських культур. Цей процес чутливий до різних чинників, включно з рівнем фітогормонів, вмістом води у насінні, його віком, а також дії різноманітних стресорів (Ali, Elozeiri, 2017). Абіотичні стреси знижують питому щільність насіння, змінюючи процес вбирання води та спричиняючи фізичні ушкодження насіннєвої оболонки. Низька і нерівномірна схожість насіння, її варіювання залежно від погодних умов та антропогенних чинників може критично лімітувати урожайність культурних рослин. Кліматичні зміни знижують схожість насіння ярих і озимих культур в Україні. Останніми роками з'явилися й інші виклики, що ставлять під загрозу формування посівів. Через активні воєнні дії з 2022 року в Україні ускладнюється проблема належного зберігання зерна, що знижує його посівні якості.

Для підвищення швидкості й однорідності проростання насіння та індукування стійкості рослин на ранніх фазах розвитку у світі дедалі ширше використовуються технології праймінгу (Paparella et al., 2015; Ibrahim, 2019). Зазвичай цим терміном визначають метод контрольованого зволоження та висушування зернівок для посилення у них передгермінативних метаболічних процесів (Колупаєв та ін., 2023). Поєднання зволоження з дією фітогормонів або стресових метаболітів може підвищувати не лише швидкість і рівномірність проростання зерна, а й стійкість рослин до стресових чинників різноманітної природи (Hasanuzzaman, Fotopoulos, 2019).

Мелатонін (N-ацетил-5-метокситриптамін) належить до індоламінів і виконує різноманітні функції в рослинах, включаючи регуляцію ризогенезу, визрівання плодів, фотосинтез, метаболізм ліпідів, вуглеводів та азотних сполук, передачу сигналів інших фітогормонів. На клітинному рівні мелатонін регулює знешкодження активних форм оксигену, бере участь в підтриманні цілісності клітинних мембран, регуляції накопичення осмолітів та інших процесах, важливих для стійкості до несприятливих чинників середовища. У чисельних дослідженнях показаний позитивний вплив праймінгу насіння мелатоніном різних видів культурних рослин на його проростання і подальший ріст рослин за стресових умов (Wang et al., 2024). Менш дослідженим залишається вплив мелатоніну на проростання насіння зі зниженими посівними якостями. Отримано дані про позитивний вплив мелатоніну на процеси проростання старіючого насіння вівса (Yan et al., 2020), кукурудзи (Deng et al., 2017; Su et al., 2018), жита і тритикале (Kolupaev et al., 2024) та різних видів бобових (Yu et al., 2021). Однак ці дослідження проведені переважно в модельних умовах.

Метою нашої роботи стало дослідження впливу праймінгу мелатоніном на польову схожість насіння озимої пшениці (*Triticum aestivum*), ростові характеристики і продуктивність рослин за використання для сівби зернівок зі зниженими посівними якостями.

Дрібноділянковий польовий експеримент проводили у 2024-2025 рр. на Дослідному полі Державного біотехнологічного університету. У роботі використовували насіння сорту Даринка київська, яке протягом трьох років зберігалось за умов нестабільної вологості і температури, і мало вихідну лабораторну схожість близько 60 %. Зернівки праймували 20 і 50 мкМ розчинами мелатоніну протягом 3 год, після чого висушували протягом доби за температури 24°C до вихідної воло-

гості. Як контрольні варіанти використовували ідентичну обробку насіння дистильованою водою (гідропраймінг) та насіння без обробки.

Гідропраймінг підвищував польову схожість насіння, яку визначали через 1 місяць після висіву насіння, на 5 % відносно варіанта без обробки насіння, водночас праймінг 20 і 50 мкМ розчинами мелатоніну підвищував цей показник на 25 % і 17 %, відповідно.

Висота рослин на початку весняної вегетації у варіанті з гідропраймінгом перевищувала контроль на 9 %, а у варіантах з 20 і 50 мкМ мелатоніном – на 17 % і 8 %, відповідно. У період молочно-воскової стиглості висота рослин у варіантах з гідропраймінгом та обробкою мелатоніном також перевищувала контроль, але лише на 3–5 %. Площа прапорцевих листків у рослин, вирощених з насіння, що піддавалося гідропраймінгу, мала лише тенденцію до збільшення порівняно з контролем (підвищення на 5 %). Водночас праймінг насіння 20 і 50 мкМ мелатоніном збільшував ці показники на 37 % і 28 %, відповідно.

На момент збирання урожаю загальна біомаса рослин у варіанті з гідропраймінгом значимо не відрізнялася від контролю, а у варіантах з 20 і 50 мкМ мелатоніном перевищувала контроль на 10 % і 7 %, відповідно. Водночас маса насіння з кожної рослини у варіанті з гідропраймінгом перевищувала контроль на 4 %, а у варіантах з обробкою насіння 20 і 50 мкМ розчинами мелатоніну – на 39 % і 19 %, відповідно. Також під впливом 20 мкМ мелатоніну відзначалася тенденція до збільшення маси 1000 насінин.

Таким чином, праймінг зернівок пшениці зі зниженими посівними якостями 20 мкМ мелатоніном істотно підвищував показники польової схожості насіння, посилював ріст рослин в період поновлення весняної вегетації та їх зернову продуктивність. Отже, пілотний експеримент засвідчив можливість пом'якшення наслідків використання при сівбі насіння пшениці зі зниженими посівними якостями за допомогою праймінгу розчинами мелатоніну. Для більш однозначних висновків необхідне масштабування експерименту і розширення спектра досліджуваних показників, які впливають на виживаність і продуктивність рослин.

Дослідження виконане в рамках проєкту «Розроблення заходів для забезпечення сталої продуктивності агрофітоценозів за впливу абіотичних і біотичних стресових факторів» (№ держреєстрації 0124U000457) за підтримки Міністерства освіти і науки України.

ЛІТЕРАТУРА

- Колупаєв Ю.Є., Шахов І.В., Кокорев О.І. (2023) *Фізіологія рослин і генетика*. 55(2): 119-141. <https://doi.org/10.15407/frg2023.02.119>
- Ali, A.S., Elozeiri, A.A. (2017) *Adv. Seed Biol.* 141-166. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.70653>
- Deng, B., Yang, K., Zhang, Y., Li, Z. (2017) *Free Radical Res.* 51(9–10): 765–771. <https://doi.org/10.1080/10715762.2017.1375099>
- Hasanuzzaman, M., Fotopoulos, V. (2019) In: Hasanuzzaman M., Fotopoulos V. (eds.), *Priming and Pretreatment of Seeds and Seedlings*. Springer Nature Singapore Pte Ltd., pp. v-vi.
- Ibrahim E.A.-A. (2019). In: Hasanuzzaman M., Fotopoulos V. (eds.), *Priming and Pretreatment of Seeds and Seedlings*. Springer Nature Singapore Pte Ltd., pp. 63-115. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8625-1_4
- Kolupaev, Yu.E., Taraban, D.A., Kokorev, A.I. et al. (2024). *Botanica*. 30(1): 1–13. <https://doi.org/10.35513/Botlit.2024.1>
- Paparella, S., Araújo, S.S., Rossi, G., et al. (2015) *Plant Cell Rep.* 34(8): 1281-1293. <https://doi.org/10.1007/s00299-015-1784-y>
- Su X., Xin L., Li Z., Zheng H., et al. (2018) *Free Radical Res.* 52(10): 1094–1109. <https://doi.org/10.1080/10715762.2018.1472378>
- Wang, L., Tanveer, M., Wang, H., Arnao, M.B. *J. Pineal. Res.* (2024) 76: e12937. <https://doi.org/10.1111/jpi.12937>
- Yan H., Jia S., Mao P. (2020) *Int. J. Mol. Sci.* 21(5): 1898. <https://doi.org/10.3390/ijms21051898>
- Yu S., Zhu X., Yang H., et al. (2021) *Sci. Rep.* 11(1): 5937. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85541-7>

THE ROLE OF MICROBIOME IN PLANT DROUGHT TOLERANCE

H. S. Andriiash, O. O. Tigonova

*Institute of Food Biotechnology and Genomics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
e-mail: aa24121982@gmail.com*

Drought stress is one of the major problems in the world. The underlying mechanisms and consequences of plant-microbiome interactions under water stress remain unclear, although it is known that drought alters the composition and diversity of soil and plant microbiomes. Plant response to drought involves metabolomic manifestations through root exudates in agricultural plants and their microbiomes. The negative impact of drought is reduced water use efficiency, production of free radicals, impaired plant growth and yield, and changes in the photosynthetic apparatus. Advances in genomics, transcriptomics, proteomics, and metabolomics have revealed complex interactions between plants and microbes, identifying microbial metabolites and signaling pathways that activate drought-responsive genes and osmoprotective mechanisms. Key aspects include the mutual exchange of metabolites (oxaloacetic acid, flavonoids, triterpenoids, phytoalexin, coumarin and pyruvic acid), osmoprotectants (proline, sugars, amino acids), antioxidant enzymes (peroxidase, catalase, superoxide dismutase) and phytohormones (salicylic acid, jasmonic acid and abscisic acid), as well as the activation of stress-responsive pathways, the importance of metabolic and chemical exchange between coexisting microorganisms for effective control of increasing drought problems (Sharma et al., 2025).

The main groups of beneficial bacteria involved in drought stress mitigation include PGPR (plant growth promoting rhizobacteria), endophytic bacteria and cyanobacteria. These microorganisms enhance drought tolerance through numerous additional pathways, such as modulation of abscisic acid and auxin signaling, deaminase activity, osmotic regulation, antioxidant defense, improved nutrient uptake, and improved soil structure and water retention. Practical application strategies include seed inoculation, soil and root application, foliar spraying, use of individual strains against microbial consortia, and advances in bioformulations and carriers that improve microbial survival and efficacy in the field (Zhakypbek et al., 2026). Drought significantly reduced both alpha and beta diversity, indicating a loss of microbial richness and evenness, as well as community homogenization. Taxonomic shifts revealed enrichment of *Cyanobacteriota*, *Cyanophyceae* and *Marileptolyngbya sina* under drought conditions. Forty-seven endophytic isolates were identified and characterized, including *Enterobacter* sp., *Bacillus* sp., *Leclercia adecarboxylata* and *Stenotrophomonas* sp. The isolated strains demonstrated traits that promote plant growth *in vitro*. Drought selectively enriches certain taxa, which may enhance plant stress tolerance through specialized metabolic functions (Halo et al., 2026). Microbial activity leads to the formation of soil aggregates that improve soil porosity and water infiltration, thereby reducing water stress. Additionally, microorganisms aid in the decomposition of organic matter, releasing essential nutrients such as nitrogen, phosphorus, and potassium in bioavailable forms, thereby reducing soil stress. Symbiotic relationships, such as mycorrhiza associations, expand the surface area of roots, improving water and nutrient uptake. PGPRs directly contribute to soil fertility through processes such as nitrogen fixation and phosphate solubilisation. Some soil microorganisms produce extracellular polysaccharides and other biofilms that help retain water and protect against soil erosion. These microbial exudates improve soil moisture content, protecting plants from drought. Resident rhizosphere bacteria, including genera such as *Bacillus*, *Pseudomonas*, and *Azospirillum*, enhance plant drought tolerance through several mechanisms: improving soil structure and water retention, modulating phytohormone levels, promoting nutrient uptake, and activating antioxidant and genetic defence pathways in plants (Etesami et al., 2026). Although microbial inoculants offer potential for drought tolerance, their low adaptability remains insufficient for environments with extreme water scarcity. Desert plants are home to unique drought-adapted microbiomes, the main taxon of which has been identified as *Pseudomonas*. Guided by interstrain interactions during biofilm assembly, a consortium of five-member synthetic communities was obtained, where QS (quorum sensing) signals promoted bio-

film formation on a community-wide scale. SynCom (synthetic communities) derived from these strains were shown to significantly improve wheat growth under drought conditions. Metagenomic analysis showed an increase in microbial functions related to biofilm formation, QS, and carbon metabolism. Community biofilm production improved strain colonization and provided greater drought tolerance compared to monocultures (Hao et al., 2026).

PGPR inoculation of the drought-stressed Egyptian wheat variety Gimmeza-9 showed significant improvement in growth parameters and stress tolerance compared to uninoculated control plants under a 10-day drought period, while *Bacillus rugosus* (MMH101) inoculation resulted in increased fresh and dry biomass, shoot and root length. PGPR treatment also increased chlorophyll and proline content (Salem et al., 2024).

Interactions between plants and microbiomes are crucial for maintaining plant health and productivity under stress, yet little is known about this interaction under drought conditions. Using wheat as a model, by combining genomics and crop-specific methods to study the interaction between soil and root microbiomes, with rhizosphere metabolomes and plant phenotypes, it was shown that under drought conditions, microbial colonization is enriched with *Streptomyces coeruleorubidus* and *Leifsonia shinshuensis*. Accordingly, genes contributing to microbial responses to drought, including N-terminal acetyltransferase, are upregulated, while reintroduction of *S. coeruleorubidus* and *L. shinshuensis* promotes host drought tolerance. Drought-induced enrichment of microbes and metabolites improves plant adaptation to abiotic stresses, potentially impacting the development of biological tools for drought mitigation (Li et al., 2025).

The effects of a PGPR consortium of five strains (*Azotobacter* spp., *Bacillus* sp., *Paenibacillus* sp., *Pantoea* sp., and *Pseudomonas* sp.) on maize (*Zea mays* L.) productivity and soil nutrient dynamics in semi-arid regions of Turkey were evaluated. PGPR application significantly improved soil organic matter content, phosphorus availability and cation exchange capacity, especially at the tassel formation stage, and provided the highest grain productivity, indicating optimized biological nitrogen fixation and water use efficiency (Kurt, 2025). The root-associated bacterial community adapts to water deficit conditions, leading to compositional and functional changes throughout the plant's life cycle. A steady decrease in the number of *Pseudomonas* sp. in the endophytic compartment was observed under conditions of no irrigation in both the vegetative and reproductive phases. Similarly, a decrease in the abundance of *Pseudomonas* sp. in the rhizoplane was observed over time, while drought stress resulted in an increase in the abundance of *Enterobacter* sp., highlighting the influence of irrigation level on the composition of bacterial communities. This shows the value of isolating bacteria directly from highly stressed environments, as such isolates are more likely to retain their beneficial properties under similar challenging conditions. Therefore, these stress-adapted bacterial strains have potential as bioinoculants to enhance plant productivity in water-limited systems (Sá et al., 2026).

The above highlights the potential of plant-microbiome interactions in adapting to water stress, suggesting that microbiome selection may be a promising strategy for developing drought-tolerant crops and improving sustainable agriculture. Having a way to tune the soil microbiome could allow crops to ignore heat, but this requires strategies to harness the microbiome, as well as strains that enhance drought tolerance (Sidik, 2026).

REFERENCES

- Sharma A. *Current Plant Biology*. 2025. 43:100513.
Zhakypbek Y. *Plants*. 2026. 15(5):753.
Halo B.A. *Sci. Rep.* 2026. 16:14519.
Etesami H. *aBIOTECH*. 2026. 7(1):100015.
Hao X. *Microbiome*. 2026. 14(1):76.
Salem. *Sustainability*. 2024. 16(11):4605.
Li J. *Cell Host & Microbe*. 2025. 33 (6): 882-900.e7.
Kurt P.O. *Sci. Rep.* 2025. 15: 22553.
Sá C. *Biology*. 2025. 14(12): 1694.
Sidik S. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2026. 123(12):e2607080123.

**EFFECTS OF PHOTOPERIODIC RESPONSE ON ABIOTIC STRESS RESISTANCE
IN NEAR-ISOGENIC WHEAT AND SOYBEAN LINES**

**O. O. Avksentieva¹, Y. D. Batueiva¹, D. V. Hlushach¹, V. B. Moskalov²,
S. I. Kolomiichuk¹, Yu. Yu. Yukhno¹**

¹*V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine, e-mail: avksentyeva@karazin.ua*

²*Municipal Institution "Kharkiv Humanitarian-Pedagogical Academy" of Kharkiv Regional Council,
Kharkiv, Ukraine*

Climate variability has significantly affected the productivity of major agricultural crops and food security due to increasing climatic instability, including frequent periods of drought, sharp temperature fluctuations, soil salinization in intensively irrigated areas, and the development of extreme weather events. According to projections, the impact of abiotic stresses in the coming decades will become one of the main factors reducing the yield of cereals and grain legumes, which necessitates the development of varieties with enhanced complex resistance. Wheat (*Triticum aestivum* L.) is one of the world's key food crops and a major component of Ukraine's agro-industrial complex, providing a significant share of the grain balance and contributing to national food security. Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) is a leguminous plant cultivated worldwide and in Ukraine for human consumption, feed production, and industrial purposes. Soybean seeds are characterized by the highest protein content among legume crops. One of the most important adaptive traits of plants is photoperiod sensitivity.

Photoperiodic response determines the timing of flowering and the length of the growing season, which directly affects plant adaptation to regional climatic conditions and the duration of vegetation. Recent studies indicate that key loci of photoperiodic regulation – genes of the PPD system (*Ppd-A1*, *Ppd-B1*, *Ppd-D1*) in wheat (Ning et al., 2023) and genes of the E system (*El-E4*) in soybean (Zheng et al., 2023) – not only control phenology (the transition from vegetative to reproductive development) but also indirectly or directly influence plant responses to abiotic stresses such as drought, high temperatures, salinity, and low temperatures. Since photoperiod is the most stable environmental factor affecting plant organisms (Roeber et al., 2022), studying the relationship between ontogenetic developmental features, metabolic mechanisms of plant adaptation under abiotic stress conditions, and genetic systems controlling photoperiodic response is important both theoretically and practically. Despite accumulated data on mechanisms of resistance to individual abiotic factors (Zheng et al., 2025; Staniak et al., 2023; Du et al., 2024), the role of genetic systems regulating development in forming resistance at early ontogenetic stages remains insufficiently studied. The lack of integrated models and clear phenotypic and molecular markers limits the effectiveness of breeding selection for resistant genotypes.

The aim of the study was to investigate the role of genetic systems of photoperiod sensitivity in major agricultural crops – wheat and soybean – in the formation of resistance to abiotic stresses, namely drought and hyperthermia. The objects of the study were near-isogenic lines (NILs) carrying photoperiod sensitivity genes of the PPD system in wheat cultivar Mercia: *Ppd-A1a*, *Ppd-B1a*, and *Ppd-D1a*. The Mercia cultivar, in the genetic background of which the isogenic lines were developed, is a UK-bred variety characterized as short-stemmed, disease-resistant, and high-yielding.

The study also used soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) cultivars and isolines from the plant collection of the Department of Plant Physiology and Biochemistry and Microorganisms at Karazin Kharkiv National University with defined photoperiodic responses. These included the short-day cultivar Smolianka, characterized by black seeds, and the day-neutral cultivar Ambella, both listed in the State Register of Plant Varieties of Ukraine, as well as soybean near-isogenic lines (NILs) from the Yuriev plant production institute of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine: the short-day line IR-903 and the day-neutral line IR-907, developed in the genetic background of the Harosoy cultivar, and NILs devel-

oped in the genetic background of the Clark cultivar, which differ in the state of specific loci of the *E*-series genes and in photoperiodic response (Agricultural Research Service, www.ars.usda.gov). The level of resistance of wheat to drought and hyperthermia was assessed using several methods, including rapid germination assays, inhibition of biomass accumulation, suppression of growth response, and determination of the temperature threshold of protein coagulation (PCT). Screening of soybean cultivars and isolines for drought and heat resistance was conducted using rapid germination assays, analysis of seedling biomass, and PCT determination. Under *in vivo* vegetation experiments, drought resistance was analyzed by assessing morphometric parameters (linear growth and biomass of aboveground and root systems) as well as free proline content in leaves and roots of experimental plants. The experiments were conducted in three biological replicates, and the obtained results were statistically processed using pairwise comparison methods, with significance of differences evaluated at $p \leq 0,05$.

According to the experimental results, all wheat near-isogenic lines (NILs) exhibited greater resistance to extremely high temperatures than to drought. When studying the effect of artificial drought on seed germination, it was found that among the NILs of the *PPD* gene system, the *Ppd-D1a* isoline showed the highest resistance. In the analysis of the effect of artificial drought on growth processes, it was demonstrated that in the *Ppd-A1a* isoline, the stress response of both aboveground and belowground parts are less pronounced than in the other isolines. Growth inhibition is an integral indicator of stress responses in plant organisms, which was observed in our experiments under hypothermia. Differences in responses among the studied isolines were identified and may be indirectly associated with genetic determination by *PPD* genes. The degree of growth inhibition was minimal in the *Ppd-A1a* isoline compared to other isolines and the cultivar, which may indicate a reduced sensitivity of this genotype to stress factors. Thus, wheat isolines characterized by rapid developmental rates and low photoperiod sensitivity (photoperiod insensitivity) exhibit higher levels of drought and heat tolerance. Consequently, the results of the integrated study suggest that the genetic system controlling photoperiod sensitivity in wheat – the *PPD* gene system – may indirectly regulate the expression of quantitative traits such as drought and heat tolerance in seedlings of Mercia NILs.

The analysis of drought and heat tolerance in soybean cultivars and isogenic lines with contrasting photoperiodic responses showed that rapid screening revealed differences in drought tolerance levels between cultivars and NILs of the *E*-gene system. Under conditions of artificial and soil drought, it was established that stress-tolerant soybean genotypes were characterized by higher values of drought resistance parameters, including seed germination, biomass accumulation, enhanced root system growth, and increased proline content in both aboveground and belowground plant parts. Analysis of drought resistance in cultivars and isolines using different methods showed that the effect of genotype on stress tolerance is independent of the plant's ontogenetic stage. The highest levels of drought and heat tolerance were observed in photoperiodically neutral cultivars and isolines, while the lowest were recorded in short-day cultivars and lines. It is suggested that genes controlling photoperiod sensitivity may indirectly influence the expression of drought resistance genes in soybean.

Thus, photoperiodically neutral (insensitive) plants demonstrate a higher degree of adaptability and resistance to drought and hyperthermia compared to photoperiod-sensitive plants, regardless of whether they are short-day or long-day types. It was established that photoperiodically neutral genotypes of wheat and soybean are characterized by enhanced combined resistance to drought and hyperthermia, indicating the potential of using *PPD* and *E* loci as breeding markers of adaptability.

REFERENCES

- Du X., Zhang X., Chen X., Jin W. et al. *Front. Plant Sci.* 2024. 15:1337544.
Ning S. et al. *Int. J. Mol. Sci.* 2023. 24:10834.
Roeber V.M., Schmülling T., Cortleven A. *Front. Plant Sci.* 2022. 12:781988.
Staniak M., Szpunar-Krok E., Kocira A. *Agriculture*. 2023. 13:146.
Zhao J., Wang Y., Zhao M. et al. *Sustainable Agriculture*. 2025. 3:14.
Zheng N. et al. *Front. Plant Sci.* 2023. 14:1222755.

**N-HEXANOYL-L-HOMOSERINE LACTONE MODULATES MORPHOGENESIS AND
ENHANCES PROLIFERATIVE CAPACITY IN WHEAT *IN VITRO* CULTURES**

L. M. Babenko¹, K. O. Romanenko¹, O. A. Futorna², I. V. Kosakivska¹

¹*M.G. Kholodny Institute of Botany of the NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine, e-mail: inst@botany.kiev.ua*

²*Educational and Scientific Institute of High Technologies,
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine, e-mail: iht@knu.ua*

Introduction. N-acyl homoserine lactones (AHLs) are quorum sensing signaling molecules of Gram-negative bacteria. They regulate biofilm formation, rhizosphere colonization, synthesis of virulence factors, and microbial adaptation to environmental conditions (Babenko et al., 2022). At the same time, AHLs have been shown to participate in interkingdom communication, influencing physiological processes in plants, including root growth and development, morphogenesis, and stress tolerance (Babenko et al., 2024). Plant responses to AHLs depend on molecular structure, acyl chain length, signal concentration, and plant genotype, indicating the specificity and complexity of this interaction (Duan et al., 2024). In plants, AHLs can activate signaling cascades associated with calcium signaling, secondary messengers, phytohormonal regulation, and changes in the expression of genes controlling growth and defense responses (Schenk, Schikora, 2015). For several species, low concentrations of AHLs have been shown to stimulate germination, root elongation, biomass accumulation, and increased tolerance to biotic and abiotic factors. In contrast, higher doses may inhibit growth or alter the direction of morphogenesis (Palmer et al., 2014).

In wheat, interest in AHLs has increased particularly after reports of their ability to enhance priming and increase resistance to leaf rust, which opens perspectives for their use in biotechnology and cereal physiology (Soleimani et al., 2024). For wheat *in vitro* culture, AHLs are especially important as potential low-molecular-weight modifiers of morphogenetic competence, since regeneration in this species is often genotype-dependent and inefficient (Parmar et al., 2012; Kowalik et al., 2022; Wijerathna-Yapa et al., 2022). In this context, studying the effects of AHLs may help optimize callus induction, organogenesis, and shoot regeneration, as well as clarify the mechanisms of interaction between bacterial signaling molecules and plant cells.

Aim. To investigate the effect of N-hexanoyl-L-homoserine lactone (C₆-HSL) on wheat development *in vitro* and to evaluate its potential as a biologically active factor that stimulates growth and regenerative processes.

Materials and Methods. Mature embryos of the *Triticum aestivum* L. cultivar Podolyanka were used as primary explants. After surface sterilisation, the explants were cultured in Petri dishes (10–12 per dish) on Murashige and Skoog (MS) agar medium at 25 ± 2°C in darkness for 3–4 days. For callus induction, fragments of the meristem from the central part of the embryonic axis were transferred to MS medium supplemented with 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) at 2 mg/L. The resulting callus tissue was subcultured onto fresh MS agar medium containing 2,4-D and supplemented with C₆-HSL at concentrations of 50, 100, 200, 300, and 400 ng/mL. Cultivation was carried out at 25 ± 2°C in darkness.

Results and Interpretation. A clear dose-dependent response of wheat callus cultures to C₆-HSL was observed, reflected in changes in growth intensity and morphogenetic characteristics. The most pronounced stimulatory effect was recorded at 300 ng/mL, whereas increasing to 400 ng/mL reduced the response, consistent with the known concentration-dependent effects of AHLs. Analysis of fresh callus biomass showed a strong stimulatory effect of C₆-HSL (300 ng/mL) compared with the control. An increase in biomass was already observed at early cultivation stages (day 3) and progressively intensified throughout the growth period. By day 12, the callus mass in the experimental variant exceeded that in the control

by approximately 7–8-fold. These results indicate intensification of proliferative processes under C₆-HSL treatment and a pronounced morphogenetic effect in vitro culture.

At the cytological level, the control callus exhibited pronounced morphological heterogeneity, comprising cells of various shapes (rounded, isodiametric, and slightly elongated) with sizes of approximately 40–120 µm. Under C₆-HSL treatment (300 ng/mL), increased morphological uniformity was observed, with a predominance of significantly elongated cells reaching 300–400 µm in length. These changes indicate intensive cell elongation, likely accompanied by a relative decrease in cell division frequency and a shift in the balance between proliferation and differentiation. In the C₆-HSL variant, cell wall thickening was also observed: its thickness increased from approximately 1.5–3 µm in the control to 3–6 µm in treated variants, representing a twofold increase. These changes may indicate intensified synthesis and accumulation of structural cell wall components, including cellulose, hemicelluloses, and pectins, as well as possible activation of remodelling processes, including early stages of lignification.

The observed morphophysiological effects are consistent with current understanding of the role of AHLs in interkingdom signalling and the regulation of plant cellular metabolism. In particular, AHLs may influence the cellular redox state and activate stress-associated signalling cascades, accompanied by cell wall remodelling. At the same time, many effects are likely mediated by modulation of auxin-dependent signalling, which plays a key role in regulating cell elongation, growth polarity, and cellular organisation (Schenk, Schikora, 2015; Babenko et al., 2025).

The results suggest that C₆-HSL can act as an effective low-molecular-weight modifier of wheat callus morphogenesis, influencing both growth intensity and tissue cellular organisation.

Conclusion. C₆-HSL exhibits high biological activity in wheat in vitro culture, stimulating callus formation, growth, and cell elongation. Its action is accompanied by increased morphological homogeneity of the callus and thickening of the cell wall, which may reflect remodelling of its components. The observed effects are likely mediated through auxin-dependent signalling and stress-associated pathways.

REFERENCES

- Babenko L.M., Futorna O.A., Romanenko K.O., et al. *Applied Soil Ecology*. 2024. 193:105151.
Babenko L.M., Kosakivska I.V., Romanenko K.O. *Cell Biol. Int.* 2022. 46(4):523–534.
Babenko L.M., Voytenko L., Futorna O., et al. *Plant Physiol. Biochem.* 2025. 110809.
Duan Y., Han M., Schikora A. *Plant Signal. Behav.* 2024. 19(1):2356406.
Kowalik S., Samoń M., Przyborowski M. *Int. J. Mol. Sci.* 2026. 27(3):1271.
Palmer A.G., Senechal A.C., Mukherjee A., et al. *ACS Chem Biol.* 2014. 9(8):1834–1845.
Parmar S.S., Sainger M., Chaudhary D., Jaiwal P.K. *Physiol Mol Biol Plants*. 2012. 18(2):177–183.
Schenk S.T., Schikora A. *Front Plant Sci.* 2015. 5:784.
Soleimani B., Lehnert H., Schikora A., et al. *Microorganisms*. 2024. 12(10):1936.
Wijerathna-Yapa A., Ramtekey V., Ranawaka B., Basnet B.R. *Plants*. 2022. 11(17):2273.

**CREATION OF THE POPLAR PLANTATIONS IN THE MARGINAL LANDS
AT THE DNIPROPETROVSK REGION OF UKRAINE**

M. G. Babenko¹, M. M. Kharytonov¹, L. M. Matushevych²

¹*Dnipro State Agrarian and Economy University, Dnipro, Ukraine,
e-mail: kharytonov.m.m@dsau.dp.ua*

²*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
e-mail: matushevych@nubip.edu.ua*

Marginal land such as reclaimed post mining lands, unused, degraded, underutilized low-quality pastures and forest strips damaged or destroyed completely by military action caused by Russian invasion to Ukraine, can become a "solution" for cultivation of the fast-growing plants in urban and/or rural areas as raw materials for bioenergy and high-value bioproducts. Although some urban trees may tolerate or avoid current dry periods, ongoing climate change may push certain species beyond their safe operating range, making species selection for urban planning increasingly important (Vásquez et al., 2025). However, the response of trees to increasingly frequent droughts and their intensity in urban settings remains unclear.

The frequency and severity of droughts are expected to increase due to climate change (Bhusal et al., 2021). Therefore, drought tolerance should be a key criterion when selecting tree species for forest plantings to ensure maximum survival and preserve natural habitats. That is why the choice of the direction of growing fast-growing poplar clones on marginal lands is promising from the point of view of creating forest plantations that would improve the microclimate for growing crops in drought conditions. Two strategies for growing fast-growing trees are distinguished: with dense planting and short rotation of logging, 2–5 years, and with wider row spacing and longer rotation (Kutsokon et al., 2015). Typically, the short rotation strategy is used to create bioenergy plantations, while wider row spacing is practiced to create protective forest strips.

Data on annual precipitation estimates indicate that the territory of the Dnipropetrovsk region is under the influence of arid conditions year by year. The daily air temperature increased in 2021–2023 from 26–26.9°C to 28–29°C in 2024 and 2025. At the same time, the amount of precipitation decreased from 473–536 mm to 359 and 345 mm. The amount of precipitation in the Nikopol district (in the southern Dnipropetrovsk region) in the summer of 2025 was 6 mm, five times less than in 2021. This is clearly related to the disappearance of the Kakhovka Reservoir following the collapse of the Dnipro River hydroelectric dam in June 2023 (Pichura et al., 2025).

Restoring forest plantations damaged by military action appears promising due to the ability of poplars to undergo phytovolatilization in vegetation systems that prevent vertical water flow to pollutants underground (Yesilyurt et al., 2024). At the same time, the application of organo-mineral fertilizers is an additional factor enhancing the removal of toxicants with aboveground biomass. The 100 % N treatment in the form of sewage sludge was found to be the most effective compared to the other two options (50 % N and 150 % N) when growing eucalyptus and cedar under semi-arid conditions on marginal land (Singh et al., 2025). Water availability plays a greater role in poplar productivity than temperature (Pearson et al., 2010). Poplar clones 'Gulliver', 'Novoberlinska-3', and 'Slava Ukrainy' coped with stress faster than others, while 'Volosystoplidna' was the most drought-sensitive (Kutsokon, Khoma, 2025). Meanwhile, the clone of the Canadian poplar variety "Pannonia" (*Populus × canadensis Moench*) demonstrated greater resistance to air temperatures of about 40°C, having a smaller specific leaf area than the clone "Giant" (Ferus et al., 2020).

One of the promising non-traditional organo-mineral fertilizers for improving the nutrient regime of marginal lands is sewage sludge. A field experiment with male cuttings of the Robusta clone was initiated to test the effectiveness of the action of sludge treated with a flocculant in the conditions of the Dnipropetrovsk State Agrarian and Economic University (DSAEU) Land Reclamation Research Station in the south of the Dnipropetrovsk region, in the city of Pokrov, Nikopol district. This clone seedlings were taken for new micro field experiment since we saw a high level of survival after planting a number of cuttings of different poplar clones in loess-like loam at the DSAEU research station in 2016 (Kharytonov et al., 2017). These cuttings were obtained from the Boyar Research Station of the National University of

Life Resources and Environmental Management of Ukraine. Clones Robusta, Ijzer-5 and Tardif de Champagne showed a high level of survival (95, 80, and 70 %). Poplar (*Populus spp.*) is a famous natural pollen trapper from the air thanks to its seed hairs (Rasool, Shafi, 2025). Meanwhile, male cuttings of the three clones were not sources of poplar down.

The main goal in our case study was to see selected poplar clone adaptive reaction to the difficult local soil and climate conditions after six year grown. In this connection two-year-old cuttings of the Robusta clone were planted in the spring of 2020 in the form of a two-row alley with a distance between trees of 1.0×1.0 m. Sewage sludge treated with a flocculant based on polyethylene oxide polymer was applied as fertilizer in an amount of 20, 40 and 60 tons of dry matter (d. m.) per 1 ha in a soil pit 0.5 m deep and mixed with technosol. The type of technosol was phytoremediated loess-like loam from a reclaimed dump created on lands disturbed by manganese ore mining. The humus content was 1.5 %.

Analysis of data on height and trunk diameter shows two trends. The first is associated with an increase in the values of height and diameter with the introduction of a larger amount of sewage sludge. The second trend is associated with a greater effect from the use of flocculated sewage sludge as a soil additive. The use of flocculated sewage sludge allowed to obtain an increase in the values of height and diameter for three options on average by 11 and 19.5 %. The value of the specific leaf area in the options with the initial introduction of flocculated sewage sludge (20, 40 and 60 t·ha⁻¹) was lower in comparison with the one where untreated sludge was introduced by 13, 18.4, and 23 %, respectively. The obtained data indicate that a smaller specific leaf area provided greater resistance of plants to increased air temperature in the study area, which affected the increase in their height and trunk diameter. The obtained result confirmed the statement that *Populus* species are generally adapted to a range of climatic conditions in which they are planted (Kutsokon et al., 2015). Determination of heavy metal content in poplar leaves showed that the addition of untreated sewage sludge with flocculant contributes to an increase in the concentration of manganese, zinc, copper and nickel in leaf biomass compared to the control. In relation to manganese, an increase in its content was observed compared to the control by 8.0–18.0 % at sludge application doses of 20–60 t·ha⁻¹. The application of flocculated sewage sludge at doses of 40 and 60 t·ha⁻¹ led to a decrease in the manganese content in the leaves, respectively, in the variant without flocculant treatment by 5 %. The application of flocculated sewage sludge led to a decrease in the zinc content compared to the variant without flocculant treatment by 7–18 %. A decrease in the copper content in poplar leaves by 8 % after treatment with flocculated sludge, compared to the control, was recorded at a sludge application dose of 60 t·ha⁻¹. A significant decrease in the nickel content in poplar leaves by 12–34 % was recorded in the variants with the application of flocculated sewage sludge at doses of 40 and 60 t·ha⁻¹. The use of flocculated as a soil amendment led to a decrease in the copper content by 6–9 %, manganese by 9–16 %, zinc by 20–23 %, and nickel by 17–40 %, compared to the variants without treatment of flocculated sewage sludge.

Thus, taking into account the known effect of the total toxicity of heavy metals, it can be argued that the increase in such biometric indicators as the height and diameter of the trunk and ensuring adaptability to arid conditions by reducing the specific area of leaves are due to the reduction of the negative cumulative effect of heavy metals on the growth of poplar seedlings. The use of flocculated sewage sludge at a dose of 60 t·ha⁻¹ as soil amendment is the most effective way to achieve an increase in biometric indicators, a decrease in the content of heavy metals in leaves and wood, and an increase in drought resistance of poplar seedlings. Therefore, creation of the poplar plantations adapted to local soil and climate conditions requires testing clones for survival and identifying the optimal biosolid dosage depending on their subsequent use in short- or long-term rotation systems.

REFERENCES

- Bhusal N., Lee M., Lee H., et al. *Science of the Total Environment*, 2021. 779: 146466.
Ferus P., Hnilička F., Hniličková H., et al. *Biomass and Bioenergy*. 2020. 138: 105605.
Kharytonov M., Babenko M., Martynova N., et al. *Agriculture and Forestry*. 2017. 63 (4): 141-151.
Kutsokon, N.K., Jose, S., Holzmüller E. A. *American Journal of Plant Sciences*. 2015. 6: 23-33.
Kutsokon N., Khoma Y. *Dendrobiology*. 2025. 93: 86–97.
Pearson C.H., Halvorson A.D., Moench R.D., Hammon R.W. *Industrial Crops and Products*. 2010. 31: 492-498.
Pichura V., Potravka L., Boiko P. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2025. 26(4):357–73.
Pulkkinen P., Vaario L.M., Koivuranta L., Stenvall N. *European Journal of Forest Research*. 2013. 132: 791-800.
Rasool R., Shafi T. *J. Med. Science*. 2025. 28(2):56-9.
Vásquez, M. I., Moreno, F., Orozco Suárez, N., Saldarriaga, K. H., Cifuentes, L. *Forests*. 2025. 16(9): 1493.

**VARIABILITY OF WILD AND CULTIVATED BARLEY IN COLEOPTILE LENGTH
AND INHERITANCE OF THIS TRAIT IN DH-LINES DERIVED
FROM INTERSPECIFIC HYBRIDS**

O. V. Bilynska, R. L. Bohuslavskyi, O. V. Solonechna, N. V. Kuzmyshyna

Yuriev Plant Production Institute, NAAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine
e-mail: bilynskaov@gmail.com

Wild relatives of cultivated plants are known to be sources of numerous valuable genes which play an important role in adaptation to biotic and abiotic stresses. Many crops have lost these genes during long period of breeding aimed at development of varieties and hybrids combining high yield with improved grain quality.

Hordeum spontaneum C. Koch. is a progenitor of cultivated barley which originated from arid and semi-arid regions of Mediterranean basin and Fertile Crescent. Therefore, this species (subspecies according to some taxonomies), including diverse local populations, is considered to be promising for improvement of *Hordeum vulgare* and production of new varieties highly adapted to global warming. It should be noted that crosses between *H. spontaneum* and *H. vulgare* result, as a rule, in fertile hybrids genetic recombination-based segregation in subsequent generations promotes producing introgressive *vulgare*-type lines possessing small fragments of wild genome and free from such unfavorable characters of *H. spontaneum* as brittle rachis, late flowering, and specific vernalization requirement (Matus et al., 2003). At the same time, these lines have been proved to be carriers of resistance to drought, diseases and salinity. They may be characterized by increased grain sizes, higher protein contents as well as by other important agronomic traits. Contrary, it is possible to improve *H. spontaneum* accessions by selection of plants with unbrittle rachis and with typical spring growth habit in segregating populations.

Studies on the physiological mechanisms of adaptability have shown that responses of plants to diverse stresses can be realized at different levels, including formation of specific morphological structures augmenting viability of plants and their capability for seed progeny production. Among them, coleoptile length is of great interest as adaptive trait for enhancing yields of Poaceae crops in arid environments. As coleoptile covers the leaf and protects the seedling during seed germination in soil, longer coleoptile allows deeper sowing and more efficient water utilization in arid conditions, especially in the case of late sowing (Radford, 1987).

In the 1990s, major efforts in studying the impact of coleoptile length on resistance of barley plants to drought were naturally focused in the International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA) (Grando, Ceccarelli, 1995). However, global climate changers have led to broadening the geography of these investigations and resulted in increasing interest for assessment of the diversity in coleoptile length both in cultivated barley and in its relatives (Ergün, 2025).

It should be noted that despite the simplicity of coleoptile length determining by laboratory germination test, some methodological aspects remain unclear. In particular, temperature and duration of incubation are debatable: whether these parameters should be close to native ones under field conditions or germination may be carried out at higher or lower temperatures in order to differentiate genotypes as quickly as possible and reveal the upper level of the trait performance. Obviously, when experiments are designed, data that coleoptile growth is restricted by sunlight and the first leaf emergence as well as genotype sensitivity to sub-physiological and elevated temperatures should be taken into consideration.

The objectives of this work were to study the genetic diversity in coleoptile length in cultivated barley *H. vulgare*, *H. spontaneum* and to determine inheritance of this trait in doubled haploid lines (DH-lines) derived from hybrids between these species. Eleven *H. spontaneum* accessions originating from Israel, Syria, Azerbaijan, twelve *H. vulgare* varieties of different geographic origins and twenty four DH-lines produced via anther culture *in vitro* on the basis of interspecific hybrids were investigated. Seeds were germinated in darkness, in moistened filter paper rolls at 15°C for 13 days (Paynter, Clarke, 2010) and at 25°C for 10 and 15 days. Seeds of one *H. spontaneum* genotype and one *H. vulgare* genotype were germinated at 10°C for 14 days (Kyrdoglo et al., 2014).

The results have demonstrated that the seed germination and coleoptile growth were severely suppressed at 10°C in both accessions. Coleoptiles length could be only measured after 20 days of incuba-

tion. Higher temperatures were more suitable for screening all genotypes for coleoptile length. Elevation of temperature from 15°C to 25°C has resulted in an increase in the mean coleoptile lengths by 25 % and 35 % in cultivated and wild barley, respectively. However, no influence of temperature on genotype distribution was detected. No significant differences were observed between coleoptiles lengths measured after 10- and 15-day incubations at 25°C, either. Moreover, no visible elongations of coleoptiles were observed after the first leaf emergence (1–3 cm) within 5–7 days, and only seedlings continued their growth. This led to conclusion that incubation may be significantly shorter than 15 and even 10 days.

Coleoptile lengths in *H. spontaneum* accessions of varied from 6.3 cm in 'IU 067214' to 8.3 in '599/18', 'IU0788', and 'IR30009'. The mean length was 7.6 cm. In cultivated barley accessions, the coleoptile lengths measured after incubation at 25°C ranged from 4.8 cm in hullless variety 'Mebere' to 7.3 cm in collection accession 'DD21', which is a source of high protein content. In variety 'Velikan', the coleoptile was also longer than 7 cm. The corresponding length measured after seed germination at 15°C ranged from 3.5 to 6.0 cm.

DH-lines were generated from 8 F₁ crosses between *H. spontaneum* accessions 'IR06712', 'IR06714', 'IR 046086-1', 'IR30009', '599/18', hybrid population F₃ 'DH00-126×IR30009', and spring barley varieties 'Yavir' and 'Velikan' as well as from androgenetic line 'DH00-126'. The latter three genotypes are characterized by high androgenetic capacities in contrast to all *H. spontaneum* accessions (Bilynska, Bohuslavskyi, 2018; Bilynska, Shelyakina, 2023). Introgressive DH-lines differed in their morphological traits. Among them, there are vulgare-like plants with brittle and unbrittle rachises, plants of spontaneum-type with brittle and unbrittle rachis as well as plants with intermediate morphology possessing long spikes and large caryopses. Most of DH-lines under investigation inherited spring growth habit from cultivated barley. Only three DH-lines exhibited late heading and inherited vernalization requirement from *H. spontaneum*.

Screening DH-lines for coleoptile length has revealed significant variation in the inheritance of this character reflecting diversity of parental forms. In particular, the coleoptile lengths in DH-lines varied from 5.3 cm in 'DH18-13' to 8.7cm in 'DH23-146'. The mean length was 6.7 cm. Fifteen DH-lines with different morphotypes were found to have long coleoptiles measured after 10-day incubation at 25°C.

All lines under investigation were produced via biotechnological approach – anther culture *in vitro* using seven F₁ and one F₂ hybrids. This approach has advantage in accelerating breeding over traditional one based on backcrosses and selection in segregating hybrid populations. At the same time, additional experiments may be carried out for screening F₂ generations and subsequent planting seedlings with long coleoptiles for production their progenies.

From these results, we can conclude that relatively high temperature (25°C) allows better differentiation of wild and cultivated barley in coleoptile length in comparison with 10°C and 15°C, revealing the maximum levels of the trait performance and shortening incubation. Selected genotypes with long coleoptiles may be screened in the laboratory at lower temperatures in order to evaluate cold tolerance of seedlings, if necessary. *H. spontaneum* accessions 'IR3009' and '599/18', commercial variety of cultivated barley 'Velikan', and accession 'DD21', as well as at least 15 androgenetic introgressive DH-lines of both vulgare- and spontaneum-types are recommended for usage in breeding programs as sources of the "long coleoptile" trait. Regardless of plant morphology, DH-lines inheriting spring growth habit from *H. vulgare* and long coleoptile from *H. spontaneum* are of great value for further studies of barley genetics and breeding. This plant material can also be used for enrichment of collections of barley genetic resources and for molecular and genetic investigations.

REFERENCES

- Matus I., Corey A., Filichkin T. *Genome*. 2003. 46. 1010–1023.
Radford B.J. *Australian J. Exp. Agric.* 1987. 27. 313–316.
Grando S., Ceccarelli S. *Euphytica*. 1995. 86. 73–80.
Ergün N. *Genet. Resour. Crop Evol.* 2025. 72. 4275–4292.
Paynter, B.H., Clarke, G.P.Y. *Genet. Resour. Crop Evol.* 2010. 57. 395–403
Kyrdoglo Ye.K. et al. *Plant Varieties Studying and Protection*. 2014. N 3. (24). 54–60. [in Ukrainian].
Bilynska O.V., Bohuslavskyi R.L. *Proc. VII Int. Conf. Breeding and Genetic Sciences and Education*. Uman, Ukraine: 19–21 March 2018. P. 25–28. [in Ukrainian].
Bilynska O.V., Shelyakina T.A. *Factors of experimental evolution of organisms*. 2023. 32. 69–73. [in Ukrainian].

DROUGHT RESISTANCE IN THE GERMINATION PHASE OF WHEAT SYNTHETICS

**R. L. Bohuslavskyi, N. V. Kuzmyshyna, Yu. O. Chernobay,
T. P. Shiyanova, V. V. Pozdnyakov**

*Yuriev Plant Production Institute of the NAAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine
e-mail: ncpgru@gmail.com*

Drought in the seedling phase is a critical stress factor that limits production of high-quality seedlings of agricultural crops and, therefore, harvesting high yields. An effective way to increase drought resistance of cultivated plants in the juvenile phase is the selection of resistant genotypes against a provocative background, in particular by germination on solutions of substances – osmotics that simulate moisture deficiency (Saliy, Ryabchun, 2022; Pykalo et al., 2020; Altaf et al., 2021). Polyethylene glycol (PEG) with a molecular weight of 6,000 (PEG 6000) is successfully used as an osmotic substance, which has an advantage over the traditionally used sucrose (Sharma et al., 2022). Potential genetic sources of drought resistance in wheat breeding are synthetic forms – amphidiploids or synthetics, created by combining the genomes of various wild and cultivated wheat species and related species – *Aegilops* L., *Dasyphyrum* (Coss. & Durieu) T. Durand, and others, which are naturally adapted to growth in arid conditions (Sammer et al., 2014). Selection of such forms is possible due to the collection of synthetics concentrated in the National Plant Gene Bank of Ukraine.

The aim of the study was to compare the resistance of synthetic wheat forms to water deficit in the seedling phase by germination on a PEG 6000 solution and to select the most resistant accessions. Thirty synthetics with different genomic structures from the collection of the National Plant Genebank of Ukraine, with both spring and winter growth habits, were used in the experiments. The following varieties were compared: bread winter wheat 'Bunchuk' (PBGI); bread spring wheat 'Elehiia Myronivska' (MIW) and 'Kharkivska 30' (YPPI); durum winter wheat 'Kontynent' (PBGI), durum spring wheat 'Spadshchyna' (YPPI). 'Bunchuk' and 'Kontynent' are adapted to the conditions of the Ukrainian steppe; 'Kharkivska 30' and 'Spadshchyna' – to the eastern forest-steppe of Ukraine; 'Elehiia Myronivska' – to the central forest-steppe of Ukraine. Droughts are typical for all these regions during the germination of wheat, with both winter and spring growth habits.

Three concentrations of PEG 6000 were tested: 10 %, 12 %, and 15 %. Germination on distilled water was the control. Germination was carried out in plastic pots on filter paper. The experiments were repeated twice. The following parameters were determined: germination, number of primary roots, primary root length, sprout length and weight, and root weight. These parameters, with the exception of the last two, were determined on days 3 and 7 of germination. For each experimental variant, 20 germinated seeds were analysed; thus 20 values of each morphological characteristic were obtained. The mass of fresh and dry sprouts and roots was determined in total for 10 seedlings in each replication (two replications in total). Sprouts and roots were dried at 130°C for 60 minutes. The significance of differences between mean values was assessed using the Student's *t*-test at a probability level of 95 %.

The degree of change in the trait expression under the influence of the osmotic agent was assessed by the factor influence index, which was calculated by the formula: $I = [(x_1 - x_2) / x_2] \times 100 \%$.

where: *I* – factor influence index;

*x*₁ – mean value in the experimental variant (germination on 10 %, 12 %, or 15 % PEG 6000);

*x*₂ – mean value in the control (germination of seeds of the same accession on distilled water).

A positive value of the index means an increase in the parameter, i.e. a beneficial influence of the studied factor; a negative value means a decrease in the parameter, i.e. a harmful influence of the factor. The criterion of drought resistance was considered when the index of influence of factor *I* was equal to zero or to deviate minimally from it, within the confidence interval. Such indices were coded with the number 1. For each accession, the codes of the characteristics were summed up and the total rating of the accession was determined. The synthetics, the ratings of which exceeded the ratings of the control wheat varieties, were considered more drought-resistant.

Our results demonstrate that a single PEG concentration (15 %) is sufficient to evaluate drought resistance across wheat cultivars and related accessions. Of the traits characterizing seedlings drought re-

sistance, germination and the mean number of roots on 7 day 7 of germination appeared to be the most informative ones. The fresh weight of roots and sprouts, the number of roots on day 3 of germination, root lengths on days 3 and 7 of germination, and sprout length on day 3 of germination are less informative.

Among the tested control wheat varieties, durum winter wheat 'Kontynent' turned out to be the most drought-resistant variety, with a rating of 43. Significantly lower resistance was observed in durum spring wheat 'Spadshchyna' (32), bread winter wheat 'Bunchuk' (26), bread spring wheat 'Elehiia Myronivska' (23) and 'Kharkivska 30' (16).

Of the synthetics, the highest rating (47 and 46, respectively) was recorded for 'PAG 7' ('UA0500044', spring growth habit) and 'UA0500064' (winter growth habit), which were superior to winter durum wheat 'Kontynent'. Synthetic IU070452 (winter) (43) was similar to this variety. These accessions can be considered the most promising sources of drought resistance in the germination phase. One of the two most drought-resistant synthetics – 'PAG 7' – combines the genomes of two cultivated wheat species: free-threshing *T. durum* Desf. and hulled *T. monococcum* L. The second resistant accession – 'UA0500064' includes the genome of a wild wheat relative – medium wheatgrass *Thynopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D.R. Dewey. The tolerance of this species to a complex of abiotic and biotic factors is well known (Cui et al., 2018). The presence of the common wheat genome in this synthetic facilitates cross-breeding with bread wheat cultivars to transfer drought resistance.

Four synthetics with lower ratings – from 34 to 38, but still higher than that of another tested variety of spring durum wheat ('Spadshchyna') – deserve attention: 'UA0500004', 'UA0500025' (spring); 'UA0500055', 'UA0500106' (winter). These accessions are also advisable to use in breeding for drought resistance. Of these four accessions, 'UA0500025' combines the genomes of *T. timopheevii* (Zhuk.) Zhuk. and *T. monococcum* – two hulled wheat species that carry a complex of genes for diseases and pests resistance. Along with *T. monococcum*, synthetic 'UA0500004' incorporates the genome of *T. persicum*, which carries the Q gene. This gene promotes free-threshing grains – a trait typically lacking in wheat synthetics (Matsuoka, 2011). Synthetics 'UA0500055' and 'UA0500106' were developed using wild goatgrass species: *Aegilops mutica* Boiss. and *Ae. tauschii* Coss., respectively. Both species possess broad ecological adaptability (Kishii, 2019). Neither synthetics nor control varieties exhibited a clear relationship between growth habits and overall seedling drought resistance rating.

Along with synthetics, which in terms of seedling drought resistance were superior or equal to the control varieties ('Kontynent' and 'Spadshchyna'), accessions with a total rating of 28 to 31, which were better than 'Bunchuk', may be of some interest. Accessions 'UA0500029' (*T. persicum* Vav. – *Ae. tauschii*, spring) and 'IU070471' (*T. durum* – *Ae. tauschii*, winter) have a D subgenome inherited from *Ae. tauschii*, which confers wide adaptability. These two accessions have an ABD genome homologous to common wheat, which ensures easy crossing with common wheat, therefore facilitating the transfer of drought resistance, high grain protein content and other valuable traits [Charmet G. 2011].

Two synthetics – 'UA0500008' (*T. dicoccum* Schrank ex Schübl. – *T. monococcum*, spring) and 'UA0500061' (*T. dicoccoides* (Körn. ex Asch. & Graebn.) Schweinf. – *T. boeoticum* Boiss., spring) – incorporate the A^uA^bB genome, i.e. a double dose of subgenome A in two modifications. The third synthetic – 'UA0500026' (*T. sinskajae* A. Filat. et Kurk. – *T. urartu* Thum. ex Gandil., spring) – carries the A^uA^b genome homologous to the subgenomes of the previous two accessions, but no B subgenome (Charmet, 2011). These genomic features determine facilitated crossbreeding with durum wheat varieties aimed at transferring drought resistance.

Thus, the wheat synthetics with high drought resistance at the initial stage of plant development – the seedling phase – have been identified. They are sources of this trait in combination with other valuable traits for wheat breeding.

REFERENCES

- Altaf A., Gull S., Zhu X. et al. *Pak. J. Agri. Sci.* 58(1) 2021: 357-367
Charmet G. *Comptes Rendus Biologies.* 334 (3). 2011: 212-220.
Cui L., Ren Y., Murray T.D. et al. *Engineering.* 4(4). 2018: 507-513
Kishii M. *Front Plant Sci.* 10 2019: 585
Matsuoka Y. *Plant Cell Physiol.* 52(5). 2011: 750–764
Pykalo S., Demydov O., Yurchenko T. et al. *Visnyk of the Lviv University. Series Biology.* 82. 2020: 63–79
Saliy A. M., Ryabchun N. I. *Genetychni resursy roslin.* 30. 2022: 34-43
Sharma V., Kumar A., Chaudhary A. et al. *Stresses.* 2. 2022: 26–51
Sammer F., Muhammad A., Sunbal Ch. et al. *Int. J. of Biosci.* 5. 2014: 104-112

**SYNTHESIS OF BIOGENIC ZnS NANOPARTICLES USING *BACILLUS* SPP.
AND THEIR ACTIVITY AGAINST PHYTOPATHOGENIC BACTERIA**

A. Buziashvili¹, D. Klymchuk², A. Naumenko³, Ya. Pirko¹, A. Yemets¹

¹*Institute of Food Biotechnology and Genomics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
e-mail: yemets.alla@nas.gov.ua*

²*M.G. Kholodny Institute of Botany of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,*

³*Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine*

Green synthesis of zinc sulfide nanoparticles (ZnS-NPs) using microbial metabolites represents an environmentally friendly alternative to conventional chemical methods and enables the production of nanomaterials with certain properties. In this study, ZnS-NPs were synthesized using matrices derived from bacterial strains *Bacillus subtilis* B-7099, *Bacillus amyloliquefaciens* B-7101, and *Bacillus subtilis* B-7445. All strains were cultivated on a solid Nutrient broth (NB) medium (15 g/L of NB medium, 15 g/L agar; Pharmactiv, Ukraine) at +37°C. Extracellular synthesis of nanoparticles was carried out using two approaches. The first method was adapted from Alijani et al. (2019). Briefly, zinc sulphide was synthesized by separately dissolving 100 mM of Na₂S × 9H₂O (Sigma-Aldrich, Germany) and 100 mM Zn(NO₃)₂ × 6H₂O (ThermoFisher Scientific, USA) in 100 mL of distilled water at room temperature on a magnetic stirrer. The Zn(NO₃)₂ solution was then added to Na₂S solution under constant stirring. For biogenic synthesis of nanoparticles, 20 mL of the ZnS solution was added in 20 mL of the sterile bacterial matrices that contained bacterial metabolites. The reaction mixture was then incubated for 24 h at +37°C on a SkyLine S-3M shaker at 135 rpm.

The second approach for ZnS-NPs synthesis was adapted from Al-Hammadi et al. (2023). In this method, 200 mM of sodium sulphide (Na₂S × 9H₂O) and 200 mM of zinc nitrate (Zn(NO₃)₂ × 6H₂O) were each added to separate 7.5 mL aliquots of sterile bacterial matrices. Then, supernatant with zinc nitrate was added into the sterile bacterial matrices with sodium sulphide under continuous stirring. The resulting ZnS-NPs solution was incubated on a SkyLine S-3M shaker at +37°C for 24 h at 135 rpm.

The obtained nanoparticles were characterized by UV-Vis spectroscopy, transmission electron microscopy (TEM), and photoluminescence analysis, while their antibacterial activity was evaluated against phytopathogenic and non-pathogenic soil bacteria.

UV-Vis spectroscopy revealed a characteristic absorption maximum at 320 nm, particularly pronounced in ZnS-NPs synthesized with *B. subtilis* B-7099 at 200 mM, suggesting the formation of stable colloidal nanoparticles. The position of this absorption peak agrees with previous reports describing biologically synthesized ZnS-NPs and confirms successful nanoparticle formation.

TEM analysis demonstrated that nanoparticle morphology strongly depended on both the bacterial strain and precursor concentration. ZnS-NPs synthesized by *B. subtilis* B-7099 were predominantly spherical, cubic, hexagonal, and amorphous, with average particle sizes ranging from approximately 30 to 50 nm. Nanoparticles produced by *B. amyloliquefaciens* B-7101 exhibited greater morphological diversity, including spherical, cubic, and amorphous structures ranging from 90 to 325 nm. The highest structural variability was observed for *B. subtilis* B-7445, producing spherical, cubic, rod-shaped, dendritic nanoparticles and ring-like aggregates. These findings demonstrate that bacterial metabolites significantly influence nanoparticle nucleation, crystal growth, and final morphology, providing opportunities to tailor nanoparticle properties through biological synthesis.

The antibacterial activity of biogenic ZnS-NPs was investigated against the phytopathogenic bacteria *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* and *Ralstonia solanacearum*, as well as non-pathogenic soil bacteria *Rhizobium leguminosarum* and *Bacillus thuringiensis*. It was found that

ZnS-NPs exhibit enhanced antibacterial activity against phytopathogens while showing weak inhibitory effects on *R. leguminosarum* and *B. thuringiensis*. The strongest antibacterial activity was observed for ZnS-NPs synthesized by *B. subtilis* B-7099. In contrast, the inhibitory effects toward *R. leguminosarum* and *B. thuringiensis* were substantially lower than those of the precursor solution, indicating improved selectivity of the biosynthesized nanoparticles.

Overall, the results demonstrate that bacterial-mediated green synthesis enables the production of ZnS nanoparticles with diverse morphologies, stable optical properties, and selective antibacterial activity. The synthesis conditions, particularly bacterial strain and precursor concentration, strongly influence nanoparticle characteristics. The ability of these ZnS-NPs to effectively suppress harmful phytopathogenic bacteria while exerting relatively low toxicity toward beneficial soil microorganisms highlights their potential as environmentally friendly antimicrobial nanomaterials for sustainable agricultural applications. Further studies should investigate the specific roles of bacterial metabolites in nanoparticle formation and evaluate the performance of these nanomaterials under greenhouse conditions.

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of Ukraine (bilateral Ukrainian-Slovak project "Seed nanoprimering with biofabricated nanoparticles to improve plant growth and stress tolerance", 2026–2027) for BA and AY.

REFERENCES

- Alijani H.Q. et al. *J. Mol. Structure*. 2019. 1175:214-218.
Al-Hammadi A. et al. *Sana'a Univ. J Appl. Sci. Technol*. 2023. 1:15-28.

GERMINATION, GROWTH, AND BIOCHEMICAL COMPOSITION OF SOYBEAN SEEDLINGS EXPOSED TO POLYSTYRENE

K. Estkowska¹, J. Chmielowska-Bąk¹, A. Ekner-Grzyb², J. Musiał³, T. Grzyb³

¹*Department of Plant Ecophysiology, Faculty of Biology,
Adam Mickiewicz University, Poznań, Poland, e-mail: jagna.chmielowska@amu.edu.pl*

²*Department of Cell Biology, Faculty of Biology, Adam Mickiewicz University, Poznań, Poland,
e-mail: anna.ekner@amu.edu.pl*

³*Department of Rare Earth, Faculty of Chemistry, Adam Mickiewicz University, Poznań, Poland*

Contamination of the environment with plastics is raising concerns. Although initially these compounds were studied mainly in aquatic environments, it is now evidenced that significant areas of land are also polluted with plastic particles (He et al., 2018). The accumulation of plastic particles in soil could affect the growth and physiological status of plants, including crops. Indeed, laboratory experiments show that exposure to plastic micro- and nanoparticles can hamper plant growth and photosynthesis efficiency, alter mineral homeostasis, induce oxidative stress, and exhibit genotoxic effects (reviewed in Ekner-Grzyb, 2022).

Data on the toxic effects of plastics in plants are gradually increasing. However, still little is known about one of the crucial processes in a plant's lifespan – the process of seed germination. In the present study, we assessed the influence of seed imbibition in the suspension of polystyrene micro- and nanoplastics (MNPs) on the process of germination and seedling growth in soybean (*Glycine max*). In addition, we evaluated the levels of proteins, free amino acids, phenolic compounds, and flavonoids in the germinated seedlings.

The results reveal limited effects of imbibition in the plastic suspension on the process of germination. The germination rate and the growth of seedlings were not affected by the treatment. Exposure to MNPs also did not influence the levels of proteins and total phenolics. On the other hand, a small decrease in the level of free amino acids was noted following treatment with MNPs at concentrations of 25 and 50 mg/L. In addition, an accumulation of flavonoids was observed in seedlings exposed to MNPs at the highest concentration (100 mg/L), although this result was not statistically significant.

The study was financed by National Science Centre, Poland, in frame of project 2022/45/B/ST5/00604 "Synthesis of nano- and microplastics labeled with up-converting nanoparticles for its visualization and monitoring in biological materials".

REFERENCES

- He D., Luo Y., Lu S. et al. (2018). *TrAC Trends Anal. Chem.* 109, 163–172. doi: 10.1016/j.trac.2018.10.006
Ekner-Grzyb A., Duka A., Grzyb T. et al. (2022) *Front. Plant Sci.* 13:1027608. doi: 10.3389/fpls.2022.1027608

**SUCROSE-INDUCED OSMOTIC STRESS AS A TOOL FOR *IN VITRO* SCREENING
OF DROUGHT TOLERANCE IN SAAZ HOP CULTIVARS**

L. Golosna^{1,2}, O. Bobrova^{1,3}, B. Tunklova¹, P. Svoboda⁴, B. Bilavcik¹, M. Faltus¹

¹*Czech Agrifood Research Center, Prague, Czech Republic*

²*Institute of Plant Protection of the NAAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
e-mail: lesia.golosna@carc.cz*

³*Institute for Problems of Cryobiology and Cryomedicine of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine,*

⁴*Hop Research Institute, Zatec, Czech Republic*

Increasing drought frequency associated with climate change requires rapid approaches for identifying stress-tolerant crop genotypes (Eriksen et al., 2021; Gloser et al., 2024). *In vitro* culture systems provide a reproducible platform for studying plant responses to osmotic stress under controlled conditions (Martínez-Santos et al., 2021; Wellpott, 2024). Sucrose has also been used to induce osmotic stress *in vitro*, although it may exert dual effects by acting both as an osmotic agent and as a metabolic signal regulating stress responses (Ahmad et al., 2020; Qi et al., 2025). Characterizing genotype-specific responses to elevated sucrose concentrations may therefore contribute to the development of reliable screening methods for drought tolerance in hops (*Humulus lupulus* L.) (Olšovská et al., 2023; Morcol et al., 2020).

The present study evaluated the influence of increasing sucrose concentrations (0.005–0.15 M) on growth inhibition and tissue water content of two hop cultivars, ‘Saaz Brilliant’ and ‘Saaz Late’, cultured *in vitro*. Plants were cultivated on modified Murashige and Skoog medium supplemented with elevated sucrose concentrations, while standard medium served as the control. After six weeks of cultivation, shoot growth and tissue water content were determined.

Sucrose supplementation caused a concentration-dependent reduction in shoot growth in both cultivars. However, clear genotype-dependent differences were observed. At 0.03 M sucrose, ‘Saaz Brilliant’ maintained approximately 43 % of the growth observed in the control, whereas ‘Saaz Late’ retained less than 10 %, indicating considerably higher sensitivity during the initial stress response. Further increases in sucrose concentration progressively reduced shoot growth, reaching only about 2 % of the control at 0.15 M in both cultivars. Tissue water content also declined with increasing sucrose concentration. Water content decreased from 86.4 % to 66.0 % in ‘Saaz Brilliant’ and from 87.9 % to 57.5 % in ‘Saaz Late’, demonstrating stronger dehydration in the latter genotype. Across treatments, growth reduction closely corresponded with decreasing tissue water content, suggesting that maintenance of cellular hydration plays a central role in sustaining growth under osmotic stress (Ghouili et al., 2021).

The contrasting responses of the two cultivars suggest differences in their capacity to cope with osmotic stress. ‘Saaz Brilliant’ consistently maintained higher tissue water content and exhibited greater growth under moderate sucrose concentrations, suggesting superior tolerance to osmotic stress. Conversely, ‘Saaz Late’ showed a more pronounced decline in both water status and growth, reflecting lower adaptive capacity.

These findings demonstrate that elevated sucrose concentrations effectively induce osmotic stress *in vitro* while simultaneously revealing genotype-specific adaptive responses. The relationship between tissue water status and growth inhibition highlights water retention as an important physiological indicator of stress tolerance. The proposed *in vitro* assay represents a simple, reproducible, and cost-effective approach for preliminary screening of hop germplasm for drought tolerance and may support breeding programs aimed at improving climate resilience.

REFERENCES

- Eriksen R.L. et al. *Sci. Rep.* 2021. 11:5138.
Gloser V. et al. *Irrig. Sci.* 2024. 42:907–918.
Martínez-Santos E. et al. *Sci. Rep.* 2021. 11:22611.
Ahmad P. et al. *In: Protective Chemical Agents in the Amelioration of Plant Abiotic Stress: Biochemical and Molecular Perspectives.* Wiley. 2020. 53–70.
Qi Y. et al. *Physiol. Plant.* 2025. 177:e70521.
Olšovská J. et al. *Kvasny Prum.* 2023. 69:777–785.
Morcol T.B. et al. *J. Agric. Food Chem.* 2020. 68:14698–14708.
Ghouili E. et al. *Physiol. Mol. Biol. Plants.* 2021. 27:135–150.

**EVALUATION OF MOLDOVAN COLLECTION SAMPLES OF POTATOES
BY MOLECULAR MARKERS OF RESISTANCE TO LATE BLIGHT**

C. Grajdieru, A. Deaghileva, I. Mitina, L. Melian

*Institute of Genetics, Physiology and Plant Protection of the State University of Moldova,
Chisinau, Republic of Moldova, e-mail: cristina.grajdieru@sti.usm.md*

Infectious diseases are one of the main causes of potato yield losses throughout the cultivation area. Potato late blight, caused by the oomycete *Phytophthora infestans*, plays a significant role in this regard. An effective method for controlling this pathogen and containing its spread is the breeding of resistant genotypes. However, *P. infestans* is characterized by rapid variability and adaptive flexibility, allowing it to overcome the genetically determined resistance of known potato varieties. Therefore, to obtain potato genotypes with broad resistance to various races of this pathogen, breeders must pyramid various R genes in the plant genome.

In this study, we screened Moldovan potato collection accessions from the Gene Bank of the Institute of Genetics, Physiology and Plant Protection using markers for late blight resistance. Markers corresponding to several *P. infestans* resistance genes were used for evaluation: *R1*, *Rpi-phu1*, *R3*, *Rpi-vnt1.1*. Potatoes were collected from subsidiary plots of local farmers, which reproduced for no less than a decade.

The results showed that molecular markers linked to *R3* gene (specifically, *R3a1/R3a2*) were abundant in collection accessions. At the same time, *R3b4* was identified only in one accession. *R3a* and *R3b* genes confer strong race-specific resistance to *P. infestans* in potato when stacked together. Markers were identified via end-point PCR protocol with amplicon separation in 2 % agarose gel electrophoresis and further visualization under UV-light.

Marker *phu6* linked to *Rpi-phu1* was also presented in several local genotypes. This gene is reported to induce broad-spectrum resistance to late blight and was introgressed in *S. tuberosum* from a *S. phureja* × *S. stenotomum* hybrid.

Another R gene sequence used for breeding resistance to late blight in potato is *Rpi-vnt1.1* originating from *S. venturii*. This gene confers broad-spectrum resistance to different races of *P. infestans*, shared with its allele *Rpi-vnt1.3*, which differs by several nucleotide insertions (Pel et al., 2009). The *Rpi-vnt1.3* is mapped on chromosome IX and found in many resistant *S. venturii* accessions in SolRgene database. This sequence was also identified in several local genotypes, which did not develop distinct late blight symptoms during reproduction on experimental fields.

The 45/XI marker did not reveal the prominent 1000 bp product that correlates with resistance to late blight in potato.

Molecular screening revealed that several potato landraces acquired from Moldovan smallholdings carry several *Rpi* genes associated with resistance to late blight. Therefore, they present a practical interest due to their potential use in breeding programs focused on resistance to *P. infestans*.

This research was funded by National Agency for Research and Development, grant number 25.80012.7007.31SE.

REFERENCES

- Stefańczyk E. et al. *Phytopathology*, 2017. 107(6): 740–748.
Paluchowska P. *Planta*, 2022. 255(6):1–20.
Mangal V. *Australasian Plant Pathology*, 2023. 52(3): 227–240

**ROOT STRUCTURAL AND PHYSIOLOGICAL ADAPTATIONS IN HALOPHYTIC
BARLEY RELATIVES UNDER SALINITY STRESS**

**S. Isayenkov^{1,2,3}, L. Borisjuk², S. Mayer², A. Hilo², D. Knoch², T. Meitzel², B. Hause⁴,
Y. A. T. Moya², H. Rolletschek², E. Peiter¹, V. Radchuk²**

¹*Institute of Agricultural and Nutritional Sciences, Martin Luther University Halle-Wittenberg,
Halle (Saale), Germany*

²*Leibniz Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research (IPK), Seeland, OT Gatersleben, Germany*

³*Department of Plant Food Products and Biofortification, Institute of Food Biotechnology
and Genomics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: stan.isayenkov@gmail.com*

⁴*Department of Cell and Metabolic Biology, Leibniz Institute of Plant Biochemistry,
Halle (Saale), Germany*

Salinity combined with waterlogging represents a major abiotic constraint that markedly reduces crop growth and productivity. In this study, we investigated species-specific adaptive mechanisms to these stresses in the wild halophytic barleys *Hordeum marinum* and *Hordeum glaucum*, and compared them with cultivated barley, *Hordeum vulgare*. By integrating magnetic resonance imaging, fluorescence scanning microscopy, ¹³C-based carbon fixation analysis, and detailed ionomic and metabolomic profiling, we identified key anatomical and physiological traits underlying differences in salinity tolerance.

Among the evaluated species, *H. marinum* displayed the greatest tolerance to saline waterlogging by maintaining tissue hydration, metabolic function, and high carbon fixation rates. It also accumulated the lowest levels of Na⁺ and Cl⁻ while preserving the highest K⁺ concentrations in both roots and shoots. *H. glaucum* exhibited moderate tolerance, characterized by lower tissue water content and partial metabolic disruption, whereas *H. vulgare* did not survive under these stress conditions.

The results indicate that salinity tolerance in *H. marinum* depends on a coordinated root-based adaptive system. Well-developed root aerenchyma facilitates internal oxygen transport during waterlogging, while salinity-triggered lateral root formation promotes sequestration of excess Na⁺ within the lateral root cortex, thereby restricting ion movement to photosynthetically active tissues. This integrated aeration–sequestration mechanism maintains root functionality under combined salinity and waterlogging stress and enhances overall plant resilience in wild barley species, whereas it is only weakly expressed in cultivated barley (*H. vulgare*).

REFERENCES

- Isayenkov S. et al. *Plant, Cell & Environment*, 2026. e70563
Isayenkov S. *Addressing the Growing Challenges*, 2023. pp. 75–90
Isayenkov S. et al. *Int. J. Mol. Sci.* 2020. 21: 9019

**STUDY OF TOLERANCE OF CHRYSANTHEMUMS AND SILVER RAGWORT
TO IRRIGATION WITH NaCl SALINED WATER**

M. M. Kharytonov¹, Y. Borodai², Yu. Lykholat², V. S. Kalyna¹, H. Heilmeier³

¹*Dnipro State Agrarian and Economy University, Dnipro, Ukraine,
e-mail: kharytonov.m.m@dsau.dp.ua*

²*Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine*

³*Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, Germany*

The need to use sub-standard irrigation water for growing flowers in greenhouses for sale or creating green roofs is explained by economic conditions and limited freshwater supplies, especially in arid and semi-arid regions. *Chrysanthemum morifolium* Ramat. is one of the most cultivated flowers worldwide. This plant is a halophyte and is known to thrive in moderately saline environments. Salt stress significantly affects the productivity and quality of chrysanthemums. Studying the reactions of different chrysanthemum cultivars to irrigation water salinity is important from both fundamental and applied points of view (Guan et al., 2012). It is known that even very low concentrations of NaCl (10 mM) significantly affected the chrysanthemum variety "Amiko Red" (Paraskevapoulou et al., 2020). Salt tolerance of 22 chrysanthemum (*C. morifolium* Ramat.) varieties was studied at five different salinity levels, including (0, 50, 100, 150, 200 mM/L (Rai et al., 2021). The greatest decrease in dry mass was observed with treatment at 200 mmol/L NaCl. Effect of four salinity levels NaCl/CaCl₂ (2, 4, 6, and 8 dC·m⁻¹) on the growth and quality of chrysanthemums *C. morifolium* L., grown on two different substrates was assessed (Amarin et al., 2021). Increased salinity levels resulted in a significant reduction in plant productivity and quality indicators, relative moisture content, and chlorophyll content. Transgenic chrysanthemum plants overexpressing the *CmDOF18* gene were more tolerant of salt stress than wild-type plants (Li et al., 2024).

The malondialdehyde content and leaf electrical conductivity of transgenic plants under salt stress were lower than those of wild-type plants, while the proline and chlorophyll content were higher than those of wild-type plants. Ten chrysanthemum varieties were studied to understand their response to salt stress (150 mM NaCl) (Vanlalruati et al., 2023). Salt stress significantly affected osmolyte accumulation and the physico-biochemical characteristics of chrysanthemum varieties compared to the control. Salt stress significantly affected plant growth, assimilation pigment content, and proline concentration with increasing salinity. Reduced shoot growth, root growth, leaf area, leaf count, shoot dry weight, and chlorophyll content were observed with the use of 150 mM NaCl. Water stress in semi-arid and arid regions creates challenges in maintaining moisture in turfgrass lawns and green roofs. Green roofs made from turf grasses can reduce runoff more than green roofs made from sedum and moss but are more sensitive to increased drought and irrigation (Vanuytrecht et al., 2014). However, the increased risk of drought and salinization due to irrigation with unsuitable water requires vegetation selection to achieve optimal runoff reduction and plant survival under heat and salt stress. Freshwater shortages have generated interest in using alternative water sources, including saltwater or recycled water, for use in greenhouses, lawn irrigation, and maintaining optimal moisture conditions on green roofs (Marcum, 2006). Since the introduction of green roofs, succulent species of the Crassulaceae family (genera *Sedum* and *Phedimus*) and C₄ grasses have become dominant (Mandel et al., 2016). Halophyte *Arthrocnemum macrostachyum* (Moric.) K. Koch and *Portulaca oleracea* can be good choices as salt tolerant plants. *Jacobaea maritima* plants were grown in 10 cm deep green roof modules and subjected to six irrigation regimes (tap water, sea water, or alternating tap and sea water) at 4- or 8-day intervals, with an irrigation volume equal to 60 % of the total evapotranspiration (Ntoulas et al., 2025). The study of mixed irrigation regimes using fresh and

sea water, in which fresh water predominates, is recommended to reduce overall freshwater consumption while maintaining plant survival.

The main objective of our case study was to estimate the physiological and biochemical responses of flowering plants (*Chrysanthemums* and *Jacobaea maritima*) to varying concentrations of NaCl in irrigation water. The main tasks included a) assessing the pigment, MDA, and proline content in leaves depending on five salinity levels; b) studying the effect of using Kelpak® seaweed extract at 50 and 100mM NaCl. Two types of flowering plants – chrysanthemum with white flowers and silver ragwort were tested follow first task regarding to watering with NaCl salt (0, 5, 10, 20 и 40g/L) in the greenhouse of the Institute of Bioscience of TUBAF regarding to DAAD-“Ostpartnerschaften 2025” project. These two plants showed similar adaptive responses to salt stress. The chlorophyll *a*, *b*, and carotenoid contents in silver ragwort leaves decreased from 0.44 to 0.36 µg/g, from 0.15 to 0.11 µg/g, and from 0.16 to 0.12. The chlorophyll *a*, *b*, and carotenoid contents in chrysanthemum leaves decreased from 0.48 to 0.35 µg/g, from 0.134 to 0.1 µg/g, and from 0.13 to 0.1 µg/g. At the same time, the MDA and proline content in the leaves of these plants increased with increasing water salinity: in silver ragwort, from 4.6 to 8.27 mM/g and from 0.3 to 3.83 mM/g, while in chrysanthemum, from 5.0 to 6.7 mM/g and from 1.0 to 1.7 mM/g. The EC in silver ragwort leaves varied from 0.715 to 5.07 mS/cm, while in chrysanthemum, from 0.22 to 1.15 mS/cm. The effect of the Kelpak® seaweed extract biostimulant (BS) on watering yellow-flowered chrysanthemum plants was studied in a pot experiment at two levels of water salinity: 50 and 100 mM NaCl. Application of the biostimulant began after planting with foliar spraying (0.3 %) and then plants in each experimental variant were treated with seaweed extract (1 %) by watering under the roots. The content of total chlorophyll and carotenoids decreased by 15–40 % and 30–45 % after watering with saline water of 50 and 100 mM NaCl. Application of the Kelpak® biostimulant led to the restoration of the total chlorophyll and carotenoid content in the 50 mM NaCl BS variant, while in the 100 mM NaCl BS variant the decrease was 7–16 % compared to the control. MDA levels increased up to two-fold when irrigated with saline water. Treatment with the biostimulant Kelpak® reduced MDA production in chrysanthemum leaves.

The case study of the reactions of halophytic crops to irrigation with saline water has potential in terms of their phytoremediation role when grown on salt-affected soils. The case under consideration gives also rise to the search for effective halophyte plants capable of remediating soils salined by irrigation in the urban and rural areas as well. The use of derived from seaweed extract Kelpak® biostimulant seems to be a more acceptable alternative to the application of nitrate-containing fertilizers as mitigation to salt stress measure due to the absence of the risk of nitrate accumulation in plant biomass.

REFERENCES

- Amarin R., Kafawin O., Ayad J. et al. *Jordan Journal of Agricultural Sciences*. 2021, 17(2): 69-83
Guan Z., Chen S., Chen F. et al. *Acta Hort.* 2012, 937:369-375.
Li P., Fang T., Chong X. et al. *BMC Plant Biol.* 2024, 24(1):232.
Mandel, L., McCoy E., Liss T. *J. Green Build.* 2016, 11:15-36.
Marcum K.B. *Agric. Water Manag.* 2006, 80: 132-146.
Ntoulas N., Spyropoulos C., Paraskevopoulou A.T., et al. *Land*. 2025, 14: 2214.
Paraskevopoulou A.T., Mollal-Halil E., Liakopoulos G. et al. *Acta Hort.* 2020, 1298: 529-534.
Rai H., Raju D.V.S., Prasad K.V. et al. *Indian Journal of Agricultural Sciences*. 2021, 87 (7): 870-877.
Vanlalruati, Anand P., Kumar G. et al. *Indian J. Hort.* 2023. 80(2): 190-196
Vanuytrecht E., Van Mechelen C., Van Meerbeek K. et al. *Landsc. Urban Plan.* 2014, 122, 68-77.

**COMBINED EFFECT OF DROUGHT AND HIGH TEMPERATURE
ON THE PHOTOSYNTHETIC APPARATUS OF WINTER WHEAT**

D. A. Kiriziy, O. G. Sokolovska-Sergiienko, A. S. Holoboroda, O. O. Stasik

*Institute of Plant Physiology and Genetics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
e-mail: o_stasik@yahoo.com*

Wheat, one of the world's major food crops, is particularly vulnerable to the damaging effects of the combined action of drought and heat during the reproductive stage of ontogenesis, highlighting the need for further research and the development of approaches to enhance crop tolerance to these stresses (Pequeno et al., 2021; Neupane et al., 2022). The aim of this study was to investigate the responses of the wheat leaf photosynthetic apparatus to the combined effects of soil drought and high temperature during short-term and prolonged water deficit, and after the restoration of optimal soil moisture.

The responses of the photosynthetic apparatus of the flag leaves of two winter bread wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties, Yednist and Darunok Podillya, to soil drought, high temperature, and their combined effects, as well as after to resumption of normal watering were studied in a pot experiment. Drought treatment was imposed by reducing soil moisture content to 30 % of field capacity (FC) for seven days at the earing–flowering stage. Thereafter, watering of the experimental plants was resumed to the control level (70 % FC). Measurements of relative water content (RWC), photosynthetic pigment content, gas exchange parameters, and the activities of chloroplast antioxidant enzymes in the flag leaves of both control and treated plants were performed on the first and seventh days of exposure to 30 % FC, as well as one week after soil moisture had been restored to the control level. After the measurement of gas exchange rates at 25°C, the flag leaves of both control and drought-treated plants were heated at 42°C for 40 min, after which the gas exchange rates were measured immediately.

On the first day of drought at 30 % FC, a significant decrease in RWC, CO₂ assimilation rate, and transpiration rate was observed in both varieties, along with a tendency toward reduced chlorophyll content in the Darunok Podillya variety. On the seventh day of drought, RWC declined further and chlorophyll content decreased significantly in both varieties. Nevertheless, the degree of CO₂ assimilation and transpiration inhibition was reduced in Yednist variety, whereas in Darunok Podillya it remained at the same level. On the seventh day after the resumption of optimal watering, the CO₂ assimilation rate in treated plants of both varieties recovered to the control level despite the significantly lower chlorophyll content. An increase in leaf temperature to 42°C markedly reduced the CO₂ assimilation rate in both control and drought-treated plants. At the onset of drought, the degree of photosynthesis inhibition in drought-treated plants was much greater than in the control. However, after seven days of water deficit, the heat-tolerance of photosynthesis in drought-stressed plants of both varieties did not differ from that of the control. Furthermore, on the seventh day after the resumption of optimal watering, it was even higher than in the control plants, indicating the development of cross-tolerance of the photosynthetic apparatus to high temperature under drought conditions. An increase in the activity of the chloroplast antioxidant enzymes superoxide dismutase and ascorbate peroxidase was detected in the leaves of stressed plants. Obtained results indicate that indices of photosynthetic activity in treated plants in the relative values comparing to the control can be used as informative parameters for phenotyping wheat varieties for drought and heat tolerances.

REFERENCES

- Neupane D., Adhikari P., Bhattarai D. et al. *Earth*. 2022; (3): 45-71.
Pequeno D.N.L., Hernandez-Ochoa I.M., Reynolds M. et al. *Environ. Res. Lett.* 2021; (16): 054070.

**"TRYPTOPHAN–SEROTONIN–MELATONIN" AS A POSSIBLE HUB
FOR THE REGULATION OF SEED GERMINATION AND THE FORMATION
OF PLANT ADAPTIVE RESPONSES**

Yu. E. Kolupaev^{1,2}, Yu. V. Karpets³, D. A. Taraban^{1,3}, L. I. Relina¹

¹*Yuriev Plant Production Institute of NAAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: plant_biology@ukr.net*

²*Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine*

³*State Biotechnology University, Kharkiv, Ukraine*

The modulation of metabolic processes allows plants to survive in diverse environments and facilitates complex functional interactions with other organisms. The proteinogenic amino acid L-tryptophan occupies a special position among plant metabolites. This is primarily due to its function as a precursor of auxin, one of the main growth-stimulating phytohormones, as well as compounds considered "new" phytohormones—serotonin and melatonin. Tryptophan metabolism in plants can occur via five main pathways: the 5-hydroxytryptophan pathway, the tryptamine pathway, the indole-3-pyruvic acid pathway, the indole-3-acetamide pathway, and the indole-3-acetaldoxime pathway. This creates a wide diversity of tryptophan-derived metabolites. The first two pathways, which provide the serotonin and melatonin syntheses, involve the enzymes tryptophan decarboxylase, tryptamine 5-hydroxylase, and tryptophan 5-hydroxylase. Tryptophan decarboxylase converts tryptophan into tryptamine, which is subsequently converted into 5-hydroxytryptamine (serotonin) by tryptamine 5-hydroxylase. In the alternative pathway, tryptophan is first hydroxylated to 5-hydroxytryptophan by tryptophan 5-hydroxylase, and then 5-hydroxytryptophan is decarboxylated to form serotonin. The synthesized serotonin can be converted into melatonin. For this purpose, it undergoes N-acetylation catalyzed by serotonin N-acetyl transferase (SNAT) to form N-acetylserotonin, which is further converted into melatonin by acetylserotonin O-methyltransferase (ASMT) and/or caffeic acid O-methyltransferase (COMT). Melatonin can also be synthesized from serotonin via another reaction sequence: the synthesis of 5-methoxytryptophan involving ASMT and COMT, followed by its conversion by SNAT (Wang et al., 2024).

Melatonin is considered one of the molecules involved in regulating seed germination, especially under stress conditions. Melatonin in seeds is thought to be primarily required to protect embryonic and reproductive tissues from oxidative damage (Manchester et al., 2000). Consequently, exogenous melatonin has recently been considered a means to increase the germination rate of seeds with low sowing quality (Yan et al., 2020; Yu et al., 2021). In our studies, a positive effect of a 3-hour priming with melatonin solutions at concentrations of 20 and 50 μM on the germination of aged seeds of rye and triticale—cereal species characterized by accelerated aging, especially when stored under fluctuating temperature and humidity—was established for the first time (Kolupaev et al., 2024). Melatonin treatment was shown to significantly decrease superoxide anion radical generation by seedlings of both crops, stabilizing hydrogen peroxide levels and lipid peroxidation products. Under melatonin exposure, an increase in superoxide dismutase and catalase activities was observed in both crops, alongside increased peroxidase activity in triticale. Anthocyanin content also increased in the seedlings of both cereals following melatonin treatment.

Using various plant species as models, the positive effect of seed priming with melatonin on germination under abiotic stressors of different natures (drought, salinity, extreme temperatures, etc.) has been demonstrated (Wang et al., 2024). Most studies used long-term (12–24 h) seed treatment with melatonin solutions. Our research demonstrated the possibility of shortening the duration of wheat caryopsis treatment with 20 μM melatonin to 3 hours, yielding a noticeable protective effect under osmotic stress (15 % PEG 6000 or 150 mM NaCl) (Taraban et al., 2024). Caryopsis priming with a melatonin solution mitigat-

ed stress-induced reduction in seed germination capacity and seedling growth inhibition. Stress factors decreased amylase activity in caryopses and lowered sugar content in shoots, whereas melatonin seed treatment eliminated these effects. Furthermore, melatonin priming reduced manifestations of oxidative stress. Strong positive correlations between caryopsis germination/shoot growth parameters and amylase activity, sugar content, and catalase activity indicate the contributions of carbohydrate metabolism changes and antioxidant system functioning to the implementation of melatonin's stress-protective action.

Serotonin, which, like melatonin, belongs to the indoleamines, has recently been viewed not only as a melatonin precursor but also as a compound performing regulatory functions in plant cells (Amiri et al., 2026). Our pilot studies showed that wheat seed priming with serotonin solutions increased seed germination rate and seedling biomass accumulation under simulated drought (exposure to 12 % PEG 6000) (Колупаев та ін., 2026). Serotonin significantly increased soluble carbohydrate content in shoots, preserved the anthocyanin pool under stress conditions, and reduced manifestations of oxidative stress. Overall, the stress-protective effects of serotonin, including its role during seed germination under adverse conditions, remain poorly investigated. It is hypothesized that the effect of exogenous serotonin on plants is associated with its rapid conversion to melatonin. However, in our experiments conducted on identical model, significant differences were detected in the effective concentrations of both compounds as seed germination enhancers. For melatonin, these concentrations were 10–50 μM , whereas for serotonin, they were an order of magnitude lower at 1–5 μM . This suggests that serotonin possesses its own intrinsic stress-protective activity. At the same time, unlike melatonin, serotonin's mechanisms of action remain poorly understood. Hypothetical serotonin receptors are unknown, and the involvement of other signaling molecules in mediating serotonin's action in plants has received little study (Sun et al., 2025; Wang et al., 2025).

As noted above, L-tryptophan serves as the precursor for both serotonin and melatonin syntheses. This amino acid, when applied exogenously, like serotonin and melatonin, can enhance the germination of cereal caryopses (specifically wheat) under stress conditions. In our pilot experiments, a significant increase in amylase activity in caryopses and sugar content in shoots was recorded under the influence of L-tryptophan. Simultaneously, as observed with melatonin and serotonin, priming wheat caryopses with tryptophan reduced oxidative stress markers in shoots under simulated drought (Колупаев та ін., 2026). The mechanisms of tryptophan's influence on seed germination and seedling tolerance to abiotic stressors remain under-researched. However, effective working concentrations of tryptophan (50–200 μM) significantly exceed those for melatonin and especially serotonin, indicating that its effects are mediated by enhancing the syntheses of these indoleamines. At the same time, the question remains open regarding the potential role of other diverse compounds formed during tryptophan metabolism, including auxin. Moreover, in other plant species, enhanced seed germination was observed following tryptophan priming at lower concentrations – 10^{-5} M and even 10^{-9} M (Mustafa et al., 2018) – indirectly indicating the existence of mode-of-action mechanisms independent of conversion into melatonin, serotonin, or auxin.

Overall, tryptophan and its downstream metabolites serotonin and melatonin can be viewed as a unique hub for regulating seed germination under stress conditions and likely for activating plant stress-protective systems. However, practical applications of these compounds are hindered by a lack of research into their metabolic fates following exogenous administration, as well as by scarce information on the involvement of signaling intermediates in mediating their physiological effects. Further in-depth investigation into the mechanisms of action of these compounds is expected to accelerate the implementation of novel, cost-effective, efficient, and environmentally safe approaches to regulating seed germination and crop stress tolerance during early ontogeny.

**EFFECT OF ORGANIC NITRO COMPOUNDS ON THE INITIAL GROWTH
OF *TRITICUM AESTIVUM* L. UNDER A MODEL EXPERIMENT**

O. O. Kosko, T. M. Kolombar

*Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine,
e-mail: tonny.mount@gmail.com*

Common wheat (*Triticum aestivum* L.) is one of the major food crops worldwide and plays an important role in ensuring food security in many countries. The productivity of this crop largely depends on soil conditions, nutrient availability, and the absence of toxic contaminants (Wahsha et al., 2014). Under increasing anthropogenic pressure on agroecosystems, particularly in regions affected by technogenic disturbances or military activities, the risk of accumulation of various groups of organic pollutants in soils increases, potentially affecting plant physiological status and crop productivity.

Among organic contaminants, nitroaromatic compounds pose a particular ecotoxicological concern, as they may enter the environment through industrial processes, combustion of organic materials, the use of explosives, fuels and lubricants, and destruction of military equipment (Ju, Parales, 2010; Tiwari et al., 2019). These compounds are characterized by high environmental persistence, the ability to remain in soil for long periods, and toxic effects on different groups of organisms (Huang et al., 2021). In addition, nitroaromatic compounds may accumulate in soil and alter its biological properties, affecting both soil microorganisms and plants.

It is known that the impact of nitroaromatic compounds on plants may manifest as inhibition of seed germination, alterations in morphometric parameters, disruption of root development, and reduced growth intensity (McFarlane et al., 1990). Early stages of plant ontogenesis are particularly sensitive to toxicants because fundamental physiological mechanisms of adaptation to environmental stress factors are established during this period. Recent studies have also demonstrated that certain nitrophenolic compounds may induce pronounced phytotoxic effects even at low concentrations, causing changes in growth parameters and physiological status of plants (Adamek et al., 2024).

Considering the need to assess the ecological status of lands disturbed by military activities, studies on the effects of organic nitro compounds on agricultural crops are becoming increasingly important. Investigating plant responses to such pollutants is essential for environmental risk assessment, prediction of agroecosystem conditions, and the development of approaches for the restoration of disturbed areas.

Seeds of *T. aestivum* were used in the experiment. The effects of three organic nitro compounds were investigated: 5-nitrosalicylaldehyde, 4-nitrophenol, and 4-nitroaniline. Solutions with concentrations of 0.1, 1, 10, and 100 mg/kg were prepared for each compound. Seeds in the control treatment were germinated in distilled water. Seeds were sown in sectional plastic trays and germinated under laboratory conditions under a phytolamp with a light regime of 12 h light / 12 h dark. On the 10th day, shoot and root lengths of seedlings were measured.

In the control treatment, the average shoot length of *T. aestivum* seedlings was 10.01 ± 3.24 cm, whereas the average root length was 5.76 ± 2.85 cm. These values were used as baseline parameters for comparison of the effects of the studied compounds.

The results demonstrated that 5-nitrosalicylaldehyde exerted concentration-dependent effects on the growth of *T. aestivum*. At a concentration of 0.1 mg/kg, stimulation of shoot growth was observed, reaching 11.18 ± 0.64 cm (111.72 % of the control). At 1 mg/kg, the stimulatory effect increased and shoot length reached 12.68 ± 0.86 cm (126.67 % of the control). At the same time, root length gradually decreased to 5.14 ± 0.17 cm at 0.1 mg/kg and to 4.93 ± 0.91 cm at 1 mg/kg. At 10 mg/kg, inhibition

of shoot growth (8.41 ± 0.21 cm) and root growth (4.88 ± 0.84 cm) was observed. At 100 mg/kg, seed germination did not occur, indicating complete toxicity of the compound at high concentrations.

Among the tested compounds, 4-nitrophenol exhibited the strongest toxic effect. Even at the lowest concentration (0.1 mg/kg), shoot length decreased almost twofold to 5.60 ± 0.24 cm. At 1 mg/kg, shoot length remained at a similar level (5.54 ± 0.36 cm). The root system appeared even more sensitive to 4-nitrophenol exposure: root length reached only 2.30 ± 0.07 cm at 0.1 mg/kg and 1.93 ± 0.01 cm at 1 mg/kg. At 10 mg/kg, partial recovery of growth was observed; however, the values remained lower than those of the control treatment. At 100 mg/kg, seed germination was completely inhibited.

The effect of 4-nitroaniline was characterized by moderate inhibition of growth processes. Shoot length reached 7.52 ± 2.15 cm at 0.1 mg/kg, 8.20 ± 2.24 cm at 1 mg/kg, and 6.71 ± 1.98 cm at 10 mg/kg. The root system was more resistant to the effects of this compound, with root length varying between 4.96 and 5.12 cm, corresponding to 86–90 % of the control values. However, at the highest concentration (100 mg/kg), seed germination was also completely inhibited.

The results obtained indicate that organic nitro compounds affect the initial growth of *T. aestivum* differently. Among the tested compounds, 4-nitrophenol was the most toxic, significantly inhibiting the development of both shoots and roots even at low concentrations. In contrast, 5-nitrosalicylaldehyde exhibited a stimulatory effect on shoot growth at low concentrations, whereas high concentrations caused toxicity. 4-Nitroaniline induced moderate growth inhibition, while the root system of *T. aestivum* appeared more resistant to its effects.

Thus, the results confirm the sensitivity of *T. aestivum* to soil contamination with nitroaromatic compounds. The observed changes in morphometric parameters may be used for bioindication of organic contamination and assessment of the ecological condition of agroecosystems. The obtained data are important for further studies on the effects of organic pollutants on agricultural crops and for the development of approaches to the restoration of contaminated soils.

REFERENCES

- Adamek M. *Scientific Reports*. 2024. 14:2198.
Huang T. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. 22(16): 8557.
Ju K.-S. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 2010. 74(2):250–272.
McFarlane C. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 1990. 9(4):513–520.
Tiware J. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. 26:28650–28667.
Wahsha M. *Journal of Geochemical Exploration*. 2014. 147: 189–199.

**REGULATION OF CELL WALL COMPOSITION OF FLAX FIBRE UNDER
CHANGING ENVIRONMENTAL CONDITIONS USING BIOSTIMULANTS:
SEARCHING FOR APPROACHES**

L. Kozeko^{1,2}, S. Jurkonienė², L. Kryvosheeva³

¹*M.G. Kholodny Institute of Botany of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
e-mail: liudmyla.kozeko@gmail.com*

²*Nature Research Centre, Vilnius, Lithuania, e-mail: sigita.jurkoniene@gamtc.lt*

³*Institute of Bast Crops of the NAAS of Ukraine, Hlukhiv, Sumsk Obl., Ukraine*

Common flax (*Linum usitatissimum* L.) is a traditional bast crop in Ukraine and Lithuania. Fiber flax is a high-quality fibre source, important for textile production and various technical purposes. The quality of the fibre depends on the composition of the cell wall, mainly on the cellulose content, which in flax is 65–90 %. In addition, the high demands on growing conditions make flax sensitive to climate change and anthropogenic factors. Until now, the main approaches to increasing fibre production and quality have been the development of new varieties and improving agricultural technology, which requires quite a long period of time. A promising approach to increasing the productivity and resilience of crops is the use of biostimulants. Increasing cellulose production using natural biologically active substances makes it possible to increase the efficiency of the existing flax varieties at the expense of the plant's internal reserves (Paparella et al., 2015; Lee, Kasote, 2024). At the initial stage of the research, screening of Ukrainian and Lithuanian flax varieties is currently underway to identify the most promising ones. Ukrainian varieties 'Gladiator', 'Hetman', 'Siversky', 'Esman', 'Usivsky' and Lithuanian varieties 'Kastytis' and 'Rasa' have been analysed. The selection of a biostimulant is carried out by screening biologically active substances of different classes, which may affect cell wall composition and improve stress tolerance, including phytohormones, amino acids, and polyamines. Seed priming and foliar treatment of juvenile plants are applied. Morphometric, biochemical and microscopic features are used to characterize changes in the quality of flax fibre. The results of the screening will be shown (Joint Ukrainian-Lithuanian R&D Program of the Ministry of Education and Science of Ukraine (projects M/85-2026) and the Research Council of Lithuania (projects S-LU-26-7)).

REFERENCES

- Paparella et al. *Plant Cell Rep.* 2015. 34:1281–1293.
Lee, Kasote. *Plants.* 2024. 13:446.

**MICROMORPHOLOGY AND ULTRASTRUCTURE OF RAPESEED LEAVES
UNDER DROUGHT AFTER PROLINE AND GABA TREATMENT**

**L. Kozeko^{1,2}, D. Klymchuk¹, Y. Akimov¹, Y. Ovcharenko¹, T. Vorobyova¹,
V. Gavelienė², T. Žalnierius², S. Jurkonienė²**

¹*M.G. Kholodny Institute of Botany of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
e-mail: liudmyla.kozeko@gmail.com*

²*Nature Research Centre, Vilnius, Lithuania, e-mail: sigita.jurkoniene@gamtc.lt*

Foliar treatment of plants with biologically active molecules is considered a promising approach to increasing plant drought resistance. Amino acids proline and γ -aminobutyric acid (GABA) accumulate in plant cells under stressful conditions and play different roles in cellular protection. In addition, GABA downregulates anion uptake by guard cells and reduces the stomatal opening and transpirational water loss (Xu et al., 2021). In our preliminary studies, foliar application of proline and GABA enhanced tolerance of plants to progressive soil drying (Jurkonienė et al., 2023; Kozeko et al., 2025). They stimulated plant growth and survival after severe drought, had positive effects on water status of plants, chlorophyll content, stress-induced endogenous proline accumulation etc.

Here, we investigated effects of exogenous proline and GABA on leaf micromorphology and mesophyll cell ultrastructure in rapeseed (*Brassica napus* L., cv. 'Visby') under normal and drought conditions. Two-week-old plants grown under normal conditions were sprayed with 0.1 mM proline, 0.1 mM GABA or their combination, and then half of the plants in each treatment group were subjected to gradual soil drying for 7 days. Control plants were well-watered and sprayed with dH₂O. The upper mature leaves were analysed. The micromorphology of the epidermal surface of leaves was studied using scanning electron microscopy (JFC-1100, Jeol, Japan). The epidermal surface of the leaves had cuticular wax, the amount of which increased under drought, especially on the adaxial surface. All variants of amino acid treatments were found to reduce the stomatal aperture width on both leaf surfaces under drought, which apparently leads to a decrease in stomatal conductance. It is noteworthy that under normal conditions the action of amino acids was different: proline, both alone and in combination with GABA, increased aperture opening on both leaf surfaces, whereas GABA increased it on the adaxial side and decreased it on the abaxial side. This demonstrates the specificity of GABA function in stomata depending on the leaf surface. Ultrastructure of palisade parenchyma cells of leaves was studied using transmission electron microscopy (JSM-1230, Jeol, Japan). Changes in cell ultrastructure under drought after application of amino acids were characterized. It was found that the most significant changes were induced by GABA under drought, mainly in chloroplasts. GABA application caused a significant reduction in size of starch granule, indicating its role in regulating starch and sucrose metabolism under drought conditions. These data showed that cellular and molecular mechanisms of exogenous proline and GABA include a reduction of stomatal aperture and specific ultrastructural changes in leaf mesophyll cells, indicating alterations in carbohydrate metabolism.

The work was carried out with the support of the Joint Ukrainian-Lithuanian R&D project of the Ministry of Education and Science of Ukraine (M/49-2023) and the Research Council of Lithuania (S-LU-22-4).

REFERENCES

- Jurkonienė S. et al. *Plants*. 2023. 14(6): 860.
Kozeko L. et al. *Physiol. Plant*. 2025. 177: e70629.
Xu B. et al. *Nat. Commun*. 2021. 12:1952.

**FROM MEDICINAL PLANTS TO MACROMYCETES: ESTABLISHING
A PLATFORM FOR STUDYING STRESS-RESPONSIVE EXOSOME-LIKE
NANOVESICLES AS EMERGING BIOACTIVE NANOCARRIERS**

T. Krupodorova, M. Palladin, T. Zaichenko, A. Yemets

Institute of Food Biotechnology and Genomics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
e-mail: yemets.alla@nas.gov.ua

Exosome-like nanovesicles (ELNVs), a specialized group of extracellular vesicles, have emerged as important mediators of intercellular communication and stress adaptation in plants and fungi. These nanosized vesicles are produced by a wide range of organisms and transport diverse molecular cargo, including proteins, lipids, polysaccharides, metabolites, mRNAs, miRNAs, and regulatory molecules that influence cellular homeostasis and interactions with surrounding organisms. Recent advances in plant and fungal biology indicate that environmental stresses, including oxidative stress, heat, drought, salinity, osmotic imbalance, nutrient deficiency, pathogen attack, and mechanical or cell wall damage, strongly regulate ELNV biogenesis, secretion, and cargo composition. Stress-induced ELNV function as adaptive signaling systems by transferring protective proteins, antioxidant enzymes, defense-related molecules, and regulatory RNAs that contribute to cellular survival and systemic responses.

In plants, extracellular vesicles participate in defense signaling, stress adaptation, and communication between plant tissues, while also carrying biologically active compounds with antioxidant, anti-inflammatory, immunomodulatory, and therapeutic potentials, when it comes to medicinal plants. Plant-derived ELNVs have attracted increasing interest as natural nanocarriers due to their biocompatibility, low toxicity, and potential applications in drug delivery, and regenerative medicine. Similarly, edible and medicinal macromycetes are also promising sources of ELNVs because they can be cultivated under controlled conditions and produce a wide range of biologically active metabolites.

The aim of our study was to investigate the influence of cultivation conditions and to establish optimized protocols for the isolation and characterization of ELNVs from selected edible and medicinal macromycetes. For this purpose, *Crinipellis schevczenkoi*, *Cyclocybe cylindracea*, *Ganoderma lucidum*, *Fomitopsis betulina*, *Hypsizygus marmoreus*, and *Pleurotus eryngii* were cultivated under solid and submerged culture conditions. The effects of cultivation approaches, nutrient composition, and carbon and nitrogen sources on radial mycelial growth and biomass accumulation were evaluated. The studied fungi exhibited distinct growth responses depending on cultivation conditions and nutrient composition. Glucose–peptone–yeast medium promoted higher biomass accumulation and more stable growth than membrane-based cultivation, demonstrating the importance of nutrient availability for fungal development. Under the optimized cultivation conditions, all three fungal species produced sufficient biomass for subsequent ELNV isolation. It was established, that cultivation conditions associated with certain stress factors influenced fungal growth patterns and may be important regulatory factors affecting the biosynthesis and final yield of ELNVs.

ELNVs were isolated from fungal mycelium using differential centrifugation and ultracentrifugation following optimization of homogenization procedures. Dynamic light scattering and transmission electron microscopy confirmed the presence of nanosized vesicles in all fungal preparations, with particle sizes ranging from 20 to 700 nm. The predominant population consisted of small vesicles averaging 45–50 nm, while larger vesicles ranged from 450–700 nm. As a result of a series of studies, it was confirmed that growth conditions have a significant impact on the quantitative yield of ELNVs from the studied macromycetes.

Thus, the findings demonstrate that cultivation conditions and nutrient availability are critical factors influencing medicinal macromycete growth and ELNV formation. The developed cultivation and isolation platform provides a reproducible approach for obtaining ELNVs from macromycetes and supports future comparative studies of stress-associated ELNV biogenesis, cargo composition, and biological functions. Our next research objective is to analyze and compare the protein, lipid, RNA, and DNA composition of ELNVs isolated from the studied macromycetes and to evaluate how cultivation conditions associated with fungal stress influence vesicle composition and biological functions. These findings highlight the potential of medicinal macromycetes as sustainable sources of bioactive ELNVs for applications in biotechnology and biomedicine.

The work was carried out with the financial support of the National Research Foundation of Ukraine (project #2025.07/0306 "Preparation and biological activity of exosome-like nanovesicles of macromycetes and prospects for their practical application", 2026–2028).

**THE USE OF *ROBINIA PSEUDOACACIA* AS A PIONEER SPECIES
IN THE REMEDIATION OF SOILS CONTAMINATED WITH DINITROTOLUENE**

A. A. Kukoba, T. M. Kolombar

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine, e-mail: kukoba.alisa@gmail.com

Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania

Robinia pseudoacacia is a widely recognized pioneer species that contributes to the restoration of degraded and anthropogenically contaminated soils through its symbiotic association with nitrogen-fixing bacteria (Vítková et al., 2017). Its extensive root system supports the development of an active rhizosphere, where root exudates stimulate microbial communities capable of degrading toxic nitrogen-containing compounds, including dinitrotoluene (Thijs et al., 2014; Spanggord et al., 1991). Enhanced microbial activity promotes more efficient biodegradation of contaminants and accelerates ecosystem recovery (Spanggord et al., 1991; Podlipná et al., 2015). However, 2,4-dinitrotoluene (2,4-DNT) is toxic to terrestrial plants, highlighting the need to identify tolerant species suitable for phytoremediation (Rocheleau et al., 2010). Therefore, investigating the role of *R. pseudoacacia* in bioremediation is important for improving environmental safety and supporting the reclamation of contaminated sites.

The ability of *Pseudomonas* bacteria to aerobically degrade 2,4-DNT under laboratory conditions has also been investigated. Efficient transformation of 2,4-DNT into less toxic metabolites was demonstrated, and the major enzymatic pathways involved in its degradation were identified. These findings highlight the potential of microorganisms for the bioremediation of nitroaromatic compounds (Spanggord et al., 1991).

The aim of this study was to evaluate the potential of *R. pseudoacacia* as a pioneer tree species for the phytoremediation and reclamation of 2,4-DNT-contaminated soils. This was achieved by assessing shoot growth under exposure to different concentrations of 2,4-DNT, both with and without the application of mineral and organic fertilizers. To our knowledge, this is the first forestry-oriented study to examine the shoot growth of *R. pseudoacacia* in the context of phytoremediation and the reclamation of 2,4-DNT-contaminated soils.

R. pseudoacacia seedlings with a height of 15–18 cm were transplanted from their natural habitat to laboratory conditions. For the control treatment, 1 kg of relatively uncontaminated soil was evenly distributed on a glass plate in a layer 0.6–1 cm thick and moistened with 50–60 mL of water using a spray bottle. For the experimental treatments with 2,4-DNT at concentrations of 1.6, 8, and 40 mg/kg (2,4-DNT was first dissolved in 30 mL of acetone). The resulting solutions were then applied using a spray bottle to 50 g portions of soil, which were evenly spread over the glass surface to ensure uniform distribution. Each treatment included five replicates of *R. pseudoacacia* seedlings. Shoot length was measured on days 14, 28, and 42 after transplanting. On day 42, additional measurements of both the aboveground biomass length and root length were conducted.

In the control group, shoot growth followed the expected pattern of normal development, increasing from the initial value (100 %) to approximately 157 % by day 42 in the absence of toxicant exposure. At a concentration of 1.6 mg/kg, shoot length was initially lower than in the control (93.7 % on day 0); however, by day 42 it exceeded the control (111.9 %), indicating a low-dose stimulatory (hormetic) effect. At 8 mg/kg, shoot growth was initially stimulated, reaching 119.8 % of the control on day 0. This effect progressively diminished during the experiment, and by day 42 shoot length had declined to 93.2 % of the control, indicating a transition from stimulation to growth inhibition. At the highest concentration (40 mg/kg), shoot length was initially comparable to or slightly exceeded the control (approximately 105–106 %). However, growth was progressively suppressed, reaching only 67.0 % of the control by day 42, demonstrating the pronounced phytotoxic effect of the highest DNT concentration.

In the control group, shoot growth was gradual and consistent, increasing from the initial value (100%) to approximately 157 % by day 42, reflecting normal growth under unfertilized conditions. In the NPK treatment, shoot length was comparable to the control at the beginning of the experiment (approximately 99 %). By day 42, it reached approximately 112 % of the control, indicating a moderate stimulatory effect on shoot growth. In the biohumus treatment, initial shoot length was similar to that of the control (approximately 100 %). However, by day 42 it increased to approximately 121–122 % of the control, indicating the strongest growth-promoting effect among the fertilizers tested.

The greatest increase in shoot length during the first 14 days with 1.6 mg/kg was observed in the biohumus treatment, where shoot length increased from 16.14 ± 2.00 to 18.70 ± 1.08 cm. Between days 14 and 28, the highest growth rate was recorded in the NPK treatment, with shoot length increasing from 16.34 ± 1.13 to 23.58 ± 1.87 cm. During the final experimental period (days 28–42), the greatest increase was again observed in the biohumus treatment, with shoot length rising from 25.38 ± 0.94 to 32.26 ± 1.43 cm. These results indicate a more persistent growth-promoting effect of biohumus compared with mineral fertilization in *R. pseudoacacia*.

At a 2,4-DNT concentration of 8 mg/kg, the greatest increase in shoot length during the first 14 days was observed in the NPK treatment, where shoot length increased from 17.34 ± 2.04 to 17.70 ± 2.15 cm. Between days 14 and 28, the highest growth rate was again recorded in the NPK treatment, with shoot length increasing from 17.70 ± 2.15 to 21.20 ± 2.35 cm. During the final experimental period (days 28–42), the greatest increase was observed in the biohumus treatment, with shoot length rising from 20.12 ± 1.09 to 23.78 ± 0.64 cm. These results suggest that, under exposure to 8 mg/kg 2,4-dinitrotoluene, biohumus exerted a more persistent growth-promoting effect than mineral fertilization during the later stage of plant development.

At a 2,4-DNT concentration of 40 mg/kg, during the first 14 days the greatest increase in shoot length was observed in the biohumus treatment, where length increased from 19.26 ± 1.20 to 19.44 ± 1.19 cm. Between days 14 and 28, the most pronounced growth was also recorded in the biohumus treatment, with shoot length increasing from 19.44 ± 1.19 to 20.34 ± 1.21 cm. During the final experimental period (days 28–42), the highest increase was again observed under biohumus application, with shoot length rising from 20.34 ± 1.21 to 21.36 ± 1.11 cm. These results indicate a more pronounced compensatory effect of organic fertilization on the growth of *R. pseudoacacia* under conditions of high 2,4-DNT exposure.

The most pronounced negative effect was observed at a concentration of 40 mg/kg, where shoot growth was minimal. In the final stages of the experiment, plants exhibited leaf loss and progressive wilting, indicating a strong phytotoxic effect of the compound.

It was demonstrated that the application of fertilizers (NPK and biohumus) in combination with 2,4-DNT partially mitigated the adverse effects of the toxicant. Among the tested treatments, biohumus produced the most stable and long-term positive effect on shoot growth, resulting in more uniform growth dynamics compared with mineral fertilization.

The obtained results suggest the potential of *R. pseudoacacia* for use in bioremediation systems on soils with low to moderate levels of military-related contamination. They also highlight the potential benefits of organic fertilization in reducing the negative impact of xenobiotics on plant development.

REFERENCES

- Podlipná R. et al. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2015. 112:54–59.
Rocheleau S. et al. *Science of the Total Environment*. 2010. 408(16):3193–3199.
Spanggord R.J. et al. *Applied and Environmental Microbiology*. 1991. 57(11):3200–3205.
Thijs S. et al. *Microbial Biotechnology*. 2014. 7(4):294–306.
Vítková J. et al. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2017. 141:37–42.

**STABILITY OF GRAIN QUALITY TRAITS OF DURUM WHEAT UNDER
CONTRASTING AGROECOLOGICAL CONDITIONS OF THE WESTERN
FOREST-STEPPE OF UKRAINE**

D. O. Kyselov¹, A. O. Kyselov¹, O. V. Ninua², S. M. Kalenska³

¹*Private Enterprise "Zakhidnyi Buh", Lviv Region, Ukraine, e-mail: dmytro.kyselov@zahbug.com.ua*

²*LLC TAS AGRO, Kyiv, Ukraine*

³*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

The stability of grain quality traits in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) is one of the key criteria for cultivar selection under conditions of increasing climatic variability. High temperature fluctuations, irregular precipitation distribution, and unstable moisture supply during grain filling significantly affect protein accumulation, gluten properties, vitreousness, and overall technological suitability of grain for pasta production.

The aim of the study was to evaluate the stability of major grain quality traits of durum wheat cultivars under contrasting agroecological conditions of the Western Forest-Steppe of Ukraine and to identify genotypes with the highest technological suitability and adaptive stability.

Field experiments were conducted during 2023–2025 in three agroecologically distinct locations: Chornyi Ostriv, Zastavna, and Shymkivtsi. In combination with years, six environments were formed for genotype × environment interaction analysis. Ten European durum wheat cultivars were evaluated: Sambadur, Durofinus, Diadur, Tennodur, Wintergold, Winterstern, Tetida, Metis, Flexadur, and Duriamo.

The following grain quality traits were determined: protein content, grain vitreousness, yellow pigment content, wet gluten content, gluten index, and test weight. Statistical analysis included combined ANOVA, principal component analysis (PCA), AMMI analysis, GGE biplot, WAASB, and MTSI indices.

The results showed that genotype was the dominant source of variability for gluten index (96.44 %), wet gluten content (94.29 %), and yellow pigment content (92.98 %), indicating strong genetic control of these traits. For protein content, grain vitreousness, and test weight, the effects of environment and genotype × environment interaction were also significant.

The cultivar Durofinus demonstrated the best combination of technological quality traits, characterized by the highest protein content (14.06 %), wet gluten content (34.44 %), gluten index (83.78), yellow pigment content (9.48 ppm), and high grain vitreousness (92.39 %). Sambadur and Diadur also showed high integrated grain quality.

AMMI and GGE analyses confirmed structured genotype × environment interaction, while WAASB and MTSI indices identified Durofinus as the most balanced cultivar combining high grain quality and stability across environments. Wintergold showed high stability but lower absolute quality parameters.

The obtained results confirm that cultivar recommendation for durum wheat should be based not only on maximum grain quality but also on the stability of trait expression across environments. Integrated multi-trait evaluation allows the identification of genotypes with high adaptive potential and technological suitability for sustainable pasta production under climate variability.

REFERENCES

- Achilli, A.L., Avci, M.I., Haile, T.A., et al. 2026. *Plant Breeding*. 145: 142–165.
Al-Sayaydeh, R., Shtaya, M.J., Qubbaj, T., et al. 2023. *Plants*. 12(14): 2664.
Olivoto, T., Lúcio, A.D.C., da Silva, J. et al. 2019. *Agronomy Journal*. 111(6): 2949–2960.
Zingale, S., Spina, A., Ingraio, C., et al. 2023. *Plants*. 12(3): 530.

PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL MECHANISMS OF *PANICUM VIRGATUM* L. ADAPTATION TO ENVIRONMENTAL STRESS FACTORS

N. V. Nikishova

*M.M. Gryshko National Botanical Garden of the NAS of Ukraine,
Kyiv, Ukraine, e-mail: nnikisova7@gmail.com*

Monitoring plant responses to abiotic and biotic stresses has revealed insufficient resistance of many genotypes developed through conventional breeding programs. Therefore, modern breeding approaches should incorporate advanced strategies for analyzing physiological, biochemical, and molecular plant responses to environmental changes (Dos Santos et al., 2022). Ongoing climate change and increasing anthropogenic pressure on natural ecosystems necessitate the search for highly productive crops capable of adapting to unfavorable environmental conditions. One such species is switchgrass (*Panicum virgatum* L.), a perennial herbaceous grass of the family Poaceae with a C₄ photosynthetic pathway. The species is characterized by high ecological plasticity, the ability to produce substantial biomass even on marginal soils, and considerable genetic diversity, which contributes to its adaptation to a wide range of climatic conditions (Vogel, 2004).

P. virgatum plants are exposed to various abiotic and biotic stressors, including drought, temperature fluctuations, salinity, industrial pollution, and heavy metal contamination of soils. In response to stress, antioxidant defense mechanisms are activated, water balance regulation is enhanced, and photosynthetic activity is maintained, ensuring the preservation of plant productivity (Liu et al., 2015).

An important component of adaptation is the accumulation of phenolic compounds, flavonoids, and other secondary metabolites that perform antioxidant functions and increase plant tolerance to adverse environmental conditions. Studies have demonstrated the presence of significant amounts of flavonoids in switchgrass biomass, including rutin and quercetin derivatives, which may participate in plant defense responses (Ho et al., 2022).

P. virgatum also exhibits the ability to accumulate heavy metals and organic pollutants, highlighting its potential application in phytoremediation technologies for soil restoration (Ma et al., 2011). Its extensive root system contributes to improving soil structure and enhancing ecosystem stability.

Integrated analyses of transcriptomic, metabolomic, and physiological responses of *P. virgatum* to drought and subsequent rehydration have demonstrated a complex, dynamic, and diurnally regulated stress response. Drought significantly reduced leaf water potential, gas exchange, and chlorophyll fluorescence while inducing substantial changes in gene expression. Distinct differences were observed between predawn and midday responses. Simultaneously, decreased expression of genes associated with C₄ photosynthesis was accompanied by the accumulation of stress-related metabolites (Meyer et al., 2014).

Biomass accumulation in *P. virgatum* has been shown to be closely associated with enhanced photosynthetic activity and high photosynthetic rates (Cui et al., 2024). Furthermore, significant starch accumulation in the root system indicates its role in regulating photosynthetic activity during the later stages of plant development (Tejera-Nieves et al., 2023).

Moderate nitrogen limitation affects photosynthetic performance, carbon fixation, root-to-shoot ratio, and root architecture in *P. virgatum* (Huertas et al., 2024). Studies evaluating nitrogen fertilization rates of 0, 60, 120, and 240 kg ha⁻¹ demonstrated positive effects on chlorophyll fluorescence parameters and dry matter accumulation. Maximum dry matter production (378.13 g gallon⁻¹) was observed at 240 kg ha⁻¹ after flowering and exceeded the values obtained at 0, 60, and 120 kg ha⁻¹ by 24.33 %, 20.09 %, and 7.24 %, respectively. The highest chlorophyll fluorescence values were recorded at 120 kg ha⁻¹, whereas the greatest biomass accumulation occurred at 240 kg ha⁻¹. Multifactor analysis

confirmed that 240 kg ha⁻¹ provided the optimal balance between photochemical efficiency and biomass production under saline-alkaline soil conditions.

Switchgrass plants have demonstrated high tolerance to variations in precipitation patterns, which is associated with their adaptive mechanisms and may contribute to improved modeling of crop ecophysiology and productivity under climate change scenarios (Kieffer et al., 2024).

Under nitrogen deficiency, *P. virgatum* exhibits adaptive remodeling of membrane lipid composition. Nitrogen-containing phospholipids are partially replaced by nitrogen-free galactolipids, allowing plants to conserve nitrogen and redirect it toward other essential cellular functions. Simultaneously, increased accumulation of triacylglycerols occurs in both shoots and roots (Huertas et al., 2024). The accumulation of osmoprotectants, particularly proline, soluble proteins, and soluble sugars, plays a crucial role in maintaining plant growth and enhancing tolerance to alkaline salt stress (Garcia et al., 1997).

Research conducted at the M.M. Gryshko National Botanical Garden of the NAS of Ukraine confirms the successful introduction and complete acclimatization of *P. virgatum* under Ukrainian environmental conditions, with prospects for further naturalization. Owing to its C₄ photosynthetic pathway, switchgrass demonstrates efficient solar energy utilization and high tolerance to drought, low temperatures, frost, flooding, and overwintering conditions. The Department of Cultural Flora of the Botanical Garden has established a valuable germplasm collection comprising approximately 40 taxa developed through long-term introduction, breeding, and biotechnological programs. Comprehensive investigations have included biological, morphological, ecological, and biochemical characteristics, biomass and seed productivity, concentrations of target compounds, and the energy value of plant biomass. High-yielding forms with optimized productivity, sugar content, biofuel output, and overall energy efficiency have been developed. Further studies of biochemical and metabolic processes, as well as the role of *P. virgatum* in phytoremediation and carbon sequestration, remain highly relevant. The practical applications of this crop in green energy production, bioeconomy, soil improvement, and ornamental horticulture have been outlined.

REFERENCES

- Dos S. *Stresses*. 2022. 113-135.
Vogel K.P. *Agronomy* (Monograph.) 2004. 561–588.
Liu Y. et al. *Biotechnology for Biofuels*. 2015. 152.
Ho K.V. et al. *Agriculture*. 2022. 936.
Ma Y. et al. *Frontiers in Plant Science*. 2011. 45.
Meyer E. et al. *BMC Genomics*. 2014. 15:1-15.
Cui X. et al. *Industrial Crops and Products*. 2024 216:118721.
Tejera-Nieves M. et al. *Frontiers in Plant Science*. 2023. 13:1023571.
Huertas R. et al. *Environmental and Experimental Botany*. 2024. 222:105770.
Kieffer C. et al. *GCB Bioenergy*. 2024 16.8:e13138.
Garcia A.B. et al. *Plant Physiology*. 1997. 159-169.

**INFLUENCE OF ARBUSCULAR MYCORRHYZAL FUNGI ON THE FATTY ACID
PROFILE OF OILCROP SEEDS AS A MECHANISM OF INCREASING PLANT
RESISTANCE**

I. P. Petik¹, A. P. Belinska², D. S. Prokopenko², N. S. Yareminets²

¹*Ukrainian Scientific Research Institute of Oils and Fats of the NAAS of Ukraine, Kharkiv,
Ukraine, e-mail: petikigor1984@gmail.com*

²*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: anna_bielinska@ukr.net*

Introduction. Abiotic and biotic stresses are the main factors limiting the productivity of oilseed crops in modern agroecosystems. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMFs) play a key role in increasing plant tolerance to stress factors, activating systemic defense mechanisms, improving water and mineral metabolism (Samanta et al., 2025). One of the promising but insufficiently studied aspects is the influence of AMFs on the biochemical composition of seeds, in particular the fatty acid profile, which determines not only the nutritional value of oils, but also the resistance of the plant itself to oxidative stress through the modulation of membrane lipid metabolism (Ansari et al., 2026).

Purpose. To investigate the effects of different strains of AMH (*Rhizophagus irregularis*, *Funneliformis mosseae*, and *Gigaspora margarita*) on the chemical composition and fatty acid profile of sunflower and hemp seeds as a fundamental basis for biotechnological management of stress resistance and quality of oilseeds.

Materials and methods. Sunflower (*Helianthus annuus* L.) and hemp (*Cannabis sativa* L.) seeds grown under controlled conditions and inoculated with AMH strains *R. irregularis*, *F. mosseae*, or *G. margarita* were studied in comparison with the uninoculated control. The chemical composition (protein, lipid, dietary fiber content) and fatty acid profile of extracted seed lipids were determined by standard methods.

Results and discussion. It was established that AMF inoculation significantly affects the macro-nutrient profile of seeds in both crops. For sunflower, an increase in crude protein content by 6.2–8.7 % was recorded when using the *R. irregularis* strain, which is consistent with known data on enhanced nitrogen nutrition under mycorrhizal symbiosis (Samanta et al., 2025). In hemp samples, an increase in the proportion of dietary fiber (up to 12.3 % for *G. margarita*) was revealed, indicating a redistribution of carbon metabolites toward the synthesis of structural polysaccharides – a mechanism that enhances the mechanical resistance of tissues to stress.

The most significant changes were found for the fatty acid composition. The application of *F. mosseae* to sunflower increased the oleic acid content (C18:1, ω -9) by 4.6 % with a concomitant decrease in linoleic acid (C18:2, ω -6), which improves the oxidative stability of the oil. For hemp, inoculation with *G. margarita* stimulated the accumulation of α -linolenic acid (C18:3, ω -3) to 21.4 % (compared to 17.2 % in the control), resulting in a decrease in the ω -6/ ω -3 ratio from 4.2:1.0 to 3.1:1.0, which corresponds to dietary recommendations for balanced nutrition. Furthermore, a decrease in the content of saturated fatty acids (palmitic and stearic) by an average of 8–11 % was observed.

These results are directly relevant to the stress-adaptive potential of plants. It is known that AMF are capable of reducing lipid peroxidation level in tissues under stress conditions, as evidenced by a decrease in malondialdehyde (MDA) content in mycorrhized plants (Huang et al., 2026). The modification of the membrane fatty acid composition toward an increased proportion of long-chain unsaturated fatty acids is likely a key adaptive mechanism that ensures the preservation of membrane fluidity and functionality under temperature and osmotic stress. The increase in the proportion of oleic acid (mono-unsaturated) in *F. mosseae*-inoculated sunflower oil can be considered an additional protective factor

that reduces oxidative degradation of lipids induced by reactive oxygen species produced under stress conditions (Samanta et al., 2025).

Conclusions. Inoculation of sunflower and hemp seeds with AMF strains is an effective biotechnological approach for the targeted modification of the chemical composition and fatty acid profile of the seeds. The revealed changes, in particular the increase in oleic acid content in sunflower and the improvement of the ω -6/ ω -3 ratio in hemp, have a dual significance: they enhance the plant resistance to oxidative stress through optimization of the membrane lipid composition and improve the nutritional value and technological stability of the derived foods. These data provide a fundamental basis for the development of biotechnological strategies for managing the quality of oilseed raw materials under climate change.

REFERENCES

- Ansari R.A., Egamberdievich K.E., Fayziyevich B.X. et al. *Journal of Fungi*. 2026. 12(7):473.
Huang Y., Bi L., Zhu Y., Chen L., Yao R. *Journal of Fungi*. 2026. 12(2):122.
Samanta I., Ghosh K., Saikia R., et al. *Plant Signaling and Behavior*. 2025. 20(1):2525843.

**NOVEL CYTOKININ-LIKE LIGANDS ENHANCE SALT STRESS TOLERANCE
IN *CRAMBE ABYSSINICA* THROUGH MODULATION
OF CYTOKININ SIGNALING**

N. O. Pushkarova^{1,2}, N. Urbaníková¹, M. Vršek¹, A. I. Yemets², J. Hejatkó^{1,3}

¹*CEITEC – Central European Institute of Technology, Masaryk University,
Brno, Czech Republic, e-mail: pushkarovano@gmail.com*

²*Institute of Food Biotechnology and Genomics of the NAS of Ukraine,
Kyiv, Ukraine, e-mail: yemets.alla@gmail.com*

³*National Centre for Biomolecular Research, Faculty of Science,
Brno, Czech Republic, e-mail: hejatkó@sci.muni.cz*

Salinity represents one of the major abiotic constraints limiting crop productivity by inhibiting seed germination, suppressing root development, and disturbing hormonal homeostasis. Plant hormones cytokinins regulate plant growth, development, and stress adaptation through the multistep phosphorelay (MSP) signaling pathway. Although cytokinin-mediated stress responses have been extensively studied in model species, their role in the industrial oilseed crop *Crambe abyssinica* remains largely unexplored.

The aim of this study was to evaluate whether newly identified cytokinin-like ligands can modulate cytokinin signaling and improve salinity tolerance in *C. abyssinica*.

Seed germination, root elongation, and molecular reporter assays were performed under control conditions and under salt stress induced by 100 mM and 150 mM NaCl. Synthetic cytokinin-like ligands MU2225, MU2239, and MU2240 were tested at 500 nM together with *trans*-zeatin as a natural cytokinin control. Cytokinin signaling dynamics were monitored in transgenic hairy roots carrying the TCSv2:3xVENUS. The pattern of VENUS expression was detected by a confocal laser scanning microscope (Leica Stellaris-8 Falcon), with the solid-state laser set at 514 nm for excitation and 530 nm for emission.

Salt stress significantly delayed seed germination, with both 100 mM and 150 mM NaCl reducing early germination compared with untreated controls. However, under 100 mM NaCl, treatment with ligand MU2239 resulted in faster recovery and improved germination rate compared with salt-only controls. Under 150 mM NaCl, MU2239 exhibited the strongest positive effect among the tested compounds.

Root elongation assays showed that 150 mM NaCl caused a strong and statistically significant reduction in root length, whereas 100 mM NaCl produced only minor effects. Treatment with *trans*-zeatin significantly inhibited root growth even in the absence of stress, while MU2239 exhibited substantially lower inhibitory activity. Importantly, under combined salt treatment, MU2239 preserved root growth significantly better than *trans*-zeatin, particularly under moderate salinity.

Reporter analysis demonstrated that MU2239 induced the strongest activation of TCSv2-driven fluorescence among tested ligands. Under 150 mM NaCl, salt stress itself transiently increased cytokinin reporter activity; importantly, the combination of salt stress and MU2239 maintained sustained reporter activation throughout the measurement period, confirming biological activity of the ligand under adverse conditions.

These results demonstrate that the synthetic cytokinin-like ligand MU2239 effectively activates cytokinin signaling and partially mitigates the inhibitory effects of salinity on germination and root development in *Crambe abyssinica*. Our findings identify MU2239 as a promising candidate for cytokinin-based biostimulant development for stress-resilient industrial Brassicaceae crops.

REFERENCES

- Munns R., Tester M. *Annu. Rev. Plant Biol.* 2008. 59:651–681.
Hwang I., Sheen J., Müller B. *Annu. Rev. Plant Biol.* 2012. 63:353–380.
Skalák J., Nicolas K.L., Vaňková R., Hejatkó J. *Front. Plant Sci.* 2021. 12:644823.
Zürcher E., Tavor-Deslex D., Lituiev D. et al. *Plant J.* 2013. 75:462–474.
Nicolas Mala K.L., Skalák J., Zemlyanskaya E.V. et al. *J. Exp. Bot.* 2024. 75:6346–6368.

**STRUCTURE-BASED IDENTIFICATION OF SMALL-MOLECULE INHIBITORS
TARGETING ACETYLATION-DEPENDENT ATG8–AIM INTERACTIONS
IN PLANTS**

A. Rayevsky, Y. Blume

*Institute of Food Biotechnology and Genomics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
e-mail: rayevsky85@gmail.com*

ATG8 proteins are central regulators of selective autophagy, mediating cargo recognition through interaction with ATG8-interacting motifs (AIMs) (Nieto-Torres et al., 2021). Post-translational acetylation of lysine residues adjacent to the AIM-binding site alters the structural dynamics of ATG8 and may affect ligand recognition (Huang et al., 2015). In this study, we employed molecular dynamics simulations, structural clustering and structure-based virtual screening to identify compounds capable of selectively blocking acetylation-dependent ATG8–AIM interactions in plants. Comparative analyses of Arabidopsis ATG8A, ATG8H and ATG8I in acetylated and deacetylated states revealed distinct conformational ensembles suitable for selective ligand binding (Rayevsky et al., 2025). Pharmacophore models were generated from representative structures and used for high-throughput docking of commercial compound libraries. Candidate molecules were prioritized according to docking score, interaction pattern and strain energy. Selected complexes are currently undergoing Random Accelerated Molecular Dynamics simulations to estimate ligand residence time and binding stability. The identified lead compounds will be validated experimentally as potential chemical modulators of plant autophagy. These results provide a framework for developing isoform-selective ATG8 inhibitors and new molecular tools for investigating stress-induced autophagy in plants, consistent with recent studies demonstrating the ligandability of LC3/GABARAP proteins (Schwalm et al., 2024).

REFERENCES

- Nieto-Torres J.L. et al. *Trends Biochem. Sci.* 2021; 46:673–686.
Huang R. et al. *Mol. Cell.* 2015; 57:456–466.
Rayevsky A. et al. *Mol. Inform.* 2025; 44:e202500025.
Schwalm M.P. et al. *Nat. Commun.* 2024; 15:10204.

**RUBISCO ACTIVASE UNDER HEAT STRESS: A KEY REGULATOR
OF PHOTOSYNTHETIC THERMOTOLERANCE**

T. V. Sakhno¹, B. P. Minaev², M. M. Marenych¹, V. O. Minaeva², Y. E. Sakhno³

¹*Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine, e-mail: sakhno2003@ukr.net*

²*Bohdan Khmelnytsky Cherkasy National University, Cherkasy, Ukraine, e-mail: bfmin43@ukr.net*

³*Interdisciplinary Science and Engineering Laboratory, Department of Plant and Soil Sciences,
University of Delaware, Newark, USA, e-mail: sakhnoyura@gmail.com*

Molecular oxygen plays a dual role in photosynthesis. On the one hand, it is indispensable for aerobic metabolism and cellular energy production. On the other hand, O₂ competes with CO₂ for the active site of ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase (Rubisco), thereby reducing photosynthetic carbon fixation and crop productivity. Because atmospheric oxygen concentration (~21 %) greatly exceeds that of CO₂ (~0.04 %), the oxygenase activity of Rubisco is unavoidable, particularly under elevated temperatures when CO₂ solubility decreases more rapidly than O₂ solubility (Mohan et al., 2023; Stainbrook et al., 2024; Sakhno et al., 2026).

Unlike most biological substrates, molecular oxygen exists in its ground state as triplet dioxygen (³O₂), containing two unpaired electrons with parallel spins. This unique electronic configuration imposes spin restrictions on many oxidation reactions and largely determines enzymatic oxygen reactivity in biological systems (Minaev, 2021). Consequently, efficient oxygen activation requires specialized catalytic mechanisms capable of overcoming spin constraints while maintaining reaction specificity.

Recent studies of cofactor-independent oxygenases provide new insight into these mechanisms. These enzymes activate molecular oxygen without transition metals or organic cofactors, suggesting that precise substrate positioning, electron transfer pathways, and protein architecture can control oxygen reactivity despite its spin-forbidden ground state (Minaev et al., 2024). Such findings provide a conceptual framework for understanding oxygen activation in biological catalysis and raise important questions regarding the oxygenation reaction catalyzed by Rubisco, where the enzyme and reaction products are singlet molecules.

The oxygenase activity of Rubisco initiates photorespiration, which consumes ATP and reducing power while releasing previously fixed CO₂ and NH₃. Although photorespiration fulfills essential photoprotective and metabolic functions, it substantially decreases photosynthetic efficiency, particularly under elevated temperatures when oxygenation is favored (Minaev et al., 2021).

Therefore, increasing photosynthetic productivity requires not only understanding the biochemical properties of molecular oxygen and the factors governing Rubisco oxygenation, but also identifying regulatory mechanisms capable of maintaining Rubisco in its catalytically active state under environmental stress. Among these, Rubisco activase (RCA) has emerged as the central regulator of Rubisco function during heat stress.

The review (Sakhno et al., 2026) further integrates current knowledge on Rubisco assembly, chaperone-assisted folding, intracellular organization, and the regulatory role of RCA under heat and abiotic stress. Rising global temperatures associated with climate change increasingly constrain photosynthetic carbon assimilation and crop productivity, making the molecular mechanisms of heat tolerance a major focus of modern plant biology. Wheat, one of the world's most important food crops, loses approximately 6 % of its yield for every 1°C increase in temperature (Mohan et al., 2023). Heat stress disrupts membrane integrity, enzyme activity, redox homeostasis, and grain filling, while the beneficial effects of elevated atmospheric CO₂ on C₃ photosynthesis are largely offset by thermal damage. Because these responses are strongly genotype- and environment-dependent, improving heat tolerance requires an inte-

grated understanding of physiological, biochemical, and genetic mechanisms, supported by functional genomics, multi-omics approaches, and molecular breeding (Mohan et al., 2023).

Rubisco is often described as a two-faced Janus because it catalyzes two competing reactions: the carboxylation (addition of CO₂ and H₂O) as well as oxygenation (addition of O₂ and H₂O) to enolized ribulose 1,5-bisphosphate (RuBP). Both reactions are followed by C₂–C₃ bond cleavage, producing either two molecules of 3-phosphoglycerate (PGA) during carboxylation or one molecule each of PGA and 2-phosphoglycolate (PG) during oxygenation.

Rubisco's ability to activate the triplet molecular oxygen for production of two diamagnetic products clearly violates spin conservation rule. For a long time, this remained a major puzzle in quantum biochemistry: Rubisco ($\uparrow\downarrow$) + O₂ ($\uparrow\uparrow$) $\neq$ PGA ($\uparrow\downarrow$) + PG ($\uparrow\downarrow$)

In 2019, Minaev proposed a mechanism of O₂ activation in glucose oxidase (Minaev, 2002) to explain how spin prohibition is overcome in cofactor-free dioxygenases (Minaev, 2019). Rubisco is the first known cofactor-free dioxygenase and fits pretty well to the spin-orbit coupling (SOC) induced mechanism inside superoxide ion, which is the ultimate intermediate product of electron transfer from the enolized RuBP to oxygen molecule. In the triplet radical pair RuBP⁺...O₂[−] there is a high probability of the spin-flip transition to the singlet state (Minaev, 2002; 2019).

At the physiological level, RCA has emerged as the principal regulator of photosynthetic thermotolerance. Under elevated temperatures, RCA progressively loses its ability to remove inhibitory sugar phosphates from the Rubisco active site, resulting in Rubisco deactivation and reduced CO₂ assimilation. Studies in C₄ crops demonstrate that thermal limitation of photosynthesis is associated primarily with impaired Rubisco activation rather than decreased Rubisco abundance. Thermal acclimation depends not only on RCA abundance but also on isoform composition, post-translational modifications, oligomerization, and stromal factors such as Mg²⁺ and the ADP/ATP ratio, highlighting the importance of biochemical regulation for maintaining photosynthetic performance under heat stress (Stainbrook et al., 2024).

Recent studies further show that evolutionary diversification of the *Rca* gene and the presence of heat-responsive RCA isoforms contribute to plant thermotolerance. Accordingly, engineering thermostable RCA variants through gene editing or exploitation of natural diversity has emerged as a promising strategy for sustaining Rubisco activation, photosynthetic efficiency, biomass production, and grain yield under elevated temperatures. Because heat tolerance is a complex trait, optimization of RCA should be integrated with modern breeding, genomics, and systems biology approaches (Wijewardene et al., 2021).

Overall, Rubisco activity under heat stress is determined by the coordinated regulation of RCA, post-translational modifications, stromal metabolism, Mg²⁺ availability, and cellular energy status. Future efforts should focus on identifying thermostable RCA variants and improving coordinated regulation of the Rubisco–RCA system to enhance photosynthetic efficiency and crop productivity under future climate warming scenarios (Amaral et al., 2024).

REFERENCES

- Sakhno T.V., Minaev B.P., Marenych M.M. et al. *Next Research*. 2026. 11:101984.
Stainbrook S.C., Aubuchon L.N., Chen A. et al. *Biosci. Rep.* 2024. 44(10): BSR20240353.
Mohan N., Jhandai S., Bhadu S. et al. *Plant Sci.* 2023. 336:111834.
Minaev B. *Biomed. J. Sci. Tech. Res.* 2021, 38: 30462-30472.
Minaev B.P., Sakhno T.V., Panchenko O.O. et al. *Theor. Exp. Chem.* 2024. 60:91-107.
Minaev B.F. *RIKEN Review*. 2002. 2: 147-149.
Minaev B.F. *Chem. Physics*. 2019. 251: 61-68. doi: 10.1016/j.chemphys.2019.01.021.
Wijewardene I., Shen G., Zhang H. *Stress Biol.* 2021. 1:2.
Amaral J., Lobo A.K.M., Carmo-Silva E. *New Phytol.* 2024. 241:35-51.

**PHYTOTOXICITY ASSESSMENT OF 2,4-DINITROTOLUENE
ON *VICIA SATIVA* L.**

M. V. Sheetova, T. M. Kolombar

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine, e-mail: sheetovam@gmail.com

Vicia sativa L. or common vetch or garden vetch is an annual plant species of the genus *Vicia* and family Fabaceae, which was widely distributed in Europe, West Asia, and Northern Africa but it is cultivated throughout the Northern Hemisphere (Hollings et al., 1978). *V. sativa* is used as green manure to increase soil water content or reduce soil erosion, as a forage crop, and for the extraction of essential oils and ecological restoration of contaminated soils (Sattell et al., 1998). This plant is frequently incorporated into pharmaceutical formulations because of its high therapeutic potential, including anticonvulsant, antimicrobial, antioxidant, and anti-inflammatory activities, among other properties (Akpınar et al., 2001). Also, this species is tolerant to shade and can be cultivated across a wide range of soil types; however, it is sensitive to waterlogging. *V. sativa* is a leguminous crop and is capable of nitrogen fixation. In warm regions, it can accumulate up to 179 kg N/ha, which significantly exceeds the capacity of other members of the Fabaceae family (Pál, Zsombik, 2024; Salehi et al., 2021).

2,4-Dinitrotoluene (DNT) is a highly toxic organic compound used in military practices as a plasticizer in different types of propellants and rocket propellants (Riefler, Medina, 2006). DNT typically enters the environment due to military activities. It enters, accumulates in the soil easily, and dissolves effectively under high soil moisture conditions. This characteristic makes DNT hazardous because of its ability to passively migrate and be taken up by plants (Pennington, Brannon, 2002). The biodegradation rate of DNT was the same as that of 2,4,6-trinitrotoluene. This compound exhibits high phytotoxicity and resistance to phytotransformation in most plant species. The search for plants that are tolerant to pollutants and can phytoremediate continues (Thijs et al., 2014). This method is considered more cost-effective and practical than incineration because vegetation can be cultivated in areas of active military conflict and military training grounds (Riefler, Guruswamy, 2006). However, there is limited information on the impact of DNT on higher plants.

For the experiment, a concentration of 8 mg/kg was used. In previous studies, this concentration typically marked the threshold at which growth inhibition began in plants such as *Medicago sativa* L., which also belongs to the Fabaceae family (Rocheleau et al., 2010).

DNT (4 mg) was dissolved in acetone (50 mL) and sprayed onto dry soil (50 g) evenly distributed on a glass surface.

Contaminated soil (50 g) was added to uncontaminated soil (450 g) and mixed thoroughly. A pre-measured amount of pure water (50 mL) was gradually added to the resulting mixture using a liquid atomizer. The mixture was placed on a clean glass plate, two long foam spacers were placed along the sides, and one short spacer was positioned at the bottom before being covered with another glass plate. In this way, one rhizotron was constructed. Immediately after this, five pre-germinated seeds of *V. sativa* were planted in the moistened soil at small intervals. Simultaneously, a few rhizotrons with 500 g of uncontaminated soil were prepared to serve as a control group.

Two weeks after planting the seeds, morphometric data, including shoot length, root length, and leaf dimensions (width and length), were recorded for both treated and control plants. Thereafter, graphs based on all obtained results were generated to determine the effect of DNT on the chosen plant.

The effect of DNT on *V. sativa* demonstrated that this compound has a negative impact on the growth and development of plants. The growth of the shoot system was inhibited by DNT toxicity. This result indicates a reduction in the overall plant viability under toxic stress conditions. The root system was also suppressed, but the response of individual plants was heterogeneous. Alongside growth inhibition,

some individuals demonstrated signs of an adaptive response, which manifested as relatively better root development.

The analysis of the shoot-to-root ratio showed an increase in the corresponding index from 2.86 ± 0.80 in the control to 3.21 ± 1.18 under DNT exposure (112 % of the control; $P = 0.350$). This indicates a more pronounced inhibition of root system development than that of the shoot system. For *V. sativa*, a slight decrease in the leaf length-to-width ratio was also observed (90.41 % of control) under DNT exposure, with a statistically significant difference ($P = 0.039$), which may indicate a reduction in relative leaf length.

The obtained results demonstrate the high sensitivity of *V. sativa* to the DNT effect and demonstrate the ability to use this species for the phytoremediation of contaminated soils.

REFERENCES

- Akpınar N. *Food Chemistry*. 2001. 74(4): 449–453.
Hollings E. et al. *Watsonia*. 1978. 12: 1–14.
Pál V. *Agronomy*. 2024. 14(1): 19.
Pennington J. *Thermochimica Acta*. 2002. 384(1-2): 163–172.
Riefler R. *Chemosphere*. 2006. 63(6): 1054–1059.
Riefler G. U.S. *Army Corps of Engineers*. 2006. 98 p.
Rocheleau S. *Science of The Total Environment*. 2010. 408(16): 3193–3199.
Salehi B. *Phytotherapy Research*. 2021. 35(2): 790–809.
Sattell R. *Oregon State University Extension Service*. 1998. EM 8695.
Thijs S. *Microbial Biotechnology*. 2014. 7(4): 294–306.

THE INFLUENCE OF *STREPTOMYCES* BACTERIA ON GROWTH PARAMETERS AND PROLINE CONTENT IN SPRING WHEAT SEEDLINGS UNDER SALINITY CONDITIONS

O. B. Shkoropad, N. D. Romaniuk

Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine
e-mail: Olena.Shkoropad@lnu.edu.ua

In the context of global climate change and necessity of sustaining world food security, optimizing the cultivation of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) remains a priority task for agrobiolgy. However, the yield potential of this crop is significantly limited by adverse environmental factors (Khalid, 2023; Nyaupane, 2024). In particular, progressive water deficit and excessive soil salinity negatively affect morphological parameters and the functional state of plants, resulting in the inhibition of growth processes and a decline in overall productivity (Neupane, 2022; Iqbal, 2023).

An environmentally friendly and highly effective alternative to chemical stimulants in modern crop production is the use of plant growth-promoting bacteria (PGPB). These microorganisms are capable not only of improving the availability of mineral nutrients but also of activating endogenous protective systems of the plant organism (Romano, 2020; Chieb, 2023; Fang, 2023). One of the key biochemical markers of stress development and, simultaneously, a mechanism of osmoregulation is the accumulation of free proline. Research on how beneficial microorganisms modify plant metabolism allows for a deeper understanding of the mechanisms underlying induced tolerance formation.

Given this, the aim of our work was to evaluate the regulatory impact of PGPB on morphometric parameters and the characteristics of proline accumulation in soft spring wheat seedlings under salt stress. The studies were conducted on two cultivars contrasting in terms of ecological and genetic characteristics – Dubravka and Myronivskyi Oksamyт (bred by the V.M. Remeslo Myronivka Institute of Wheat, Ukraine). Bacteria of the genus *Streptomyces*, known for their capacity to synthesize phytohormones, antioxidant compounds, etc., were utilized in this study (Trdá, 2015; Schillaci, 2019).

The study was carried out *in vitro* on agarized Murashige and Skoog (MS) nutrient medium supplemented with 100 mM NaCl to model osmotic stress and nystatin (25 mg/L) to prevent fungal contamination. Before sowing, wheat seeds were subjected to sequential sterilization in 96 % ethanol and a sodium hypochlorite (NaClO) solution in distilled water (1:1), followed by inoculation with the PGPB suspension. The experimental design included four treatments: 1) Control (C); 2) Salinity (NaCl); 3) Control + bacteria (C+B); 4) Salinity + bacteria (NaCl+B). The objects were cultivated in sterile jars under a controlled photoperiod (16/8 h) and temperature of 22–25°C. At the end of the cultivation period, the length of the organs (shoot and root) was measured, and the free proline content was determined using the Bates method.

Analysis of morphometric parameters revealed a significant negative effect of Na⁺ and Cl[–] ions on the growth processes of both wheat cultivars. In the salt stress control variant, a sharp inhibition of growth was observed: the shoot length of cv. Myronivskyi Oksamyт decreased by 72 % compared to the control (from 177.5 mm to 49.8 mm), while that of cv. Dubravka decreased by 25 % (from 118.5 mm to 88.3 mm). The growth of the root system was also substantially inhibited – root length declined to 21.6 mm and 26.7 mm for Myronivskyi Oksamyт and Dubravka, respectively.

Presowing inoculation with bacteria of the genus *Streptomyces* demonstrated a pronounced protective and growth-stimulating effect. Under optimal moisture conditions (C+B variant), the microorganisms stimulated shoot growth of cv. Myronivskyi Oksamyт by 25.5 % (up to 222.8 mm) and cv. Dubravka by 28.4 % (up to 152.1 mm). The effect of streptomycetes was most prominent under salinity (NaCl+B variant): the shoot length of cv. Myronivskyi Oksamyт increased 3.4-fold compared to the salt stress control and reached 170.0 mm, almost neutralizing the adverse impact of the stressor. For cv. Dubravka in the

NaCl+B variant, the shoot length was 163.7 mm, which even exceeded the values of the absolute control. A similar positive trend was noted for the growth of the root system (up to 43.4 mm and 38.3 mm, respectively).

Biochemical analysis confirmed that the development of salt stress is accompanied by the activation of endogenous plant defense systems. Under NaCl exposure, the content of free proline in the shoots of Myronivskyi Oksamyt increased 4.4-fold compared to the control (from 19.04 to 83.76 µg/g of fresh weight). In cv. Dubravka, proline accumulation under stress was less pronounced in shoots (a 2.6-fold increase to 42.77 µg/g); however, a significant spike in its content was recorded in the root system – nearly 4-fold compared to the control (up to 143.05 µg/g), indicating high sensitivity of the underground organs of this cultivar to osmotic shock. A vital scientific result is the fact that under the combined action of the stressor and bacterization (NaCl+B variant), the level of proline accumulation in plant tissues decreased substantially compared to pure salinity. In the shoots of Myronivskyi Oksamyt, the proline content dropped from 83.76 µg/g to control values (18.71 µg/g). In cv. Dubravka under NaCl+B conditions, the proline level in shoots decreased to 28.40 µg/g, and in roots, it was reduced by more than a half (from 143.05 to 62.54 µg/g).

Thus, such dynamics of metabolic processes indicate that inoculation with bacteria of the genus *Streptomyces* effectively maintains the physiological state of the plant and serves as a primary protective barrier. Consequently, the level of stress load on the plant's metabolism is significantly reduced, which minimizes the expenditure of energetic and plastic resources on the synthesis of endogenous osmoprotectors, ensuring the possibility of their redirection toward sustaining growth processes.

REFERENCES

- Chieb M. et al. *Front. Plant Sci.* 2023. 14:110-118.
Fang C. et al. *Microbiol. Res.* 2023. 268:127-135.
Iqbal S. et al. *Agronomy.* 2023. 13:456-464.
Khalid M. et al. *J. Plant Growth Regul.* 2023. 42:89-97.
Neupane S. et al. *Plants.* 2022. 11:1024-1032.
Nyaupane S. et al. *Environ. Exp. Bot.* 2024. 218:105-113.
Romano I. et al. *Plants.* 2020. 9:220-228.
Schillaci M. et al. *Microorganisms.* 2019. 7:345-355.
Trdá L. et al. *Plant Soil.* 2015. 396:25-39.

**ACTIVITIES OF ANTIOXIDANT ENZYMES IN CHLOROPLASTS OF FLAG LEAF
OF WINTER WHEAT UNDER SOIL DROUGHT**

O. G. Sokolovska-Sergiienko, D. A. Kiriziy, O. O. Stasik, N. M. Makharynska

*Institute of Plant Physiology and Genetics of the NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine, e-mail: Sokolovska_oksana@ukr.net*

Under unfavorable growth conditions associated with the development of stress, the production of reactive oxygen species (ROS) increases at the cellular level. Photosynthesis is also impaired under these conditions, primarily due to the imbalance between the photosynthetic electron transport chain (ETC) and the Calvin cycle, resulting in excessive ROS generation within chloroplasts. At the same time, elevated ROS levels play an essential signaling role by activating regulatory pathways involved in stress adaptation, plant development, and senescence. Therefore, the antioxidant defense system of chloroplasts becomes critically important under stress conditions. Superoxide dismutase (SOD) and ascorbate peroxidase (APX), which regulate intracellular ROS levels, are key components of this defense system. The aim of this study was to investigate the activities of SOD and APX in chloroplasts isolated from flag leaf of different winter wheat cultivars under soil drought and after rewatering.

The study was conducted on winter bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars Yednist, Podilska Nyva, and Darunok Podillia under pot-grown conditions. Throughout the growing season, soil moisture in the control treatment was maintained at 70 % of field capacity (FC). At the heading stage (BBCH 55), irrigation of the drought treatment was withheld, and soil moisture gradually reduced to 30 % FC over three days. This moisture level was maintained for the following seven days. Thereafter, irrigation was resumed to restore soil moisture to 70 % FC, which was maintained until the end of the growing season.

Enzyme activities were determined in isolated chloroplasts. SOD activity was determined by the nitroblue tetrazolium photoreduction method at 560 nm, whereas APX activity was measured spectrophotometrically at 290 nm according to the method of Chen and Asada.

SOD activity in chloroplasts isolated from flag leaf slightly decreased on the first day of drought in cultivars Yednist and Podilska Nyva compared with the control, whereas no significant changes were observed in Darunok Podillia. After seven days of drought, SOD activity increased significantly in cultivar Yednist relative to the control, while only a slight upward trend was observed in the other two cultivars. One week after rewatering, elevated SOD activity remained evident only in cultivar Yednist, whereas no significant differences between the control and drought-treated plants were detected in Podilska Nyva or Darunok Podillia.

APX activity did not differ significantly from the control in any cultivar on the first day of drought. Similar to SOD, a significant increase in APX activity after seven days of drought was observed only in cultivar Yednist, whereas APX activity in Podilska Nyva and Darunok Podillia remained close to the control level. One week after rewatering, APX activity in drought-treated plants of cultivars Yednist and Podilska Nyva exceeded that of the respective controls, while no significant differences were found between treatments in Darunok Podillia.

It should also be noted that under prolonged drought, APX activity in chloroplasts of cultivar Darunok Podillia increased to a greater extent than SOD activity, whereas cultivars Yednist and Podilska Nyva exhibited higher stability of the photosynthetic apparatus. This response may reflect adaptive mechanisms aimed at tighter regulation of H₂O₂ levels in chloroplasts. Previous studies have shown that under stress conditions and during the recovery period, H₂O₂ accumulation is positively correlated with the expression of genes involved in programmed cell death, whereas excessive H₂O₂ accumulation adversely affects leaf function.

In conclusion, the antioxidant defense system of chloroplasts in the flag leaf of cultivars Yednist and Podilska Nyva exhibited a stronger and more sustained response to soil drought than that of cultivar Darunok Podillia. These findings suggest that activation of antioxidant enzymes contributed to enhanced stability of the photosynthetic apparatus, thereby supporting higher photosynthetic performance both during drought stress and after rewatering.

**PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL PROFILE OF SORGHUM (*SORGHUM
SACCHARATUM* (L.) MOENCH) UNDER PROLONGED ABIOTIC STRESS**

L. I. Storozhyk¹. S. V. Zavhorodnia²

¹*Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of the NAAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
e-mail: larisastorozhyk1501@gmail.com*

²*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
e-mail: sveta_zavgor@ukr.net*

Global increases in atmospheric carbon dioxide concentration intensify the greenhouse effect, leading to more frequent and severe droughts. At present, moisture deficit is the main limiting factor for the sustainable development of global agriculture, posing significant threats to food security. Drought stress induces complex physiological and biochemical changes in plants, often resulting in wilting and, subsequently, death (Ma et al., 2026). Prolonged drought stress disrupts a range of physiological processes, causing intensive formation of reactive oxygen species (ROS), degradation of cell membranes, alterations in phytochemical concentrations, and depletion of photosynthetic pigments. To minimise damage, plants enhance the activity of antioxidant enzymes and accumulate compounds such as proline (PRO), phenols, flavonoids, and glutathione. Previous studies have established that plant adaptation to adverse conditions is achieved through complex regulation of components, involving modulation of degradation processes and accumulation of key metabolites (Storozhyk et al., 2025). In this study, a time-resolved drought stress model was applied to comprehensively analyse adaptation mechanisms in sorghum, despite the crop is drought-tolerant. The aim was to investigate physiological responses and changes in the phytochemical profile of sorghum plants depending on the duration of drought stress. The sugar sorghum hybrids 'Sugar-graze ARG' (Argentina), 'Medovyi' (Ukraine) agro-phytocoenosis was established at the Ivanivska Experimental Breeding Station (Sumy region, Okhtyrka district) of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet NAAS, located in the insufficiently moist zone of the Eastern Forest Steppe of Ukraine, under combined long-term drought and heat stress during organogenesis (HTC of 0.4).

Phytochemical profiles and physiological changes were identified in the laboratory using specialised scientific protocols (State Pharmacopoeia ..., 2008). The analysis revealed no significant differences among the hybrids regarding the traits studied. The results showed that drought stress lasting 10 days induced specific changes in the physio-biochemical parameters of sorghum leaves. Water loss intensified, reaching 82 % after 48 hours, 97 % after 4 days, and slowing to 25 % by day 7. Increasing moisture deficit was accompanied by a decline in photosynthetic pigments: total chlorophyll content decreased from 4 mg/g before drought to 3.2 mg/g after 48 hours, and to 2.1 mg/g after 7 days of continuous drought. This trend likely resulted from chloroplast damage and pigment degradation. Proline content (a key amino acid for osmotic balance) rose sharply: from 51–55 µg/g at early drought stages to 320 µg/g by day 7 (a six-fold increase), before declining to 147 µg/g by day 10. This process mitigates drought-induced chloroplast damage, maintaining chlorophyll levels essential for photosynthesis and energy metabolism. A similar trend was observed in enzymatic activity: peroxidase content increased to 250 units/g fresh mass after the beginning of stress, 371 units/g after 5 days, 413 units/g after 7 days, and decreased to 354 units/g by day 10. Thus, sorghum activates energy regulation mechanisms (photosynthesis) under short drought (<5 days), while after two days it engages membrane-support mechanisms (enzyme activity linked to amino acids), shifting from stress response to long-term tolerance and recovery, closing stomata to halt gas exchange and photosynthesis, entering anabiosis. Sorghum plants also produce phytochemicals acting as osmoprotectants and antioxidants to counter oxidative stress. Phenolic acids, naturally synthesised in high concentrations under fluctuating environmental conditions, were identified in sorghum leaves: glycosides 6–9 %, ferulic and *p*-coumaric acids 20–22 %, syringic, vanillic, and *p*-hydroxybenzoic

acids 2.4–3 %. After two days, glycosides and ferulic/*p*-coumaric acids rose to 25–33 %, syringic/vanillic/*p*-hydroxybenzoic acids to 2.7–3.6 %. By day 5, these components increased by 5 %, reflecting a protective response aimed at strengthening cell walls. Sorghum plants absorb atmospheric CO₂ and convert it into carbohydrates (sugars). A significant portion (10 %–15 % of total fixed carbon) of these sugars is transported through the phloem to the root system.

Carbohydrates (starch, sucrose, glucose, and fructose), which are energy substances, also varied: rising to 18 % after 2 days, 27% after 5 days, 35 % after 7 days, with no change by day 10, reflecting stomatal closure. Starch content declined slightly (2–3 %) due to breakdown into simple sugars, helping maintain osmotic balance and reduce water loss. The epidermal complex of sorghum leaves is characterized by pronounced xeromorphic features, which indicates a high level of plant adaptation to moisture deficiency. Epidermal cells have a linear-elongated shape in parallel rows. The structural organization of the epidermis involves the alternation of stomatogenic rows (containing the stomatal apparatus) with intercostal epidermal rows. The morphometric parameters of sorghum stomata are characterized by small sizes, this anatomical feature is compensated by a higher stomatal density: per unit area (1 cm²) of the epidermis, their number is twice as high as in corn. Such a structure of the stomatal apparatus — a decrease in the size of individual stomata while increasing their total number — is a key xeromorphic adaptation that effectively regulates the transpiration flow. It is worth noting that the closing cells of sorghum stomata are characterized by thickened cell walls, which ensures the stability of the tissues of the structure. Under conditions of severe water deficit, these cells retain functional stability, without losing the ability to restore turgor and normalize stomatal conductivity after restoration of the water regime. This confirms the high physiological plasticity of sorghum and its ability to rapidly regenerate metabolic processes.

Noteworthy, prolonged drought also altered sorghum root metabolite profiles, crucial for nutrient mobilisation during organogenesis. Roots exude phytochemicals into the rhizosphere in response to biotic stress. These compounds fall into two classes: low-molecular-weight (amino acids, organic acids, sugars, and phenolic acids) and high-molecular-weight (secondary metabolites such as mucilage and proteins). During early drought (up to 5 days), the leading zone and vascular cylinder of roots contained polyphenols (5.7 %), hydroxycinnamic acids (3.2 %), glycosides (2.3 %), starch (1.5 %), carbohydrates (1.7 %), and protein (1.2 %). In the absorption zone/root hairs, polyphenols fell to 4.6 %, acids to 3.5 %, and glycosides to 1.7 %, with starch, carbohydrates, and protein decreasing by 0.2–0.4 %. In the distal root zone (elongation/root cap), glycosides dropped by 0.9 %, hydroxycinnamic acids by 0.2 %, and polyphenols by 2.6 %. High-molecular-weight compounds also decreased 2–3 fold. Extending drought to 10 days halted this decline, as phytochemicals were needed to preserve antioxidant properties and protein binding. Proteins and enzymes act as chemical modifiers of toxic compounds, becoming beneficial under prolonged stress. A similar function is performed by various organic acids secreted by plant roots, the composition and quantity of which depends on the genotype. At the same time, phenolic compounds of root exudates can affect the availability of iron, forming complexes with it, and, therefore, increase the availability of phosphorus.

Thus, sorghum adjusted quantitative phytochemical profiles to sustain drought tolerance by slowing growth intensity. These findings are significant for implementing smart farming approaches based on precise monitoring of physiological and biochemical plant responses, optimising agronomic strategies, adapting cropping systems to stress factors, and enhancing yields through targeted risk management. Integrating physio-biochemical monitoring into smart farming strategies contributes to more resilient food systems.

REFERENCES

- Ma Q., Wang R., He F. et al. *BMC Plant Biol.* 2026, 26, 488.
- Storozhuk L.I., Tereshchenko I.S., Zavorodna S.V. et al. Formation of Sugar Sorghum Yield Depending on the Manifestation of Allelopathically Active Substances of the Crop. Odesa, 2025. 198 p. [in Ukrainian]
- State Pharmacopoeia of Ukraine (1st ed., 2nd supplement). Kharkiv, RIREH, 2008. 620 p. [in Ukrainian]

CYTOKININ HOMEOSTASIS DURING TOMATO REPRODUCTIVE DEVELOPMENT AND HEAT STRESS

A. Vainer¹, I. Rogachev¹, A. Aharoni¹, H. Yasuor²

¹*Weizmann Institute of Science, Department of Plant and Environmental Sciences, Rehovot, Israel,
e-mail: andrii.vainer@weizmann.ac.il*

²*Gilat Research Center, Volcani Agricultural Research Organization (ARO), Israel*

High temperatures disrupt tomato reproduction, particularly anther and pollen development, yet the contribution of cytokinins (CKs) to reproductive heat responses remains poorly understood. Here, we integrated light and confocal microscopy, hormone profiling, tissue-specific transcriptomics, reporter-line analysis, and functional genetics to characterize CK metabolism, transport, and signaling across tomato floral organs and to identify factors contributing to reproductive heat-stress responses.

CK metabolites displayed strong organ- and developmental-stage specificity. Isoprenoid CKs, including isopentenyladenine (IP)-type metabolites and glycosylated CK forms, were particularly abundant in developing stamens at the 3–7 mm floral-bud stages. This pattern was consistent with the enhanced stamen-specific CK response observed in *TCS::Neon-N7* reporter lines. The metabolic profiles were accompanied by coordinated expression of genes involved in CK biosynthesis, degradation, transport, and signaling. Members of the *CYTOKININ OXIDASE/DEHYDROGENASE (CKX)*, *ATP-BINDING CASSETTE G-TYPE TRANSPORTER (ABCG)*, and *PURINE PERMEASE (PUP)* families emerged as prominent candidate regulators of CK homeostasis in developing stamens and pollen.

Functional characterization of these candidates led to the generation of CRISPR-mediated tomato mutant lines targeting CKX3, CKX6, ABCG20, ABCG29, and PUP14. The *ckx3* and *ckx6* mutants accumulated higher levels of isopentenyladenine-type and glycosylated CKs, whereas the *abcg20*, *abcg29*, and *pup14* transporter mutants generally showed reduced CK accumulation. These mutations also altered the accumulation of hormones from other classes, indicating that disruption of CK homeostasis affects broader hormonal networks in reproductive tissues.

Prolonged heat stress for 10 days at 34/28°C reduced the CK response in pollen of *TCS::Neon-N7* reporter plants. Hormone profiling at the end of the treatment confirmed a significant reduction in CK concentrations, together with changes in several other hormone classes. In contrast, CK levels remained substantially higher in the *ckx* mutants under heat stress. Pollen-viability assays further showed that *ckx3* and *ckx6* mutants maintained higher pollen viability after heat treatment than the wild type, whereas the *abcg20*, *abcg29*, and *pup14* mutants tended to exhibit reduced viability.

Together, these results demonstrate that CK homeostasis is tightly regulated during tomato stamen and pollen development and is strongly disrupted by prolonged heat stress. Maintenance of elevated CK levels through reduced CK degradation was associated with improved pollen viability under high temperature, whereas impaired CK transport was associated with greater reproductive sensitivity. These findings identify CK degradation and transport pathways as potential targets for improving tomato reproductive thermotolerance, although the molecular mechanisms underlying the observed mutant phenotypes and their interactions with other hormonal pathways remain to be elucidated.

**DROUGHT TOLERANCE ASSESSMENT OF *PHASEOLUS* L. ACCESSIONS
UNDER LABORATORY CONDITIONS**

**A. O. Vasylenko¹, O. M. Bezuhla¹, N. O. Vus², V. V. Pozdnyakov¹,
O. V. Antsyferova¹**

¹*Yuriev Plant Production Institute of the NAAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: yuriev1908@gmail.com*

²*French National Institute for Agriculture, Food, and Environment (INRAE), Dijon, France*

Introduction. Climate change necessitates innovations in agriculture, particularly crop rotation. Key strategies include adjusting sowing dates, diversifying crops with legumes, and shifting cultivation zones. Common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) are important in European rotations but, due to large seeds, are vulnerable to drought during germination. Early-stage evaluation of genetic resources is thus essential, with PEG 6000 assays providing an effective screening tool. Drought tolerance differs across *Phaseolus* species. The secondary gene pool is a valuable source of traits: *Ph. coccineus* L. accumulates biomass rapidly, develops a strong root system, and can cross with *Ph. vulgaris* L., making it promising for breeding. *Ph. lunatus* L. cannot form productive hybrids yet harbors useful genes. Studies confirm drought tolerance in lima beans under Mediterranean conditions, with germination negatively correlated with PEG concentration (Martínez-Nieto et al., 2022). Given genetic divergence between dry and snap beans (Wallace et al., 2018), our study analyzed these groups separately.

Materials and Methods. The study involved 23 *Phaseolus* accessions from the National Center for Plant Genetic Resources of Ukraine. *Ph. vulgaris* L. cultivars included dry beans (UD0300227, UD0303351, UD0304171, UD0304280, UD0304281, UD0305128, UD0305129, UD0304283, UD0305126, UD0304482, UD0303884, UD0303917, UD0302272, UD0301043, UD0304427) and snap beans (UD0301032, UD0303805, UD0304010, UD0304466). *Ph. coccineus* L. was represented by UD0303446, and *Ph. lunatus* L. by UD0303348, UD0302583, UD0301530. Reference standards were UD0300227 (drought-resistant), UD0301043 and UD0304283 (susceptible), UD0304280 and UD0304281 (tolerant), UD0303351 (dry bean standard), and UD0301032 (snap bean standard). Experiments were conducted in the Laboratory of Plant Physiology and Biochemistry, Plant Production Institute na V. Ya. Yuriev, NAAS (Kharkiv, Ukraine), using seeds harvested in 2023. Germination was tested in PEG 6000 solutions at 5 % (PEG 5), 7.5 % (PEG 7.5), and 10 % (PEG 10), with distilled water as control. On day 7, shoot and root lengths were measured. Drought tolerance was evaluated by growth depression ($D = 100 - \text{seedling length under stress/control} \times 100$).

Results and Discussion. Dry bean cultivars showed the highest drought resistance: depression values were 7.74 %, 11.14 %, and 26.73 % at PEG 5, PEG 7.5, and PEG 10, respectively. *Ph. lunatus* L. and *Ph. coccineus* L. were more susceptible, with depressions of 18.04 % and 40.0 % already at PEG5. ANOVA and Tukey's test confirmed significant differences in total seedling length among accessions and species. Interestingly, some accessions increased growth under stress: UD0304171, UD0304280, UD0304283 at PEG5; UD0304280, UD0304281, UD0304427 at PEG7.5; UD0303805 at PEG10. Comparing responses of *Phaseolus* accessions with the drought resistant standard UD0300227 (PEG10), eight dry beans (UD0303351, UD0304171, UD0304427, UD0304280, UD0304281, UD0304283, UD0305128, UD0305129) and one snap bean (UD0303805) were identified as potentially drought tolerant. Conclusions The study demonstrated inter- and intra-species differences in drought tolerance of *Phaseolus* under PEG 6000 stress. *Ph. vulgaris* L. (dry beans) showed higher resilience than other species. Several accessions were identified as potential sources of drought tolerance at the seedling stage.

REFERENCES

- Martínez-Nieto M.I., González-Orenga S., Soriano P. et al. *Agronomy*. 2022, 12, 1715.
Lyle Wallace L., Arkwazee H., Vining K., Myers J.R. *Genes*. 2018, 9, 587.

**THE EFFECT OF SOIL CONTAMINATION WITH HEAVY METALS
ON THE GROWTH AND CYTOKININ BALANCE OF TRITICALE PLANTS**

N. P. Vedenicheva, M. M. Shcherbatiuk

*M.G. Kholodny Institute of Botany of the NAAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
e-mail: vedenicheva@ukr.net*

Introduction. Soil contamination with heavy metals as a result of anthropogenic activities poses a severe problem for agriculture. In Ukraine, the problem of this type of pollution has become extremely acute through the military operations (Leal et al., 2024). Disruption of key physiological processes such as photosynthesis, respiration, protein metabolism etc. because of heavy metal stress leads to substantial yield losses. The impact of heavy metals on the growth and development of cereal crops has been intensively explored in recent years. Particular attention is paid to the problems of improvement plant adaptability to pollutants (Vasilachi et al., 2023). Plants' protective mechanisms against heavy metals are regulated by the phytohormonal system, which includes cytokinins (Biswas, Pal, 2025). Application of exogenous cytokinins was shown to alleviate heavy metal toxicity, improve growth and photosynthesis, reduce metal uptake and oxidative stress (Hajam et al., 2024). Several investigations have demonstrated the changes in cytokinin status under heavy metal stress in various plants (Rahman et al., 2023). Transformations in endogenous cytokinin balance are thought to be the part of the signaling and defense mechanism that coordinates growth and productivity of cereals under metal pollution (Kolhi et al., 2026). Nevertheless, information about protective role of cytokinins in cereal crops confronted to heavy metal contamination is scarce.

Objective. This study aimed to elucidate the effect of soil contamination with various heavy metals on the cytokinin balance in triticale plants, in order to understand the regulation of adaptive processes in cereals.

Material and Methods. Triticale plants ($\times$ Triticosecale Wittmack, cv. ADM 9 Synthetic) are an amphidiploid hybrid of rye (*Secale cereale* L.) and wheat (*Triticum* spp.), combining the best biological and economic traits of those two species. The experiments were carried out in a vegetation laboratory with an air temperature of +16°C, a photoperiod of 16/8 h, day/night (light intensity 190 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$) and a humidity of 60 %. Triticale plants were grown in containers filled with a mixture of calcined river sand and vermiculite (10:1) soaked in Knop's solution (control) and with addition of manganese sulphate (Mn), cobalt nitrate (Co), and cadmium chloride (Cd) in concentration of 500 μM (experiment). 14-day-old plants were divided into aerial parts and roots. Cytokinin content in plant samples was analyzed by HPLC-MS method in the Agilent 1200 system using gradient elution.

Results and Discussion. The addition of heavy metal salts to the soil mixture affected the linear and growth parameters of triticale plants. Mn slightly reduced the height of the aerial parts of the plants (within the margin of error), while it had an insignificant positive effect on the root length. In roots, increase in fresh and especially dry weight was found. Co and Cd solutions exerted the pronounced negative effect, inhibiting the aerial part height by 28 % and 33 %, respectively. The roots were most severely impaired by these compounds, with their size being 33 % smaller than in the control group. Adverse effect of Co and Cd led to reduction in fresh and dry weight of both aerial parts and roots of triticale plants. Notably, root dry weight declined by 50 % under Cd contamination. Moderate degree of seedling lodging was noted. This study uncovered significant changes in cytokinin levels in 14-day-old triticale plants under heavy metal contamination. In aerial part, addition of Mn to soil induced a sharp rise in the content of all cytokinins, except isopentenyladenosine. The levels of *trans*-zeatin (Z), isopentenyladenine (iP) and *trans*-zeatin-*O*-glucoside (ZOG) elevated approximately fourfold. In roots, the most impressive increase (more than twice) was observed for *trans*-zeatin riboside (ZR) and ZOG. Co contamination of soil caused decline in the level of ZR in aerial part of plants, whereas the content of Z and iP remained almost unchanged and the content of isopentenyladenosine (iPA) and ZOG enhanced by 4 and 2.9 times, respectively. Reduction in free cytokinin concentrations occurred in roots under Co influence, although ZOG level was 2.8 times higher compared to control. Cd availability in soil suppressed accumulation of Z and ZR in aerial part of triticale plants (by 1.7 and 2.8 times, respectively), slightly elevated the content of iP (by 1.5 times), while iPA and ZOG levels increased sharply (by 13 and 5.8 times, respectively). In roots,

Co caused notable changes only in the levels of zeatin-type cytokinins: the content of Z and ZOG increased by 1.6 and 3.7 times, respectively, whereas concentration of ZR diminished by 2.8 times against control. Triticale plants are known to be characterized by an advanced level of resistance to abiotic stresses compared to other cereal crops due to more efficient antioxidant system (Kolupaev et al., 2020). Minimal phenotype changes were found previously in triticale plants under lead contamination, they possessed higher photosynthetic capacity and lower oxidative damage than parental species wheat and rye (Din et al., 2023). In our experiments, triticale plants demonstrated moderate morphophysiological alterations, maintaining growth at a sufficiently high concentration of pollutants. Changes in their growth parameters in response to various heavy metals were differentiated. Previously, different extent of various heavy metal uptake by triticale plants was reported. The uptake and accumulation of these metal in triticale prevailed in roots (Michas et al., 2020). Consequently, one possible reason for the different response of triticale plants to Mn, Co, and Cd was distinct ability of these metals to penetrate plant tissues and compartmentalize there. Nevertheless, the varying degrees of toxicity of these metals seem to be a more likely explanation for their differing effects on plant growth. All three metals affected significantly the balance of endogenous cytokinins both in the aerial part and in the roots. Under Mn contamination, the maintenance of aerial part growth activity and slight delay of root elongation coincided with increase in Z, ZR, and iP content throughout the plant. This finding may actually reflect a divergent cytokinin function in shoots and roots (Hussain et al., 2025). The high levels of cytokinin active forms in the aerial parts are likely necessary to keep the development of meristems and the stomatal conductance whereas in the roots it caused growth inhibition to avoid the contact with pollutant. Compounds of Co and Cd exerted significantly stronger effect on growth parameters of triticale plants versus Mn. The overall reduction in free cytokinins in triticale roots occurred whereas in aerial parts only ZR level declined under Co contamination. Plants accumulate cobalt mainly in roots through its low mobility (Khalid et al., 2026), which explains its predominant effect on root cytokinins. ZR are thought to be main form of cytokinins transported over long distances and transmitted signals from root to shoot (Nedvěd et al., 2025). It is possible that the decrease in the ZR content in the aerial part of triticale plants serves as such a signal about unfavorable situation in the roots caused by Co. Under Cd contamination, changes in growth parameters were accompanied by specific fluctuation of Z content. In particular, the growth inhibition of aerial part coincided with a decrease in Z level, whereas the slowdown of the root elongation – with an increase in the content of this cytokinin. This observation aligns with the current concepts of cytokinin functions in plant shoots and roots (positive and negative regulation of growth, respectively). It is possible that this cytokinin, which regulates the formation of plant architecture, is the target of the toxicant, since it controls the switch of metabolism from growth to adaptation in adverse environment. The excessive increase in ZOG levels in triticale plants in response to exposure to all three metals studied indicates the transition of plants to a strategy of adaptation to conditions of heavy metal pollution. Stored cytokinin could probably be employed to continue regulating plant growth and development in contaminated soil.

Conclusion. Soil contamination with heavy metals induced growth modifications as well as transformations in cytokinin profile of triticale plants. Specificity of these changes is strongly associated with a metal nature. Cytokinins are obviously involved in regulation of plant response to Mn, Co, and Cd influence. Cytokinins should be considered as a possible tool for mitigation of the detrimental effects of heavy metals, taking into account the status of endogenous phytohormones.

REFERENCES

- Biswas A., Pal S.J. *Plant Growth Regul.* 2025. 44: 4960–4980.
Din A., Mao H., Khan A. et al. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2023. 249: 114356.
Hajam A.H., Ali M.S., Singh S.K. *Environ. Exp. Bot.* 2024. 228, Part B: 106025.
Hussain S., Chang J., Li J. et al. *Int. J. Mol. Sci.* 2025. 26(3):1037
Khalid S., Shahid M., Wang J. et al. *Environ. Sci.: Proc. Impacts.* 2026. 28: 356-383.
Kolhi M.L., Hussain A., Junejo A.R. et al. *Plant Stress.* 2026. 20: 101284
Kolupaev Yu.E., Horielova E.I., Yastreb T.O. et al. *Cereal Res. Com.* 2020. 48(2): 165–171.
Leal W., Eustachio J., Fedoruk M., Lisovska T. *Front. Sustain. Resour. Manag.* 2024. 3: 1423444.
Michas G., Giannakopoulos E., Petropoulos G. et al. *Cur. Environ. Manag.* 2020. 7 (1): 12.
Nedvěd D., Hudeček M., Klíma P. et al. *J. Exp. Bot.* 2025. 76 (22): 6723-6740.
Rahman S.U., Li Y., Hussain S. et al. *Ecological Indicators.* 2023. 146: 109844.
Vasilachi I.C., Stoleru V., Gavrilescu M. *Agriculture.* 2023. 13(10): 1983.

**THE PRIMING OF SEEDS WITH NATURAL GROWTH REGULATORS INDUCES
CHANGES IN THE HOMEOSTASIS OF ENDOGENOUS PHYTOHORMONES
IN *TRITICUM AESTIVUM* L. PLANTS UNDER LEAD STRESS**

**L. V. Voytenko, V. A. Vasyuk, M. M. Shcherbatiuk, L. M. Babenko,
K. O. Romanenko, I. V. Kosakivska**

*M.G. Kholodny Institute of Botany, National Academy of Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine, e-mail: lesyavoytenko@gmail.com*

Introduction. Lead (Pb), one of the most hazardous heavy metals (HMs), renders soils unsuitable for agricultural use, disrupts natural ecosystems, reduces biodiversity, and destabilizes food chains. Although Pb ions are not involved in cellular metabolism, they are readily absorbed and accumulated in various plant organs. In Ukraine, soil contamination with lead has intensified due to large-scale military activities associated with the ongoing Russian's armed aggression.

Natural growth regulators, including phytohormones and N-acyl homoserine lactones (AHLs), play a crucial role in mitigating HM toxicity and stabilizing plant growth and developmental processes under stress conditions. Exogenous application and modulation of endogenous phytohormone levels represent effective strategies for protecting plants from HM-induced damage (Kosakivska et al., 2025). Salicylic acid (SA), a phenolic phytohormone, plays a key role in regulating numerous physiological processes, including growth and development, photosynthesis, respiration, and transpiration. It also contributes to the activation of defense responses, enhancing plant resistance to a wide range of abiotic and biotic stressors (Kosakivska, Shcherbatiuk, 2025; Rahman et al., 2023).

Soil microorganisms are also essential for plant adaptation to heavy metal contamination. They influence nitrogen fixation, phosphate solubilization, phytohormone and siderophore synthesis, pH regulation, and metal chelation (Etesami, 2018). AHLs are bacterial signaling molecules involved in quorum sensing in Gram-negative rhizosphere bacteria and in plant-microbe interactions. Although the effects of AHLs on plants have been studied for a long time, the mechanisms underlying their perception by plants remain poorly understood (Babenko et al., 2022). We hypothesized that seed priming with SA and AHL would differentially regulate the balance of abscisic acid (ABA) and indole-3-acetic acid (IAA), thereby contributing to plant adaptation to Pb stress.

Aim. To investigate the effects of seed priming with SA and AHL solutions on the homeostasis of endogenous IAA and ABA in *Triticum aestivum* L. cv. 'Podolyanka' under lead stress.

Materials and Methods. Experiments were conducted in 2025 at the Department of Phytohormonology, M.G. Kholodny Institute of Botany, National Academy of Sciences of Ukraine. The study involved 14-day-old plants of soft wheat (*Triticum aestivum* L.) cv. 'Podolyanka'. Seeds were obtained from the Institute of Plant Physiology and Genetics, NAS of Ukraine.

Calibrated seeds were surface-sterilized in 70 % ethanol for 3 min, rinsed with distilled water, and soaked in water for 3 h. Subsequently, seeds were incubated for 21 h at +20°C under three conditions: distilled water (control), 10⁻⁵ M SA solution, and 100 µM N-hexanoyl-L-homoserine (C₆-AHL) solution. C₆-AHL was synthesized according to the method described by (Babenko et al., 2025).

Germinated seeds were transferred (50 per treatment) into 1 L plastic containers with a mesh (2 × 2 mm) containing modified Knop's solution (control) or Knop's solution supplemented with Pb(NO₃)₂ (0.05 mM Pb²⁺). Plants were grown in a controlled growth chamber at +22°C, light intensity of 190 µmol m⁻² s⁻¹, photoperiod of 16/8 h (light/dark), and relative humidity of 70 ± 5 % for 14 days. The nutrient solution (15 mL) was replenished daily.

IAA and ABA contents were determined using HPLC-MS (Agilent 1200 LC/MS system, USA) equipped with a G1315B diode array detector and an Agilent G6120A single-quadrupole mass spectrometer (Shcherbatiuk et al., 2020). Each treatment included three biological and three analytical replicates. Data were analyzed using standard statistical methods (mean ± SD), and significance was assessed using Student's *t*-test at *p* ≤ 0.05.

Results and Discussion

Effect of Lead Stress and Seed Priming with SA and C₆-AHL on Endogenous ABA and IAA Homeostasis. The exposure of 14-day-old wheat plants to lead stress (0.05 mM Pb²⁺) induced a profound shift in the

hormonal balance, characterized by a typical stress response: the accumulation of ABA and a concomitant decrease in IAA levels.

Impact of Lead Stress (Pb-only treatment, control). Lead ions significantly disrupted the hormonal status in both organs. In shoots, ABA content increased by 138.5 %, while the most dramatic response was observed in roots, where ABA levels surged 5.9-fold compared to the control. This root-specific accumulation highlights the activation of the primary defense barrier at the site of heavy metal entry. Simultaneously, lead exposure suppressed growth processes, evidenced by a 50.6 % reduction of IAA in shoots. Interestingly, IAA levels in roots remained relatively stable (within 5.6 % of control), leading to a shift in IAA distribution where root concentrations exceeded shoot levels by 1.5-fold, potentially inhibiting primary root elongation.

Modulatory Effects of SA and C₆-AHL Priming under Lead Stress. Seed priming with SA and C₆-AHL effectively mitigated the hormonal imbalances caused by lead ABA Dynamics: Both regulators acted as "stress-limiters," reducing the excessive accumulation of ABA. In the SA + Pb variant, ABA levels in shoots and roots decreased by 54.3 % and 75.3 %, respectively, compared to the Pb-only treatment. SA priming was particularly effective in roots, maintaining ABA levels close to the control values (10.6 ng/g FW). The C₆-AHL + Pb treatment also reduced ABA accumulation (by 8.5 % in shoots and 38.4 % in roots relative to Pb-only), though its effect was less pronounced than that of SA. Despite these reductions, ABA levels in all primed plants remained slightly higher than absolute control, indicating a maintained state of physiological readiness. IAA Distribution: Priming significantly restored the growth potential by stimulating IAA accumulation in the shoots. Compared to the Pb-only treatment, IAA content in shoots increased by 47.9 % (SA) and 67.8% (AHL). A crucial finding was the spatial redistribution of IAA. Under combined treatment (Regulator + Pb), IAA localization shifted back toward the shoots, resembling the control pattern. In the C₆-AHL + Pb variant, shoot IAA levels exceeded root levels by 2.1-fold, suggesting that AHL signaling specifically promotes the restoration of the "shoot-ward" auxin flow, which is typically disrupted by heavy metal toxicity.

The observed changes suggest distinct but complementary pathways of adaptation. SA, as a regulator of antioxidant defense systems (Rahman et al., 2023), plays a key role in enhancing cereal resistance to HM stress and improving growth and productivity (Zulficar et al., 2024). SA appears to act primarily as an antioxidant stabilizer and signaling modulator that prevents the "over-response" of the ABA pathway, thereby protecting the photosynthetic apparatus in shoots. In contrast, C₆-AHL, acting as a bacterial signaling molecule (quorum sensing mimic) (Ortiz et al., 2024), likely enhances tolerance by modulating the IAA-driven developmental program, allowing the plant to maintain biomass production even under chemical stress. Overall, seed priming induces a shift from a "survival-only" hormonal profile (high root ABA, low shoot IAA) to an "adaptive growth" profile, which is essential for maintaining wheat productivity in Pb-contaminated environments.

Conclusions. Seed priming with plant-derived (SA) and bacteria-derived (C₆-AHL) growth regulators induces significant changes in the dynamics and distribution of endogenous ABA and IAA in 14-day-old *Triticum aestivum* plants under lead stress. These changes are associated with the activation of adaptive mechanisms. Further research should focus on optimizing application protocols for SA and C₆-AHL and elucidating their interactions with other signaling compounds, which is essential for developing biotechnological approaches to plant protection in contaminated environments.

REFERENCES

- Babenko L.M., Kosakivska I.V., Romanenko K.O. 2022. *Cell Biology International*. 46(4): 523–534. <https://doi.org/10.1002/cbin.11749>
- Babenko L., Voytenko L., Futorna O. et al. 2025. *Plant Physiology and Biochemistry*. 229: 110809. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.110809>
- Etesami H. 2018. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 147: 175-191. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.08.032>
- Kosakivska I.V., Babenko L.M., Voytenko L.V. et al. 2025. *Cereal Research Communications*. 53: 2063-2074. <https://doi.org/10.1007/s42976-025-00697-6>
- Kosakivska I.V., Shcherbatiuk M.M. 2025. *Plant Physiology and Genetics*. 57(1): 3-17. <https://doi.org/10.15407/frg2025.01.003>
- Ortiz J., Dias N., Alvarado R. et al. 2024. *Microbiological Research*. 281: 127606. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127606>
- Rahman S.U., Li Y., Hussain S. et al. 2023. *Ecological Indicators*. 146: 109844. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109844>
- Shcherbatiuk M.M., Voytenko L.V., Vasyuk V.A. et al. 2020. *Studia Biologica*. 14(2): 117-136 [in Ukrainian]. <http://dx.doi.org/10.30970/sbi.1402.624>
- Zulficar A., Gul B., Saleem A. et al. 2024. *Scientifica (Cairo)*. 6887694. <https://doi.org/10.1155/sci5/6887694>

**EXOGENOUS GIBBERELIC ACID MODULATES ENDOGENOUS
PHYTOHORMONE HOMEOSTASIS IN THE WATER FERN
SALVINIA NATANS (L.) ALL. UNDER ZINC STRESS**

L. V. Voytenko, V. A. Vasyuk, M. M. Shcherbatiuk, I. V. Kosakivska

*M.G. Kholodny Institute of Botany of the NAS of Ukraine,
Kyiv, Ukraine, e-mail: lesyavoytenko@gmail.com*

Introduction. The development of environmentally sustainable approaches for mitigating pollution in aquatic ecosystems has gained increasing attention in the context of intensified anthropogenic pressure and prolonged military impacts. Phytoremediation, based on the capacity of plants to remove, detoxify, or immobilize pollutants, represents an effective eco-technological strategy (Kosakivska et al., 2022). The aquatic fern *Salvinia natans* (L.) All., native to Central and Southeastern Europe, is characterized by rapid growth, broad ecological plasticity, and high propagation potential (Babenko et al., 2019). This species exhibits considerable tolerance to zinc, copper, nickel, and chromium and effectively reduces concentrations of heavy metals and metalloids in contaminated water (Dhir, Srivastava, 2013; Kosakivska et al., 2024).

Understanding the mechanisms underlying plant growth and stress adaptation requires detailed analysis of hormonal regulation. However, the phytohormonal system of hydrophytic ferns, particularly those of the Salviniaceae family, remains insufficiently explored (Kosakivska et al., 2023). Gibberellins, a large group of diterpenoid tetracyclic compounds, regulate numerous physiological processes in plants (Roopa et al., 2024). Under stress conditions, these molecules function as signaling regulators, promoting growth, enhancing stress tolerance, and stabilizing ontogenetic processes (Saijo, Loo, 2020).

Zinc is an essential micronutrient involved in enzyme activation and the metabolism of proteins, lipids, nucleic acids, and carbohydrates. However, excessive zinc disrupts photosynthesis, induces chlorosis and necrosis, and suppresses plant growth (Nowicka, 2022). We previously demonstrated that exogenous gibberellic acid (GA₃, 10⁻⁶ M) mitigates zinc-induced inhibition of growth and the pigment system in *S. natans* sporophytes at key developmental stages, while simultaneously enhancing zinc biosorption by approximately 10 % (Vasyuk et al., 2025).

Aim. To investigate the effect of exogenous gibberellic acid on endogenous phytohormone homeostasis in *S. natans* under zinc stress.

Materials and Methods. Sporophytes of *S. natans* were collected in June 2024 from the Prorva River (near Gnodyn village, Boryspil District, Kyiv Region). Groups of 4–5 plants were cultivated in 250 mL glass vessels containing purified tap water supplemented with: (i) ZnSO₄·7H₂O (10 mg/L Zn), (ii) GA₃ (10⁻⁶ M), or (iii) Zn + GA₃. Plants were maintained for seven days in a growth chamber (VÖTSCH GmbH, Germany) under controlled conditions: +22°C, 190 μmol·m⁻²·s⁻¹ light intensity, 16/8 h photoperiod, and 65 ± 5 % relative humidity. Phytohormones were extracted, purified, and quantified by HPLC-MS (Agilent 1200 LC/MS, USA) following Shcherbatiuk et al. (2020). Statistical significance between control and treatments was evaluated using Student's *t*-test at *P* ≤ 0.05.

Results and Discussion. Zinc exposure induced a pronounced increase in abscisic acid (ABA) content (by 89.2 %), accompanied by a decrease in GA₃ and GA₄ levels (by 39.3 % and 40.0 %, respectively). Application of exogenous GA₃ resulted in the accumulation of gibberellins, with GA₃ predominating (+19.1 %) and a concurrent reduction in ABA (–10.9 %).

Under combined Zn + GA₃ treatment, endogenous ABA decreased by 16.4 %, while total GA₃ + GA₄ content increased by 41.1 % relative to zinc-only exposure. Nevertheless, ABA levels remained above control values, and gibberellin concentrations did not fully recover to baseline levels. The zinc-

induced depletion of gibberellins coincided with suppressed growth, consistent with previous findings (Kosakivska et al., 2024).

The GA/ABA ratio was used as an integrative indicator of the balance between growth and stress-response pathways. Gibberellins and ABA act antagonistically, with DELLA proteins serving as key regulators linking GA and ABA signaling. Under abiotic stress, reduced gibberellin levels stabilize DELLA proteins, restricting growth as an adaptive survival response (Colebrook et al., 2014).

In GA₃-treated plants, the GA₃/ABA and GA₄/ABA ratios reached 0.9 and 0.7, respectively, exceeding control values and indicating active growth. Zinc stress reduced these ratios to 0.2, reflecting a state of growth arrest or "deep dormancy." Combined Zn + GA₃ treatment partially restored these ratios, doubling them relative to zinc-only conditions, which indicates partial recovery of hormonal balance.

Overall, zinc-induced ABA accumulation reflects activation of stress responses, whereas exogenous GA₃ counteracts this shift by promoting growth-associated hormonal pathways. These findings demonstrate that GA₃ supports maintenance of a functional hormonal balance sufficient for plant survival under toxic conditions. The GA/ABA ratio showed a strong correlation with the physiological state of *S. natans* sporophytes.

Conclusions. Exogenous GA₃ (10⁻⁶ M) enhances the accumulation of endogenous gibberellins and exerts a pronounced protective effect under zinc stress. The reciprocal relationship between gibberellins and ABA reflects a metabolic shift from growth to survival programs under toxicity. Exogenous gibberellins modulate stress responses at the level of phytohormonal regulation, highlighting their potential for application in phytoremediation technologies.

Future research should address dose-dependent effects of GA₃ across a range of zinc concentrations and evaluate the persistence of its protective role under prolonged exposure and in the presence of other heavy metals.

REFERENCES

- Babenko L., Vasheka O., Shcherbatiuk M. et al. 2019. *Flora*. 252: 44–50.
<https://doi.org/10.1016/j.flora.2019.02.003>
- Colebrook E.H., Thomas S.G., Phillips A.L. et al. 2014. *The Journal of Experimental Biology*. 217(Pt 1): 67–75.
<https://doi.org/10.1242/jeb.089938>
- Dhir B., Srivastava S. 2013. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 90(6): 720–724.
<https://doi.org/10.1007/s00128-013-0988-5>
- Kosakivska I.V., Vedenicheva N.P., Shcherbatiuk M.M. et al. 2022. *Biotechnologia Acta*. 15(5): 5–23.
<https://doi.org/10.15407/biotech15.05.005>
- Kosakivska I.V., Vedenicheva N.P., Shcherbatiuk M.M. et al. 2023. *Studia Biologica*. 17(3). 189–210.
<https://doi.org/10.30970/sbi.1703.721>
- Kosakivska I.V., Vasyuk V.A., Shcherbatiuk M.M. et al. 2024. *Ukrainian Botanical Journal*. 81(6). 406–416.
<https://doi.org/10.15407/ukrbotj81.06.443>
- Nowicka B. 2022. *Environmental Science and Pollution Research*. 29: 16860–16911.
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-18419-w>
- Roopa B., Premalatha S.J., Manjula A.C. et al. 2024. *European Chemical Bulletin*. 12(10): 1–8.
<https://doi.org/10.48047/ecb/2023.12.si10.0xyz>
- Saijo Y., Loo E.P.I. 2020. *New Phytologist*. 225(1): 87–104. <https://doi.org/10.1111/nph.15989>
- Shcherbatiuk M.M., Voytenko L.V., Vasyuk V.A. et al. 2020. *Studia Biologica*. 14(2): 117–136 [in Ukrainian].
<http://dx.doi.org/10.30970/sbi.1402.624>
- Vasyuk V.A., Shcherbatiuk M.M., Voytenko L.V. et al. 2025. *Biotechnologia Acta*. 18(3): 23–33.
<https://doi.org/10.15407/biotech18.03.023>

MODELING WINTERING CONDITIONS FOR THE FORMATION OF WINTER BARLEY PRODUCTIVITY

O. Yarmolska, P. Feoktistov

*The Plant Breeding and Genetics Institute – National Center of Seed and Cultivar Investigation,
Odesa, Ukraine, e-mail: somename1327@gmail.com*

The ever-increasing global demand for food necessitates the intensification of crop production. In conditions exacerbated by global climate change, mathematical modeling can be an effective tool for optimizing land use systems. In the organism-environment interaction system, the autumn growing season of winter barley plants is one of the most important preparatory stages responsible for realizing their biological potential. The condition of winter crops after the end of the autumn growing season is crucial for their overwintering. One of the key processes that determines the future yield of winter barley is hardening off to adverse weather conditions during the winter period.

Climate change has significantly impacted the geography of winter barley overwintering modeling in Ukraine. The model must account for three main types of winter stress:

1. Freezing (South and Central). In the Odesa, Mykolaiv, and Kherson regions, winters have become snow-poor. Models often predict crop death due to sharp, short-term temperature fluctuations when frost falls on unprotected soil.

2. Snow accumulation (West and North). In Polisia and Western Ukraine, heavy snowfalls on unfrozen soil have become more frequent. Plants remain dormant, expending sugars on respiration, becoming depleted, and dying from snow mold. In this case, the model calculates the carbohydrate balance: if C_{sug} is below 60 days under snow, then death from exhaustion is recorded.

3. Ice crust (East and Central). During thaws and subsequent frosts, a ground-in ice crust forms. The model simulates anaerobiosis: ice blocks oxygen supply, and the barley dies from toxic alcohol poisoning within 15–20 days.

For Ukraine, modeling wintering of winter barley is of critical importance, since barley is the least frost-resistant crop among all winter grains (its tillering node dies when the temperature drops to $-11... -12^{\circ}\text{C}$, whereas winter can withstand up to $-16... -18^{\circ}\text{C}$). The methodology of modeling wintering according to A. Polevoy (Odesa State University) describes this process through the dynamics of carbohydrate accumulation (hardening) in the fall and modeling of damage in winter (Польовий, 2007; Польовий та ін., 2017). Frost resistance of winter barley is directly proportional to the concentration of sugars (C_{sug}) in the tillering node, this process is divided into two phases:

- Phase I (light): Occurs in the light at temperatures from $+10^{\circ}\text{C}$ to 0°C . Intensive photosynthesis occurs, but growth by cell elongation is inhibited, and sugars accumulate in the tillering node;
- Phase II (light-free): Occurs at Temperatures from 0°C to -5°C . Cell dehydration and the conversion of complex sugars into monosaccharides (cryoprotectants) occur.

The dynamics of sugar concentration (C_{sug}) (% of dry mass) is modeled by an equation depending on net carbon assimilation, respiration costs (during prolonged warm autumns, sugars are consumed by respiration, which impairs hardening), and the attraction coefficient (the proportion of sugars flowing specifically to the tillering node). If the barley goes into winter overgrown (in the boot stage due to sowing too early), sugars are used to build the stem and C_{sug} drops to critically dangerous levels.

Facultative winter barley varieties occupy a special place in modeling. Their biological uniqueness lies in their weak requirement for vernalization (exposure to low temperatures to initiate flowering). Double-sided varieties can be sown either in the fall (they develop like winter varieties) or in the spring (they produce a full harvest like spring varieties). From the perspective of mathematical modeling by A.N. Polevoy, this biological flexibility dramatically alters carbohydrate accumulation parameters and

frost resistance curves. The main predictor of barley winter mortality is soil temperature at the tillering node depth (3 cm). It is modeled using thermal conductivity, considering the depth of snow cover. Without snow, it is practically equal to the minimum air temperature. In Ukraine (especially in the southern and central), a frost of -15°C on bare soil guarantees 100 % barley freezing. With snow: Snow acts as an insulator. Even at -25°C under snow, the temperature rarely drops below -4°C , which is comfortable for barley (Польовий та ін., 2017).

Overwintering modeling is the process of predicting the survival of winter crops based on a mathematical analysis of weather factors. The method relies on hydrothermal parameters of soil and air to assess plant stress resistance (Польовий, Божко, 2007; Польовий та ін., 2017).

Modern mathematical models are based on the calculation of the following key parameters:

- Hardening index: Considers the autumn temperature regime. Sugar accumulation in tillering nodes occurs with a gradual decrease in average daily temperature to $+8...+15^{\circ}\text{C}$ and below.
- Soil freezing depth: Calculated based on the sum of negative temperatures, soil density, and snow depth.
- Critical freezing temperature: A dynamic indicator dependent on crop variety, development stage, and soil moisture (Польовий, Божко, 2007; Польовий та ін., 2017).

To analyze risks and assess the condition of crops in Ukraine (in particular, in the Odesa region), specialized software packages and methods are used developed. A dynamic model of spring barley overwintering was also developed in collaboration between Odesa State University and the Institute of Plant Breeding and Genetics. It describes the processes of plant growth, development, and the two phases of autumn hardening under the influence of agrometeorological conditions in autumn. The influence of photosynthetically active radiation (PAR) intensity, illumination level, air temperature, and soil moisture on the growth of photosynthetic product reserves and readily soluble carbohydrates in winter wheat plants is described. The results of numerical experiments demonstrated a significant influence of illumination intensity and air temperature on the two phases of hardening during the autumn growing season of winter wheat plants.

Model of winter barley plant overwintering describes the processes of plant growth and development, as well as the passage of two phases of autumn hardening under the influence of agrometeorological conditions of the autumn growing season. An assessment of the adequacy of the model showed that the average error in calculating the model values for the dynamics of dry biomass accumulation in the aboveground part of winter barley plants is 10 %. The average error in calculating the model values for sugar accumulation in the aboveground part and tillering nodes of plants is 18 % and 15 %, respectively. A dependence of the increase in the reserves of photosynthetic products on the PAR intensity and air temperature was established: the maximum increase is observed with a combination of high PAR intensity ($0.85 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$) and an air temperature of $+14^{\circ}\text{C}$. The maximum increase in soluble carbohydrates is observed under high illumination and a high air temperature amplitude. During the plant hardening period, as the air temperature passes 0°C towards negative temperatures, the ratio of bound to free water increases due to the transition of free water to bound water.

The practical use of the developed dynamic model for the formation of winter hardiness in winter barley plants will facilitate the decision-making process regarding the application of agrotechnical measures in the cultivation of winter barley, the optimization of the structure of crop areas, and the obtaining of high and stable yields.

REFERENCES

- Польовий А.М., Божко Л.Ю. Довгострокові агрометеорологічні прогнози: навч. посіб. К.: КНТ, 2007. – 348 с.
- Польовий А.М., Божко Л.Ю., Барсукова О.А. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2017. № 20. С. 61-70.

ETIOLATED WHEAT SEEDLINGS AS A MODEL SYSTEM FOR STUDYING STRESS-INDUCED DEHYDRIN SYNTHESIS

T. O. Yastreba¹, I. T. Prášil², P. Vítámvás², Yu. E. Kolupaev^{1,3}

¹*Yuriev Plant Production Institute of the NAAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: plant_biology@ukr.net*

²*Czech Agrifood Research Center, Praha, Czech Republic*

³*Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine*

Dehydrins belong to Group II of the LEA (late embryogenesis abundant) protein family. They are classic intrinsically disordered proteins characterized by high hydrophilicity (Sun et al., 2021). A characteristic feature of these proteins is the presence of a conserved lysine-rich domain (the so-called K-segment) (Kosová et al., 2021; Szlachetowska, Rurek, 2023). Such a segment can form an amphipathic α -helix that binds to negatively charged membrane phospholipid groups on one side and hydrophobic residues on the other, with positive charges in between (Hara et al., 2017; Ambroise et al., 2024). These effects help maintain the fluidity of the membrane's lipid bilayer and prevent membrane fusion under low-temperature conditions (Hao et al., 2022). Dehydrins also act as molecular chaperones, preventing the aggregation of other proteins during cellular dehydration (Hara et al., 2017). A wide range of adverse environmental conditions, including low temperatures, drought, and salt stress, stimulates dehydrin synthesis (Sun et al., 2021). Numerous studies have demonstrated the protective role of dehydrins in plants subjected to abiotic stresses associated with dehydration. Interactions identified between dehydrins and other proteins suggest the diversity of their physiological functions (Hernández-Sánchez et al., 2017; 2019).

Dehydrin synthesis has been observed in wheat plants (*Triticum aestivum* L.) at various stages of development, including in seedlings and in plants during the tillering, booting, and flowering stages (Zhang et al., 2013). In these studies, specific features of the dehydrin electrophoretic profile were observed that are characteristic of certain plant developmental stages. Conversely, efforts are underway to establish a link between total or individual dehydrin content and resistance to specific stress factors in different genotypes. For instance, various wheat cultivars demonstrated cold-induced accumulation of significant amounts of dehydrins with molecular weights of 40, 50, and 66 kDa at the three-leaf stage in response to temperatures of 4°C and 9°C (Vítámvás et al., 2021). However, only the accumulation of dehydrin WCS120 (molecular weight 50 kDa) appeared to be closely associated with the cultivars' frost tolerance.

Etiolated seedlings are a model system used to assess the frost and drought tolerance of cereal varieties and to study their adaptation strategies to stress factors (Kolupaev et al., 2022; Yastreba et al., 2023). However, the synthesis of dehydrins in these seedlings remained poorly studied until recently.

Our goal was to compare the accumulation of dehydrins in response to cold hardening (six days of exposure to 3°C) or two days of exposure to simulated drought (15 % PEG 8000) in the shoots of etiolated wheat seedlings of various genotypes. These included the Antonivka and Bohemia cultivars, which are distinguished by increased resistance to both frost and drought; the Nordika cultivar, which is highly resistant to frost but less resistant to drought; the Tonnage cultivar, which is sensitive to both stress factors; and the Conditor cultivar, which is sensitive to low temperatures but resistant to drought.

The control etiolated seedlings of all genotypes were found to contain virtually no dehydrins. In response to cold hardening, all cultivars developed 9–11 dehydrin bands, which had molecular weights ranging from 14 to 68 kDa. A protein with a molecular weight of approximately 50 kDa was accumulated in the greatest amount in all cultivars. Additionally, a significant accumulation of a protein with a molecular weight of approximately 68 kDa was observed in all cultivars. Low-molecular-weight dehydrins were present in smaller quantities, but these proteins had a diverse spectrum. The dehydrin with the low-

est molecular weight (14.6 kDa) was only detected in the frost-resistant cultivars: Antonivka, Bohemia, and Nordika. Bands corresponding to dehydrins with molecular weights of 15.2 and 15.8 kDa were detected in the shoots of hardened seedlings of all cultivars studied, but they were significantly more abundant in the frost-resistant Antonivka, Bohemia, and Nordika.

Changes in the electrophoretic profile in response to osmotic stress were different. Five to seven dehydrin bands appeared in all cultivars in response to dehydration. Dehydrins with a molecular weight of 25 kDa were dominant in all cultivars under these conditions. Dehydrins with molecular weights of 17 and 19 kDa also accumulated in significant quantities. A 50 kDa dehydrin was also induced, but to a much lesser extent than during cold hardening. The 68 kDa protein was practically absent. Among the cultivars studied, the more drought-tolerant genotypes Antonivka and Conditor were found to be characterized by the induction of the fewest dehydrin proteins and the lowest overall dehydrin accumulation in response to moderate osmotic stress. Another drought-tolerant cultivar, Bohemia, synthesized a unique 23 kDa protein and outperformed the much less drought-tolerant Nordika in terms of total dehydrin accumulation. Nordika synthesized a unique 28 kDa protein. The non-tolerant cultivar Tonnage induced the highest total synthesis of six dehydrin proteins and had the highest accumulation of the 25 kDa protein. Overall, a statistically significant inverse correlation was found between the cultivars' tolerance index and dehydrin content, though it was less pronounced than in the case of cold tolerance.

Thus, the results show that, unlike green plant organs, etiolated wheat seedlings do not contain dehydrins under normal conditions. However, they are capable of inducing their synthesis in response to osmotic stress and exposure to low hardening temperatures. Meanwhile, the electrophoretic profile of these dehydrins varies significantly depending on the type of stress. Differences were also observed in the composition and quantity of dehydrins synthesized by genotypes with varying levels of frost and drought tolerance. Overall, there is a fairly pronounced positive correlation between the frost tolerance of cultivars and the accumulation of dehydrins, particularly low-molecular-weight dehydrins, during cold hardening. At the same time, in response to moderate osmotic stress, a greater amount of dehydrins was synthesized in the shoots of sensitive cultivars. Regardless, dehydrins are involved in the adaptation of etiolated wheat seedlings to various abiotic stressors, and etiolated seedlings are a convenient model system for studying them.

REFERENCES

- Ambroise V., Legay S., Guerriero G., Hausman J.-F., Cuypers A., Sergeant K. (2020) *Plant Cell Physiology*, 61(1):3–20. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcz196>
- Hao Y., Hao M., Cui Y., et al. (2022) *BMC Genomics*, 23(1):73. <https://doi.org/10.1186/s12864-022-08317-x>
- Hara M., Endo T., Kamiya K., Kameyama A. (2017) *Journal of Plant Physiology*, 210:18–23. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.12.003>
- Hernández-Sánchez I.E., Maruri-López I., Graether S.P. et al. (2017) *Sci. Rep.* 7:17036. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15986-2>
- Hernández-Sánchez I.E., Maruri-López I., Molphe-Balch E.P. et al. (2019) *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 510:545–550. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2019.01.095>
- Kolupaev Y.E., Yastreb T.O., Salii A.M. et al. (2022) *Zemdirbyste-Agriculture*, 109 (4):313–322. <https://doi.org/10.13080/z-a.2022.109.040>
- Kosová K., Klíma M., Prášil I.T., Vítámvás P. (2021) *Plants*, 10(4):789. <https://doi.org/10.3390/plants10040789>
- Sun Z., Li S., Chen W. et al. (2021) *Int. J. Mol. Sci.* 22:12619. <https://doi.org/10.3390/ijms222312619>
- Szlachtowska Z., Rurek M. (2023) *Frontiers in Plant Science*, 14:1213188. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1213188>
- Vítámvás P., Prášil I.T., Vítámvás J., Klíma M. (2021) *Plants*, 10(6):1114. <https://doi.org/10.3390/plants10061114>
- Yastreb T.O., Kolupaev Y.E., Kokorev A.I. et al. (2023) *Ukr. Biochem. J.* 95(1):73–84. <https://doi.org/10.15407/ubj95.01.073>
- Zhang H.M., Zhang L.S., Liu L. et al. (2013) *Biol. Plant.* 57(4):797–800. <https://doi.org/10.1007/s10535-013-0361-x>

**ANTAGONISTIC REDUCTION OF THE PHYTOTOXIC EFFECT OF HERBICIDE
ACLONIFEN ON SUNFLOWER BY HERBICIDE HALAUXIFEN-METHYL**

V. V. Yuhymuk, Y. Y. Morderer

*Institute of Plant Physiology and Genetics of the NAS of Ukraine,
Kyiv, Ukraine, e-mail: yuhymuk.v@ukr.net*

One way to reduce the phytotoxic effect of herbicides on cultivated plants is the use of herbicide compositions characterized by antagonistic interaction of the components, provided that this antagonism is directed exclusively toward the cultivated plants and does not affect the efficacy of weed control. A common mechanism of such antagonism is a stress response of cultivated plants to the action of one of the components of the herbicide composition, which contributes to an increase in the tolerance of these plants to the action of the second component of the composition (Radchenko et al., 2021).

Increasing herbicide selectivity is highly relevant for protecting sunflower crops, as the assortment of active ingredients of herbicides selective to this crop for post-emergence application is very limited. Specifically, the herbicide aclonifen (product Challenge 600, SC) can be applied post-emergence in sunflowers. However, for a certain period after aclonifen treatment, a negative effect of this herbicide on sunflowers is observed, manifesting as the appearance of chlorotic spots on the leaves. Since aclonifen is an inhibitor of carotenoid synthesis (which protects chlorophyll from oxidation), the degree of aclonifen's negative effect may depend on the activity of the antioxidant systems of the sunflower plants. The generation of reactive oxygen species (ROS) and, consequently, an increase in the activity of antioxidant defense systems is observed when tolerant plants are treated with herbicides from the class of synthetic auxins (Traxler et al., 2023). Among the herbicides of this class, halauxifen-methyl (product Heliantex, SC) is selective to sunflower. Therefore, evaluating the effect of halauxifen-methyl on the selectivity of aclonifen toward sunflower, as well as the weed control efficacy of a mixture of these herbicides, is an important and timely task.

Field experiments to determine weed control efficacy and crop selectivity were established in a crop of the sunflower hybrid Suliko 777 (preceding crop: winter wheat) on the fields of the Experimental Agricultural Production Unit of the Institute of Plant Physiology and Genetics of the National Academy of Sciences of Ukraine (Glevakha village (50°16' N, 30°18' E), Fastiv district, Kyiv region). Herbicides were applied in the 4 true leaf phases of sunflower (BBCH 14) using a compressed-air backpack sprayer. The experimental plot area was 15 m², with four replications arranged in a randomized design. The phytotoxic effect of the herbicides on sunflower was expressed as a percentage (0 % = no effect, 100 % = complete plant death) based on the percentage of damaged plants and a visual assessment of the severity of this damage. Weed control efficacy was determined for individual weed species by counting their numbers in the treated plots compared to the control, combined with a visual assessment of the degree of damage.

The herbicide aclonifen was applied at rates of 0.48, 0.60, 0.72, and 1.2 kg/ha; the herbicide halauxifen-methyl was applied at a rate of 0.003 kg/ha with the addition of the surfactant Vivolt at a rate of 0.3 L/ha.

Crop monitoring at 7 and 21 days after herbicide treatment (DAT) showed that halauxifen-methyl, when applied alone, did not affect sunflower plants. 7 DAT, the phytotoxic effect of aclonifen applied alone was 3.8 %, 6.0 %, 8.5 %, and 15.5 % at application rates of 0.48, 0.60, 0.72, and 1.2 kg/ha, respectively. When halauxifen-methyl was added, the phytotoxic effect of aclonifen at the corresponding application rates were 3.3 %, 4.5 %, 5.8 %, and 9.3 %. Thus, a statistically significant reduction in the phytotoxic effect due to the addition of halauxifen-methyl was observed at aclonifen application rates greater than 0.48 kg/ha. 21 DAT, the phytotoxic effect of aclonifen applied alone had decreased significantly, and

at rates of 0.48, 0.60, and 0.72 kg/ha, it did not exceed 1 % and did not differ significantly from the effect of the mixture. When aclonifen was applied alone at a rate of 1.2 kg/ha, the phytotoxic effect also decreased but remained substantial at 5.3 %, whereas under the action of the mixture, the phytotoxic effect did not exceed 1 %.

Weed assessments showed that the sunflower crop was infested primarily with weeds from the Brassicaceae family: wild mustard (*Sinapis arvensis* L.) and wild radish (*Raphanus raphanistrum* L.). With this type of weed infestation and in the absence of weed species sensitive to halauxifen-methyl, the efficacy of weed control by the mixture did not differ from the action of aclonifen alone.

The results obtained confirmed the working hypothesis regarding the possibility of reducing the phytotoxic effect of the herbicide aclonifen on sunflower plants through joint application with the herbicide halauxifen-methyl. Since the addition of halauxifen-methyl did not lead to a reduction in aclonifen's control efficacy against sensitive weed species, it can be concluded that the use of a tank mixture of halauxifen-methyl and aclonifen is promising for protecting sunflower crops.

REFERENCES

- Radchenko M.P. et al. *Agriculture Science and Practice*. 2021. 8(3):50-70. <https://doi.org/10.15407/agrisp8.03.050>
Traxler C. et al. *Journal of Biological Chemistry*. 2023. 299(11), 105267. <https://doi.org/10.1016/j.jbc.2023.105267>

АВТОРСЬКИЙ ПОКАЖЧИК / AUTHORS' INDEX

А

Акімов Ю.М. 104, 145
Алхімова О.Г. 102
Андрєєв І.О. 6, 16
Анциферова О.В. 94, 166

Б

Бабенко Л.М. 90, 123, 169
Баїк О.Л. 8
Безсусідня Ю.В. 22
Білявська Н.О. 10
Блюм Р.Я. 12, 13, 14, 69, 81
Блюм Я.Б. 12, 13, 35, 40, 69, 81, 155
Бобровницький Ю.А. 15
Боденко Н.А. 25
Болтовець П.М. 72
Бондус Р.О. 29
Бублик О.М. 16
Бузіашвілі А.Ю. 14, 18, 131

В

Василенко А.О. 112, 166
Васько Н.І. 100
Васюк В.А. 44, 169, 171
Войтенко Л.В. 44, 90, 169, 171
Волкова Н.Е. 19
Воробйова Т.В. 67, 145
Ворожко С.П. 20

Г

Гавва К.М. 38
Гайдаш О.Л. 22
Галаєв О.В. 23
Галаєва М.В. 23
Глибокий О.М. 112
Голуб Є.А. 27, 63

Д

Дадика В.В. 104
Дашенко А.В. 58, 61, 63
Дзюбецький Б.В. 25
Дуніч А.А. 58, 61, 63
Дуплій В.П. 88

Є

Єгорова Н.Ю. 84
Ємець А.І. 13, 18, 40, 131, 146, 154

З

Замбріборщ І.С. 27
Захарчук Н.А. 73
Зимогляд О.В. 100
Золотарьова О.К. 10, 60, 104, 106
Зубов Д.С. 22
Зуза О.О. 49

К

Калмикова О.О. 12
Капустіна Т.Б. 113
Карелов А.В. 35, 81
Карпець Ю.В. 117, 140
Карпінець Л.І. 51
Кеда А.Р. 12
Кириченко С.О. 29, 35
Кияк Н.Я. 31, 53
Кірчук Є.І. 27
Кіт Н.А. 33
Кобизєва Л.Н. 36
Козеко Л.Є. 15, 144, 145
Козерецька І.А. 69
Козуб Н.О. 29, 35, 81
Колдар Л.А. 79
Коломацька В.П. 38
Коломацький Д.К. 84
Колупаєв Ю.Є. 36, 38, 40, 117, 140, 175
Конвалюк І.І. 6
Кондакова З.О. 117
Кондратенко С.І. 75
Конопелько А.В. 42
Косаківська І.В. 44, 77, 90, 123, 169, 171
Кравченко С.О. 72
Краснокутська Ю.В. 47
Кунах В.А. 6, 16, 46, 102
Курилич Д.В. 56
Кутішева Н.М. 47

Л

Леонов О.Ю. 49
Лобачевська О.В. 51, 53
Лугова Г.А. 117

М

Мазур З.О. 55
Макляк К.М. 56
Маренич М.М. 36, 156
Мельник В.М. 6
Мельник В.С. 113
Міщенко І.А. 58, 61, 63
Міщенко Л.Т. 29, 58, 61, 63
Мокросноп В.М. 60
Молодченкова О.О. 58, 61, 63
Моргун Б.В. 80, 88
Моцний І.І. 58, 61, 63

Н

Нарган Т.П. 63
Наумов О.Г. 84
Негода Т.В. 22
Недуха О.М. 65, 67
Нікітіна Н.С. 12
Новожилов Д.О. 69
Носов М.Г. 71

О

Обозний О.І. 36, 40, 49
Овчаренко Ю.В. 67, 145
Олійник Т.М. 73
Онойко О.Б. 106

П

Парнікоза І.Ю. 69
Пересунько Т.О. 25
Петльована В.Р. 72
Писаренко Н.В. 73
Пірко Я.В. 12, 13, 69, 81, 131
Поздняков В.В. 94, 129, 166
Позняк О.В. 75
Поліщук С.С. 86
Поліщук О.В. 77, 83, 104
Пономаренко В.О. 42
Почка О.В. 79
Проніна О.В. 80, 88

Р

Рабоконь А.М. 13, 69, 81
Ребекевша Ю.Р. 83
Реліна Л.І. 84, 140
Рибалка О.І. 86
Римар Ю.Ю. 80, 88
Романенко К.О. 77, 90, 92, 123, 169
Романенко П.О. 92
Рябчун В.К. 113
Рябчун Н.І. 94

С

Савчук О.М. 12
Сахарова В.Г. 12, 13, 14, 69, 81
Силенко О.С. 96
Скидан В.О. 112
Созінов І.О. 29, 35
Созінова О.І. 14, 35, 81
Солодушко В.П. 98
Солонечна О.В. 100, 127
Солонечний П.М. 100
Соханьчак Р.Р. 8
Співак С.І. 81
Суворова К.Ю. 49

Т

Тарабан Д.А. 40, 117, 140
Твардовська М.О. 102
Тихонов П.С. 58, 61
Ткаченко Ю.П. 58, 61
Топчій Н.М. 104, 106
Трасковецька В.А. 23
Тригуб О.В. 108

У

Усова З.В. 49

Ф

Фанін Я.С. 58, 61, 63
Фатєєва О.О. 84
Феденко В.С. 110
Федюк О.М. 10
Футорна О.А. 92, 123

Х

Хоркавців Я.Д. 53
Хухрянська М.М. 49

Ц

Цибровська Н.В. 42

Ч

Червоніс М.В. 86
Чернишенко П.В. 112
Чернобай С.В. 113
Чернуський В.В. 115

Ш

Шахов І.В. 36, 38, 40
Шевченко М.В. 117
Шепілов Б.П. 56
Шестопап О.Л. 27
Шеховцова А.І. 35
Шугурова Н.О. 47
Шуть Т.С. 69

Щ

Щербатюк М.М. 44, 167, 169, 171
Щербаченко О.І. 33
Щеченко О.Є. 113

Я

Якимчук Р.А. 42
Яланський О.В. 71
Ястреб Т.О. 36, 38, 40, 175

A

Aharoni A. 165
Akimov Y. 104, 145
Andriiash H.S. 119
Antsyferova O.V. 94, 166
Avksentieva O.O. 121

B

Babenko L.M. 90, 123, 169
Babenko M.G. 125
Batuieva Y.D. 121
Belinska A.P. 152
Bezuhla O.M. 166
Bilavcik B. 134
Bilynska O.V. 127
Blume Y. 12, 13, 35, 40, 69, 81, 155
Bobrova O. 134
Bohuslavskyi R.L. 127, 129
Borisjuk L. 136
Borodai Y. 137
Buziashvili A. 14, 18, 131

C

Chernobay Yu.O. 129
Chmielowska-Bąk J. 133

D

Deaghileva A. 135

E

Edgar P. 136
Ekner-Grzyb A. 133
Estkowska K. 133

F

Faltus M. 134
Feoktistov P. 173
Futorna O.A. 92, 123

G

Gavelienė V. 145
Golosna L. 134
Grajderu C. 135
Grzyb T. 133

H

Hause B. 136
Heilmeier H. 137
Hejatko J. 154
Hilo A. 136
Hlushach D.V. 121
Holoboroda A.S. 139

I

Isayenkov S. 136

J

Jurkonienė S. 144, 145

K

Kalenska S.M. 149
Kalyna V.S. 137
Karpets Yu.V. 117, 140
Kharytonov M.M. 125, 137
Kiriziy D.A. 139, 162
Klymchuk D. 131, 145
Knoch D. 136
Kolombar T.M. 142, 147, 158
Kolomiichuk S.I. 121
Kolupaev Yu.E. 36, 38, 40, 117, 140, 175
Kosakivska I.V. 44, 77, 90, 123, 169, 171
Kosko O.O. 142
Kozeko L. 15, 144, 145
Krupodorova T. 146
Kryvosheeva L. 144
Kukoba A.A. 147
Kuzmyshyna N.V. 127, 129
Kyselov A.O. 149
Kyselov D.O. 149

L

Lykholat Y. 137

M

Makharynska N.M. 162
Marenych M.M. 36, 156
Matushevych L.M. 125
Mayer S. 136
Meitzel T. 136
Melian L. 135
Minaev B.P. 156
Minaeva V.O. 156
Mitina I. 135
Morderer Y.Y. 177
Moskalov V.B. 121
Moya Y.A.T. 136
Musiał J. 133

N

Naumenko A. 131
Nikishova N.V. 150
Ninua O.V. 149

O

Ovcharenko Y. 67, 145

P

Palladin M. 146
Petik I.P. 152
Pirko Ya. 12, 13, 69, 81, 131
Pozdnyakov V.V. 94, 129, 166
Prášil I.T. 175
Prokopenko D.S. 152
Pushkarova N.O. 154

R

Radchuk V. 136
Rayevsky A. 155
Relina L.I. 84, 140
Rogachev I. 165
Rolletschek H. 136
Romanenko K.O. 77, 90, 92, 123, 169
Romaniuk N.D. 160

S

Sakhno T.V. 156
Sakhno Y.E. 156
Shcherbatiuk M.M. 44, 167, 169, 171
Sheetova M.V. 158
Shiyanova T.P. 129
Shkoropad O.B. 160
Sokolovska-Sergiienko O.G. 139, 162
Solonechna O.V. 100, 127
Stasik O.O. 139, 162
Storozhyk L.I. 163
Svoboda P. 134

T

Taraban D.A. 40, 117, 140
Tigunova O.O. 119
Tunklova B. 134

U

Urbaníková N. 154

V

Vainer A. 165
Vasylenko A.O. 112, 166
Vasyuk V.A. 44, 169, 171
Vedenicheva N.P. 167
Vítámvás P. 175
Vorobyova T. 67, 145
Voytenko L.V. 44, 90, 169, 171
Vršek M. 154
Vus N.O. 166

Y

Yareminets N.S. 152
Yarmolska O. 173
Yastreb T.O. 36, 38, 40, 175
Yasuor H. 165
Yemets A.I. 13, 18, 40, 131, 146, 154
Yuhymuk V.V. 177
Yukhno Yu.Yu. 121

Z

Zaichenko T. 146
Žalnierius T. 145
Zavhorodnia S.V. 163

ЗМІСТ / CONTENTS

Андрєєв І.О., Мельник В.М., Конвалюк І.І., Кунах В.А. Внутрішньогеномна мінливість міжгенного спейсера генів 5s рРНК як потенційний механізм адаптації до стресу на прикладі перлинниці антарктичної <i>Colobanthus quitensis</i>	6
Байк О.Л., Соханьчак Р.Р. Роль фенольних сполук і поліфенолоксидази мохів в адаптації до абіотичного стресу	8
Білявська Н.О., Федюк О.М., Золотарьова О.К. Структурні особливості клітинних оболонок листків холодостійких рослин за дії низьких температур	10
Блюм Р.Я., Сахарова В.Г., Кеда А.Р., Нікітіна Н.С., Калмикова О.О., Савчук О.М., Пірко Я.В., Блюм Я.Б. Повногеномна характеристика генів AAE15/16 у <i>Camelina sativa</i> як чинників регуляції жирнокислотного складу та адаптаційного потенціалу	12
Блюм Р.Я., Сахарова В.Г., Рабоконь А.М., Пірко Я.В., Ємець А.І., Блюм Я.Б. Дивергенція генів тубуліну у поліплоїдних хрестоцвітих як основа цитоскелетної пластичності	13
Блюм Р.Я., Созінова О.І., Сахарова В.Г., Бузіашвілі А.Ю. Видова мінливість запасних білків насіння у представників роду <i>Camelina</i>	14
Бобровницький Ю.А., Козеко Л.Є. Експресія гена деметилази <i>DML3</i> у рослинах <i>Arabidopsis</i> під час затоплення	15
Бублик О.М., Андрєєв І.О., Кунах В.А. Молекулярно-генетичні механізми адаптації злаків до абіотичних стресорів: особливості організації та експресії гена <i>DREB2B</i> у <i>Deschampsia antarctica</i>	16
Бузіашвілі А.Ю., Ємець А.І. Оптимізація методики отримання біосурфактанту з культуральної рідини <i>B. subtilis</i> для нанобіоре mediaції природних ресурсів	18
Волкова Н.Е. CRISPR-Cas9 редагування ключових генів у біотичних та абіотичних стресових шляхах бавовнику	19
Ворожко С.П. Вплив температури і вологості на терміни появи основних фітофагів ячменю ярого в умовах правобережного лісостепу України	20
Гайдаш О.Л., Негода Т.В., Зубов Д.С., Безсусідня Ю.В. Оцінка впливу зародкових плазм на індукційну здатність гаплопродюсерів кукурудзи	22
Галасєв О.В., Галасєва М.В., Трасковецька В.А. Особливості взаємодії генів <i>Lr14a</i> та <i>Lr34</i> у міжлінійних гібридах F ₁ та F ₂ пшениці м'якої ярої в умовах півдня України	23
Дзюбецький Б.В., Боденко Н.А., Пересунько Т.О. Поліпшення базової інбредної лінії кукурудзи ДК744 (<i>Zea mays</i> L.), спорідненої з плазмою Айодент	25
Замбріборщ І.С., Шестопап О.Л., Голуб Є.А., Кірчук Є.І. Ефективність різних комбінацій індукційних та регенераційних середовищ для отримання подвоєних гаплоїдів пшениці м'якої озимої методом культури пиляків <i>in vitro</i>	27
Кириченко С.О., Бондус Р.О., Міщенко Л.Т., Созінов І.О., Козуб Н.О. Y-вірус картоплі та генетичні маркери генів стійкості як елемент захисту рослин	29
Кияк Н.Я. Вплив мінливих мікрокліматичних умов на фотосинтетичний апарат мохів лісових ценозів	31
Кіт Н.А., Щербаченко О.І. Формування адаптивних реакцій мохів лісових екосистем українського Розточчя залежно від мікрокліматичних умов екотопів	33
Козуб Н.О., Шеховцова А.І., Созінов І.О., Карелов А.В., Созінова О.І., Кириченко С.О., Блюм Я.Б. Ідентифікація генів дорослої стійкості <i>Lr34</i> та <i>Lr68</i> в українських сортах пшениці м'якої озимої	35
Колупасєв Ю.Є., Кобизєва Л.Н., Шахов І.В., Маренич М.М., Обозний О.І., Ястреб Т.О. Екзогенний серотонін перешкоджає розвитку окиснювального стресу при проростанні зернівок пшениці за умов модельної посухи	36

Колупасв Ю.Є., Ястреб Т.О., Шахов І.В., Гавва К.М., Коломацька В.П. Гідроґен сульфід (H ₂ S) як активатор проростання зернівок злаків за умов старіння і дії стресорів	38
Колупасв Ю.Є., Ястреб Т.О., Шахов І.В., Обозний О.І., Тарабан Д.А., Ємець А.І., Блюм Я.Б. Праймінґ зернівок пшениці L-триптофаном модулює метаболізм вуглеводів та редокс-гомеостаз при їх проростанні за умов осмотичного стресу	40
Конопелько А.В., Якимчук Р.А., Цибровська Н.В., Пономаренко В.О. Скринінґ посухостійкості видів і гібридів родини <i>Magnoliaceae</i> Juss. за ксероморфними ознаками асиміляційного апарату	42
Косаківська І.В., Войтенко Л.В., Щербатюк М.М., Васюк В.А. Інтеграція природних регуляторів росту та наноматеріалів як стратегія підвищення стійкості зернових культур до стресу важких металів	44
Кунах В.А. Організм як система клітинних популяцій: пластичність клітинного геному та його роль в процесах адаптації рослин	46
Кугіщева Н.М., Шугурова Н.О., Краснокутська Ю.В. Оцінка стійкості соняшнику до <i>Embellisia helianthi</i> (Hansf.) Pidoplichko на інфекційному полігоні в польових умовах	47
Леонов О.Ю., Усова З.В., Суворова К.Ю., Хухрянська М.М., Зуза О.О., Обозний О.І. Селекція пшениці м'якої на збільшення вмісту фенольних сполук та антоціанів	49
Лобачевська О.В., Карпінець Л.І. Адаптивні реакції фертильних рослин <i>Atrichum undulatum</i> (Hedw.) P. Beauv. у різних мікрокліматичних умовах місцевиростань	51
Лобачевська О.В., Кияк Н.Я., Хоркавців Я.Д. Специфіка гравічутливості мохів за умов фосфатного дефіциту	53
Мазур З.О. Адаптивність сорту жита озимого «Хлібна Нива» до кліматичних умов	55
Макляк К.М., Курилич Д.В., Шепілов Б.П. Оцінка ліній-відновників фертильності соняшнику за посухостійкістю в умовах осмотичного стресу	56
Міщенко Л.Т., Молодченкова О.О., Дуніч А.А., Моцний І.І., Тихонов П.С., Фанін Я.С., Ткаченко Ю.П., Міщенко І.А., Дашенко А.В. Біохімічні адаптивні реакції пшениці за інфікування вірусною інфекцією	58
Мокросноп В.М., Золотарьова О.К. Дозозалежні ефекти 2-феноксietанолу на ріст, дихання та маркери окиснювального стресу у міксотрофних культурах <i>Euglena gracilis</i>	60
Молодченкова О.О., Міщенко Л.Т., Дуніч А.А., Моцний І.І., Тихонов П.С., Фанін Я.С., Ткаченко Ю.П., Міщенко І.А., Дашенко А.В. Біохімічні маркери стійкості рослин <i>Glycine max</i> до вірусу мозаїки сої	61
Моцний І.І., Молодченкова О.О., Нарган Т.П., Голуб Є.А., Фанін Я.С., Дашенко А.В., Міщенко І.А., Дуніч А.А., Міщенко Л.Т. Підвищення стійкості озимої пшениці до хвороб та посухи шляхом залучення у селекційний процес інтрогресивних ліній	63
Недуга О.М. Пластичність анатомічної структури та вмісту калози у листках геліофіту <i>Typha angustifolia</i> при зміні вологості ґрунту	65
Недуга О.М., Воробйова Т.В., Овчаренко Ю.В. Участь кремнію в адаптації рослин <i>Typha angustifolia</i> до зміни вологості ґрунту	67
Новожилов Д.О., Рабоконь А.М., Парнікоза І.Ю., Сахарова В.Г., Шуть Т.С., Блюм Р.Я., Козерецька І.А., Пірко Я.В., Блюм Я.Б. Генетичне різноманіття популяцій <i>Cratoneuropsis chilensis</i> з морської Антарктики як основа дослідження адаптації до екстремальних умов	69
Носов М.Г., Яланський О.В. Добір гібридів цукрового сорго з високим біоенергетичним потенціалом в умовах посушливого степу України	71
Петльована В.Р., Болтовець П.М., Кравченко С.О. Механізми адаптації <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> до абіотичного стресу, індукованого наноструктурованим цинком	72

Писаренко Н.В., Захарчук Н.А., Олійник Т.М. Стабільність фенотипічної реакції генотипів картоплі на фузаріозне ураження бульб за умов повторного інокуляційного тестування	73
Позняк О.В., Кондратенко С.І. Місцеві популяції України – цінний вихідний матеріал в адаптивній селекції цибулі багатоярусної (<i>Allium proliferum</i> Schrad.)	75
Поліщук О.В., Романенко К.О., Косаківська І.В. Фотосинтетичний апарат <i>Salix</i> sp. і <i>Populus</i> sp. у заплавлених екосистемах Каховського водосховища за контрастних сезонних умов	77
Почка О.В., Колдар Л.А. Буферні властивості листків представників виду <i>Prunus serrulata</i> Lindl. за умов урботехногенного навантаження	79
Проніна О.В., Римар Ю.Ю., Моргун Б.В. Співкультивування петіт мутантів дріжджів <i>Saccharomyces cerevisiae</i> та <i>S. paradoxus</i> з <i>Nicotiana tabacum</i> для моделювання рослинно-грибкових взаємодій	80
Рабоконь А.М., Сахарова В.Г., Блюм Р.Я., Созінова О.І., Карелов А.В., Співак С.І., Козуб Н.О., Пірко Я.В., Блюм Я.Б. Оцінка генетичного різноманіття природних популяцій <i>Aegilops biuncialis</i> Кримського півострова за поліморфізмом першого інтрону генів β -тубуліну	81
Ребекевша Ю.Р., Поліщук О.В. Вплив дихромату калію ($K_2Cr_2O_7$) на <i>Pisum sativum</i> L. у гідропонному середовищі	83
Реліна Л.І., Єгорова Н.Ю., Коломацький Д.К., Фатєєва О.О., Наумов О.Г. Використання ШП у рослинництві: бібліометричний аналіз	84
Рибалка О.І., Поліщук С.С., Червоніс М.В. Сорти озимих злаків, стійкі до посухи	86
Римар Ю.Ю., Проніна О.В., Дуплій В.П., Моргун Б.В. Внутрішньовидові особливості продихового апарату сортів пшениці м'якої	88
Романенко К.О., Войтенко Л.В., Бабенко Л.М., Косаківська І.В. Регуляція пігментного комплексу пшениці за дії свинцевого забруднення шляхом праймування зернівок саліциловою кислотою та ацилгомосеринлактоном	90
Романенко П.О., Футорна О.А., Романенко К.О. <i>Nostoc commune</i> як основа біопрепаратів для підвищення стресостійкості злаків при фіторекультивачії техногенних субстратів	92
Рябчун Н.І., Поздняков В.В., Анциферова О.В. Формування колекції озимої м'якої пшениці за стійкістю до зневоднення на стадії проростання насіння	94
Силенко О.С. Генетичне різноманіття васильків справжніх <i>Ocimum basilicum</i> L. в колекції Устимівської дослідної станції рослинництва	96
Солодушко В.П. Селекційна цінність ліній і сортів голозерного вівса (<i>Avena nuda</i> L.)	98
Солонечний П.М., Васько Н.І., Зимогляд О.В., Солонечна О.В. Оцінка адаптивного потенціалу сортів ярого ячменю	100
Твардовська М.О., Алхімова О.Г., Кунах В.А. Цитогенетичні особливості стійких до абіотичних стресів рослин <i>Deschampsia antarctica</i> та <i>Secale cereale</i>	102
Топчій Н.М., Дадика В.В., Поліщук О.В., Акімов Ю.М., Золотарьова О.К. Вплив посухи на пігментний апарат представників родини Aizoaceae (<i>Tetragonia tetragonoides</i> і <i>Dorotheanthus apetalus</i>)	104
Топчій Н.М., Онойко О.Б., Золотарьова О.К. Ізоферментний аналіз естераз при адаптації проростків гороху до водного дефіциту	106
Тригуб О.В. Оцінка зразків гречки за цінними господарськими ознаками	108
Феденко В.С. Фенольні сполуки ехінацеї пурпурової при кадмій-індукованому гормезисі та окиснювальному стресі	110
Чернишенко П.В., Василенко А.О., Скидан В.О., Глибокий О.М. Екологічна пластичність селекційного матеріалу сої як критерій добору генотипів, адаптованих до абіотичних стресів	112

Чернобай С.В., Мельник В.С., Рябчун В.К., Капустіна Т.Б., Щеченко О.Є. Формування елементів структури врожаю ярого тритикале за весняного та осіннього посіву	113
Чернуський В.В. Інноваційна система «смайт селекції» зернових і зернобобових культур	115
Шевченко М.В., Тарабан Д.А., Кондакова З.О., Лугова Г.А., Карпець Ю.В., Колупаєв Ю.Є. Праймінг мелатоніном підвищує продуктивність рослин пшениці при використанні насіння зі зниженою схожістю	117
Andriiash H.S., Tigunova O.O. The role of microbiome in plant drought tolerance	119
Avksentieva O.O., Batueva Y.D., Hlushach D.V., Moskalov V.B., Kolomiichuk S.I., Yukhno Yu.Yu. Effects of photoperiodic response on abiotic stress resistance in near-isogenic wheat and soybean lines	121
Babenko L.M., Romanenko K.O., Futorna O.A., Kosakivska I.V. N-hexanoyl-L-homoserine lactone modulates morphogenesis and enhances proliferative capacity in wheat <i>in vitro</i> cultures	123
Babenko M.G., Kharytonov M.M., Matushevych L.M. Creation of the poplar plantations in the marginal lands at the Dnipropetrovsk region of Ukraine	125
Bilyska O.V., Bohuslavskiy R.L., Solonechna O.V., Kuzmyshyna N.V. Variability of wild and cultivated barley in coleoptile length and inheritance of this trait in DH-lines derived from interspecific hybrids	127
Bohuslavskiy R.L., Kuzmyshyna N.V., Chernobay Yu.O., Shiyanova T.P., Pozdnyakov V.V. Drought resistance in the germination phase of wheat synthetics	129
Buziashvili A., Klymchuk D., Naumenko A., Pirko Ya., Yemets A. Synthesis of biogenic ZnS nanoparticles using <i>Bacillus</i> spp. and their activity against phytopathogenic bacteria	131
Estkowska K., Chmielowska-Bąk J., Ekner-Grzyb A., Musiał J., Grzyb T. Germination, growth, and biochemical composition of soybean seedlings exposed to polystyrene	133
Golosna L., Bobrova O., Tunklova B., Svoboda P., Bilavcik B., Faltus M. Sucrose-induced osmotic stress as a tool for <i>in vitro</i> screening of drought tolerance in Saaz hop cultivars	134
Grajdiere C., Deaghileva A., Mitina I., Melian L. Evaluation of Moldovan collection samples of potatoes by molecular markers of resistance to late blight	135
Isayenkov S., Borisjuk L., Mayer S., Hilo A., Knoch D., Meitzel T., Hause B., Moya Y.A.T., Rolletschek H., Edgar P., Radchuk V. Root structural and physiological adaptations in halophytic barley relatives under salinity stress	136
Kharytonov M.M., Borodai Y., Lykholat Y., Kalyna V.S., Heilmeier H. Study of tolerance of chrysanthemums and silver ragwort to irrigation with NaCl salinated water	137
Kiriziy D.A., Sokolovska-Sergiienko O.G., Holoboroda A.S., Stasik O.O. Combined effect of drought and high temperature on the photosynthetic apparatus of winter wheat	139
Kolupaev Yu.E., Karpets Yu.V., Taraban D.A., Relina L.I. "Tryptophan–serotonin–melatonin" as a possible hub for the regulation of seed germination and the formation of plant adaptive responses	140
Kosko O.O., Kolombar T.M. Effect of organic nitro compounds on the initial growth of <i>Triticum aestivum</i> L. under a model experiment	142
Kozeko L., Jurkonienė S., Kryvosheeva L. Regulation of cell wall composition of flax fibre under changing environmental conditions using biostimulants: searching for approaches	144
Kozeko L., Klimchuk D., Akimov Y., Ovcharenko Y., Vorobyova T., Gavelienė V., Žalnierius T., Jurkonienė S. Micromorphology and ultrastructure of rapeseed leaves under drought after proline and GABA treatment	145
Krupodorova T., Palladin M., Zaichenko T., Yemets A. From medicinal plants to macromycetes: establishing a platform for studying stress-responsive exosome-like nanovesicles as emerging bioactive nanocarriers	146

Kukoba A.A., Kolombar T.M. The use of <i>Robinia pseudoacacia</i> as a pioneer species in the remediation of soils contaminated with dinitrotoluene	147
Kyselov D.O., Kyselov A.O., Ninua O.V., Kalenska S.M. Stability of grain quality traits of durum wheat under contrasting agroecological conditions of the western forest-steppe of Ukraine	149
Nikishova N.V. Physiological and biochemical mechanisms of <i>Panicum virgatum</i> L. adaptation to environmental stress factors	150
Petik I.P., Belinska A.P., Prokopenko D.S., Yareminets N.S. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on the fatty acid profile of oilcrop seeds as a mechanism of increasing plant resistance	152
Pushkarova N.O., Urbaníková N., Vršek M., Yemets A.I., Hejatko J. Novel cytokinin-like ligands enhance salt stress tolerance in <i>Crambe abyssinica</i> through modulation of cytokinin signaling	154
Rayevsky A., Blume Y. Structure-based identification of small-molecule inhibitors targeting acetylation-dependent ATG8–AIM interactions in plants	155
Sakhno T.V., Minaev B.P., Marenych M.M., Minaeva V.O., Sakhno Y.E. Rubisco activase under heat stress: a key regulator of photosynthetic thermotolerance	156
Sheetova M.V., Kolombar T.M. Phytotoxicity assessment of 2,4-dinitrotoluene on <i>Vicia sativa</i> L.	158
Shkoropad O.B., Romaniuk N.D. The influence of <i>Streptomyces</i> bacteria on growth parameters and proline content in spring wheat seedlings under salinity conditions	160
Sokolovska-Sergiienko O.G., Kiriziy D.A., Stasik O.O., Makharynska N.M. Activities of antioxidant enzymes in chloroplasts of flag leaf of winter wheat under soil drought	162
Storozhyk L.I., Zavhorodnia S.V. Physiological and biochemical profile of sorghum (<i>Sorghum saccharatum</i> (L.) Moench) under prolonged abiotic stress	163
Vainer A., Rogachev I., Aharoni A., Yasuor H. Cytokinin homeostasis during tomato reproductive development and heat stress	165
Vasylenko A.O., Bezuhla O.M., Vus N.O., Pozdnyakov V.V., Antsyferova O.V. Drought tolerance assessment of <i>Phaseolus</i> L. accessions under laboratory conditions	166
Vedenicheva N.P., Shcherbatiuk M.M. The effect of soil contamination with heavy metals on the growth and cytokinin balance of triticale plants	167
Voytenko L.V., Vasyuk V.A., Shcherbatiuk M.M., Babenko L.M., Romanenko K.O., Kosakivska I.V. The priming of seeds with natural growth regulators induces changes in the homeostasis of endogenous phytohormones in <i>Triticum aestivum</i> L. plants under lead stress	169
Voytenko L.V., Vasyuk V.A., Shcherbatiuk M.M., Kosakivska I.V. Exogenous gibberellic acid modulates endogenous phytohormone homeostasis in the water fern <i>Salvinia natans</i> (L.) All. under zinc stress	171
Yarmolska O., Feoktistov P. Modelling of wintering conditions for the formation of winter barley productivity	173
Yastreba T.O., Prášil I.T., Vítámvás P., Kolupaev Y.E. Etiolated wheat seedlings as a model system for studying stress-induced dehydrin synthesis	175
Yuhymuk V.V., Morderer Y.Y. Antagonistic reduction of the phytotoxic effect of herbicide acifluorfen on sunflower by herbicide haloxyfop-methyl	177
Авторський покажчик / Authors' Index	179

**Стрес і адаптація рослин: Тези доповідей III-ої міжнародної наукової конференції
(Харків, 9-10 вересня 2026 р.). [Електронне видання]**

Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН України, Харків
ДУ «Інститут харчової біотехнології та геноміки НАН України», Київ

Відповідальні за випуск: Колупаєв Ю.Є., Ястреб Т.О., Реліна Л.І.

Адреса видавця: м. Харків, пр. Героїв Харкова 142,
Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН України
E-mail: yuriev1908@gmail.com