УДК 579.254.2:633.11 https://doi.org/10.7124/FEEO.v39.1837

КОМІСАРЕНКО А. Г.✉
МИХАЛЬСЬКА С. І.

Інститут фізіології рослин і генетики НАН України,
Україна, 03022, м. Київ, вул. Васильківська, 31/17
✉ *allakomisarenko2017@gmail.com*

ОЦІНКА РІВНЯ ТОЛЕРАНТНОСТІ ДО ПОСУХИ ТРАНСГЕННИХ РОСЛИН ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ З ЧАСТКОВОЮ СУПРЕСІЄЮ ГЕНА ПРОЛІНДЕГІДРОГЕНАЗИ

Мета. Дослідити рівень толерантності біотехнологічних рослин пшениці м'якої озимої (*Triticum aestivum* L.) насіннєвих поколінь T_2 і T_4 до ґрунтової посухи на основі порівняльного аналізу вмісту сумарного хлорофілу та елементів продуктивності генетично змінених та не трансгенних форм. ***Методи.*** Визначення вмісту хлорофілу та структурний аналіз врожаю. ***Результати.*** Досліджено показники зернової продуктивності і вміст фотосинтетичного пігменту – хлорофілу в біотехнологічних рослин T_2 і T_4 пшениці та їх вихідних генотипів за різних умов культивування. ***Висновки***. За нормальних умов зрошення були виявлені деякі відмінності між трансгенними та не трансгенними формами рослин за вмістом хлорофілу, проте за елементами продуктивності вони не спостерігались. Відстежувалась генотипова різниця, за якою перевага належали рослинам генотипу УК 106/19. Посуха призводила до зниження вмісту фотосинтетичних пігментів та показників врожаю у всіх аналізованих варіантів рослин. Кращу толерантність до дії стресового фактору продемонстрували нащадки трансгенних рослин, які характеризувались вищою зерновою продуктивністю.

Ключові слова: пшениця озима, трансгенні рослини, ген проліндегідрогеназа, посуха, хлорофіли, продуктивність.

Пшениця м'яка озима (*Triticum aestivum* L.) – стратегічно важлива провідна продовольча культура, що забезпечує людство борошном для хлібопекарської та кондитерської галузей. Попри зростаючу тенденцію її виробництва в світі, кліматичні зміни, що призводять до значних температурних перепадів, які супроводжуються відсутністю опадів та збільшенням кількості ґрунтових і повітряних посух завдають значного зниження врожайності та якості продукції *T. aestivum* (El Sabagh et al., 2019; Hossain et al., 2021).

Стрес від посухи є одним із найбільш небезпечних факторів, що негативно впливає на врожайність через зміни ростових, фізіологічних та метаболічних процесів у рослинному організмі. Втрати врожаю під час посухи на сам перед пов'язані зі зниженням функціональної активності фотосинтетичного апарату в результаті пошкоджень та захисних реакцій (Seleiman et al., 2021; Sato et al., 2024). Гальмування процесів фотосинтезу і порушення репродуктивного розвитку пшениці за умов дефіциту води спричиняють значні втрати зернової продуктивності, які можуть складати від 25 до 70% – залежно від фази розвитку рослин, жорсткості і тривалості дії стресу (Bapela et al., 2022).

Фізіологічна відповідь пшениці на водний дефіцит є складним багатокомпонентним процесом. На початкових етапах стрес викликає закриття продихів для мінімізації транспірації, що, своєю чергою, обмежує дифузію CO_2 і гальмує фотосинтез. Виникає цілий комплекс морфо-анатомічних (структурних), фізіологічних і біохімічних змін, спрямованих на обмеження втрати води через продихи (Nyaupane et al., 2024; Kiriziy and Stasyk, 2022). Тривала посуха призводить до окиснювального стресу через надмірне утворення активних форм кисню, які пошкоджують фотосинтетичний апарат, мембрани клітин та порушують роботу ключових ферментів (Nyaupane et al., 2024; Singh et al., 2025). Найбільш вразливими до посухи є стадії кущіння та колосіння,

© 2026 Комісаренко А. Г., Михальська С. І. This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

коли визначається кількість колосків та життєздатність пилку (Bapela et al., 2022; Nyaupane et al., 2024).

Для оцінки посухостійкості нинішні вітчизняні та закордонні селекційні програми використовують інтегральні показники, такі як індекс толерантності до стресу (STI) та індекс стабільності врожаю (YSI), що дозволяють виділяти генотипи з найвищим адаптивним потенціалом (Demydov et al., 2023). Сучасна стратегія створення посухостійких генотипів передбачає синергію методів трансгенезу, маркер-асоційованої селекції (MAS) та геномного редагування CRISPR/Cas9 (Bapela et al., 2022; Singh et al., 2025). Це дозволяє не лише вводити чужорідні гени, а й точково оптимізувати роботу власних локусів кількісних ознак (QTL) пшениці, що відповідають за архітектуру кореневої системи (глибину та розгалуженість) та ефективність використання води (WUE). Сучасні дослідження підкреслюють, що майбутнє біотехнології пшениці полягає у створенні «пірамідальних» конструкцій, у яких поєднуються гени з різними механізмами дії – від контролю транспірації до глибокої метаболічної адаптації (Singh et al., 2025).

Одним із найважливіших механізмів такої метаболічної адаптації є осмотичне регулювання, що полягає у накопиченні низькомолекулярних розчинних сполук (осмолітів). Вони дозволяють клітинам утримувати воду навіть за низького водного потенціалу ґрунту, зберігаючи тургор та життєдіяльність меристемних тканин. Серед різноманіття осмопротекторів особлива роль належить амінокислотам та цукрам, які не лише підтримують осмотичний баланс, а й виконують функцію хімічних шаперонів. Детальне вивчення механізмів синтезу цих сполук є ключем до розуміння генетичної природи осмостійкості пшениці, що вимагає окремого розгляду систем біосинтезу найбільш ефективних осмолітів (Nyaupane et al., 2024; Dubrovna et al., 2022a).

Для підвищення посухостійкості пшениці досить часто залучаються гени, що контролюють метаболізм осмотично активних речовин, акумуляція яких допомагає рослинам утримувати воду в клітинах і боронить органели від ушкоджень, спричинених зневодненням або підтримує тургорний тиск за водного стресу. Одним із провідних механізмів, спрямованих на забезпечення виживання рослин в умовах водного дефіциту є осмотичне регулювання, у якому важливу роль відіграє L-пролін (Pro) (Dubrovna et al., 2022a).

Так, пригнічення катаболізму проліну через часткову супресію гена проліндегідрогенази (*pdh*) – дозволяє уникнути передчасного розпаду осмоліту під час стресової дії. Використання антисмислових послідовностей або РНК-інтерференції для інгібування *pdh* приводить до суттєвого зростання пулу вільного Pro в тканинах. Трансгенні лінії озимої пшениці з супресованим геном *pdh* характеризуються меншим рівнем перекисного окиснення ліпідів та вищою цілісністю мембранних структур, що безпосередньо впливає на індекс стабільності врожаю (YSI) (Dubrovna et al., 2022a; Dubrovna et al., 2022b).

Важливо підкреслити, що пролін у трансгенних рослинах пшениці діє не лише як осмопротектор, а й як сигнальна молекула. Він модулює експресію генів захисних білків та підтримує стабільність співвідношення каротиноїдів до хлорофілів, що захищає фотосинтетичний апарат від фотоінгібування за посухи (Ghosh et al., 2022). Синергічний ефект від використання генів метаболізму Pro разом із сучасними методами агробактеріальної трансформації відкриває широкі перспективи для створення сортів пшениці, адаптованих до мінливих кліматичних умов України (Dubrovna et al., 2022b). Отже, біотехнологія пшениці еволюціонує від простого введення окремих генів до комплексного перепрограмування метаболічних шляхів. Синергія методів РНК-інтерференції, геномного редагування та маркер-асоційованої селекції є надійним підґрунтям для створення сортів пшениці нового покоління, які поєднують високу врожайність із безпрецедентним рівнем адаптації до глобальних кліматичних викликів (Singh et al., 2025; Dubrovna et al., 2024).

Для отримання нових генотипів сільськогосподарських культур за допомогою генної інженерії, здатних давати високі врожаї за несприятливих умов, необхідне глибоке розуміння взаємозв’язків між внесеними генетичними змінами та регуляторними системами ключових фізіологічних функцій у рослин, насамперед фотосинтезу (Morales et al., 2020). Тому особливої актуальності набуває поєднання біотехнологічних підходів до створення нових стрес-стійких форм культурних рослин та їх фенотипування за фізіологічними та біохімічними параметрами.

Метою нашої роботи було дослідження толерантності насіннєвих поколінь трансгенних рослин озимої пшениці з частковою супресією гена проліндегідрогенази, отриманих з використанням технологій коротких інтерферуючих

РНК, до ґрунтової посухи на основі порівняльного аналізу вмісту фотосинтетичного пігменту хлорофілу та господарських характеристик генетично змінених та не трансгенних форм.

Матеріали і методи

Об'єктом дослідження слугували нащадки трансгенних рослин озимої м'якої пшениці (T_2 і T_4) генотипів: УК 171/19 h, УК 106/19, УК 95/17 та їх вихідні форми. Біотехнологічні рослини були одержані в результаті генетичної трансформації *in planta* з використанням штаму *Agrobacterium tumefaciens LBA*4404, що несе бінарний вектор pBi2E з дволанцюговим РНК-супресором гена проліндегідрогенази *Arabidopsis thaliana*, який складається з інвертованого повтору фрагментів двох копій першого екзона та інтрона гена *pdh.* Розташування елементів цього гена в антисенсовій орієнтації, призводить до придушення його експресії шляхом посттранскрипційного сайленсингу РНК.

Для оцінки рівня експресії інтродукованого гена інтересу в насіннєвих поколіннях трансгенних рослин проводили їх тестування в умовах дії ґрунтової посухи. Для цього рослини пшениці, після стану перезимівлі, висаджували у вегетаційні посудини об'ємом 10 л, заповнені ґрунтосумішшю та вирощували на спеціально обладнаному майданчику. У половині посудин вихідні та трансгенні форми (по 9 рослин вихідних генотипів та по 9 рослин кожної трансгенної лінії) вирощували за нормального водозабезпечення – 70% повної вологоємності (ПВ). В іншій половині посудин (по 9 трансгенних та не трансгенних рослин кожного генотипу) у період розкривання піхви прапорцевого листка вологість ґрунту знижували до 30% ПВ шляхом припинення зрошування і підтримували впродовж 7 діб. Після закінчення терміну дії штучно модельованої посухи, рослини варіантів 30% ПВ поливали разом з контролем до фази повної стиглості зерна.

Загальний вміст хлорофілу (*Chl a* і *b*) визначали безмацераційним методом екстракції пігментів з листка з використанням диметилсульфоксиду за методом А. П. Велберна. Для визначення господарської продуктивності досліджуваних рослин пшениці проводили порівняльний аналіз показників структури врожаю T_2 і T_4 біотехнологічних рослин з їх вихідними формами вирощених за нормальних умов зрошення та недостатнього поливу.

Відбір зразків для структурного аналізу здійснювали у фазі повної стиглості насіння в 3-разовій повторності. Отримані дані обробляли за допомогою Microsoft Excel. Результати представлені як середні значення та стандартне відхилення ($m \pm SD$). Різницю між даними вважали достовірною за $P < 0.05$.

Результати та обговорення

Відомо, що фотосинтетичний апарат є вразливим до нестачі води. Посуха призводить до зменшення інтенсивності фотосинтезу та кількості основних фотосинтетичних пігментів, зокрема хлорофілу, за участі якого відбувається передача енергії збудження до реакційних центрів і розподіл зарядів у реакційних центрах фотосистем. Внаслідок перетворенню молекулами хлорофілу поглинутої листками сонячної радіації в хімічну енергію в рослинах відбуваються метаболічні, ростові та репродуктивні процеси. Тому концентрація хлорофілу, яка характеризує фотосинтетичний потенціал рослини, може слугувати опосередкованим маркером посухостійкості (Rehman et al., 2016).

Для того щоб оцінити толерантність до ґрунтової посухи трансгенних рослин озимої пшениці з частковою супресією гена проліндегідрогенази, отриманих з використанням технології коротких інтерферуючих РНК, нами був проведений порівняльний аналіз загального вмісту хлорофілу прапорцевого листка вихідних та T_2 і T_4 генетично модифікованих форм пшениці генотипів УК 171/19 h, УК 106/19 та УК 95/17 за нормального та обмеженого зрошення водою.

Так, вміст основного фотосинтетичного пігменту – хлорофілу – у вихідних та трансгенних рослин за умов достатнього водозабезпечення коливався у близьких межах, окрім варіанту T_4. У перших з них показник сумарного *Chl* варіював від 12,58 до 13,56, у T_2 – від 13,12 до 14,67, а в T_4 – від 11,41 до 13,76 мг/г сухої речовини. Однак у біотехнологічних рослин T_2 генотипу УК 171/19h він був вищим у середньому на 3,7%, а в УК 106/19 на 5,6%, проти їх вихідних генотипів. У рослин T_4 генотипу УК 95/17 вміст хлорофілу в середньому був на рівні вихідної форми (табл. 1).

Таблиця 1. Вміст хлорофілу (*Chl a + b*), мг/сухої речовини прапорцевого листка вихідних генотипів та насіннєвих поколінь T_2 і T_4 трансгенних рослин пшениці озимої за умов нормального зрошення (70% ПВ, контроль) та дефіциту води (30% ПВ)

Генотип	Варіант	Умови		*Chl* мг/с.р.	% до контролю
		полив	посуха		
УК 171/19h	Вихідний 1	70% ПВ		12,65 ± 0,44	
			30% ПВ	11,11 ± 0,15*	87,8
	Трансген 1, T_2	70% ПВ		13,14 ± 0,23	
			30% ПВ	11,09 ± 0,42*	84,4
	Трансген 2, T_2	70% ПВ		13,12 ± 0,26	
			30% ПВ	10,99 ± 0,21*	83,8
УК 106/19	Вихідний 2	70% ПВ		13,55 ± 0,22	
			30% ПВ	11,12 ± 0,22*	82,0
	Трансген 1, T_2	70% ПВ		14,04 ± 0,14	
			30% ПВ	12,60 ± 0,12*	89,8
	Трансген 2, T_2	70% ПВ		14,67 ± 0,12	
			30% ПВ	11,60 ± 0,40*	79,1
УК 95/17	Вихідний 3	70% ПВ		12,57 ± 0,45	
			30% ПВ	10,84 ± 0,16*	86,2
	Трансген 1, T_4	70% ПВ		13,76 ± 0,36	
			30% ПВ	11,62 ± 0,40*	84,4
	Трансген 2, T_4	70% ПВ		11,41 ± 0,37	
			30% ПВ	11,26 ± 0,13	98,6
	Трансген 3, T_4	70% ПВ		12,48±0,22	
			30% ПВ	11,37 ± 0,39*	91,1

Примітка. * різниця між відповідними генотипами за різних умов водозабезпечення істотна при $P < 0.05$.

Посуха знижувала показник хлорофілу в прапорцевих листках вихідних генотипів у середньому на 12,2–18,0%, порівняно з фізіологічними умовами. Його концентрація в листках трьох генетично модифікованих ліній змінювалась по різному. Так у T_2 рослин генотипу УК 171/19 h вміст хлорофілу в середньому зменшувався на 3,7% більше, в порівнянні з їх вихідною формою, а в УК 106/19 на 2,4%. У рослин T_4 генотипу УК 95/17 реакція на стресовий чинник була неоднозначною, про що свідчить розбіжність за цим показником. Так у рослин варіанту 1 зниження вмісту *Chl* за дії осмотичного стресу було близьким до контрольних рослин, а в рослин варіанту 3 складало 8,9%, на відміну від вихідної форми, де воно становило 13,8%. Відзначились T_4 рослини варіанту 2, у яких вміст хлорофілу за зміни умов культивування залишався стабільним, що позитивно відображалось на їх фізіологічному стані.

Отже, отримані дані демонструють відмінності у досліджуваних показниках між рослинами як вихідних генотипів, так і трансгенних форм. Менш токсичний вплив посухи на рослини окремих трансгенних варіантів може бути пов'язаний із підвищеним рівнем проліну, що є властивим для форм із супресованим геном проліндегідрогенази, а також із впливом цього осмоліту на експресію інших генів стресової відповіді рослин. До того ж неоднозначна реакція на стресове навантаження біотехнологічних рослин залежить і від експресії інтегрованого гена (Dubrovna et al., 2022b). Вищий вміст сумарного хлорофілу в рослинах вихідних генотипів за водного дефіциту може свідчити про послаблення згубного впливу ґрунтової посухи, або про їх високий адаптаційний потенціал.

Оскільки хлорофіл відіграє фундаментальну роль у формуванні врожайності, аналізували елементи продуктивності вихідних генотипів пшениці та T_2 і T_4 генетично змінених рослин за умов нормального та недостатнього поливу (табл. 2).

Так, за умов задовільного зрошення трансгенні рослини пшениці та їх вихідні форми не суттєво відрізнялися у врожайності. Хоча серед генотипів слід відзначити УК 106/19. Його контрольні і T_2 рослини характеризувалися дещо вищими показниками продуктивності, можливо завдяки вмісту хлорофілу, за яким вони вирізнялися. За виповненістю зерна істотних відмінностей між варіантами рослин не спостерігалось.

Таблиця 2. Показники структури урожайності рослин вихідних форм (К) та насіннєвих поколінь генетично модифікованих (T_2 і T_4) рослин пшениці м'якої озимої в умовах достатнього зрошення (70% ПВ) та дефіциту води (30% ПВ)

Генотип/варіант		КЗГК, шт.	МЗГК, г	МЗР, г	МТЗ, г
		Норма (70% ПВ)			
УК 171/19 h	К	39,43 ± 2,30	1,72 ± 0,16	3,12 ± 0,26	43,62 ± 0,43
	1-T_2	42,68 ± 3,01	1,90 ± 0,14	3,60 ± 0,41	44,51 ± 0,50
	2-T_2	41,80 ± 2,84	1,88 ± 0,12	3,62 ± 0,38	44,97 ± 0,58
УК 106/19	К	42,78 ± 3,44	1,85 ± 0,10	3,35 ± 0,35	43,24 ± 0,81
	1-T_2	44,40 ± 3,81	2,02 ± 0,09	3,87 ± 0,42	45,49 ± 0,58
	2-T_2	43,63 ± 4,36	1,96 ± 0,02	3,74 ± 0,37	44,92 ± 0,27
УК 95/17	К	40,25 ± 3,22	1,74 ± 0,11	3,28 ± 0,24	43,23 ± 0,33
	1-T_4	42,71 ± 3,80	1,92 ± 0,14	3,70 ± 0,28	44,95±0,38
	2-T_4	39,82 ± 4,40	1,76 ± 0,06	3,55 ± 0,55	44,20 ± 0,76
	3-T_4	40,66 ± 3,57	1,80 ± 0,09	3,34 ± 0,29	44,27 ± 0,83
Водний дефіцит (30% ПВ)					
УК 171/19 h	К	34,71 ± 2,22	1,34 ± 0,17	2,51 ± 0,32	38,60 ± 0,27
	1-T_2	39,24 ± 2,01	1,69 ± 0,12	3,34 ± 0,47	43,06 ± 0,31
	2-T_2	38,43 ± 3,03	1,57 ± 0,13	3,29 ± 0,42	40,85 ± 0,87
УК 106/19	К	37,52 ± 2,54	1,46 ± 0,14	2,74 ± 0,28	38,91 ± 0,32
	1-T_2	41,34 ± 2,59	1,80 ± 0,13	3,46 ± 0,49	43,54 ± 0,42
	2-T_2	40,21 ± 3,60	1,69 ± 0,17	3,40 ± 0,42	42,03 ± 0,84
УК 95/17	К	35,20 ± 2,40	1,30 ± 0,14	2,67 ± 0,31	36,93 ± 1,36
	1-T_4	39,83 ± 3,35	1,71 ± 0,15	3,40 ± 0,22	42,93 ± 0,20
	2-T_4	38,20 ± 3,09	1,64 ± 0,09	3,35 ± 0,45	42,93 ± 0,24
	3-T_4	38,05 ± 2,40	1,60 ± 0,11	3,09 ± 0,21	42,04 ± 0,65

Примітки: КЗГК (шт.) – кількість зерен з головного колоса; МЗГК (г) – маса зерна з головного колоса; МЗР (г) – маса зерна з рослини; МТЗ (г) – маса тисячі зерен; ПВ – повна вологоємність.

За дефіциту ґрунтової вологи фіксували зниження показників урожайності у всіх досліджуваних форм рослин, що відповідало змінам і вмісту хлорофілу, проте у вихідних генотипів воно було вагоміше. Найбільша різниця у зерновій продуктивності колосу головного пагону між варіантами рослин спостерігалась у генотипу УК 95/17. Відзначились його T_4 рослини і за іншими аналізованими елементами продуктивності, в порівнянні з вихідною формою. Так, показник маси зерна з головного пагону у трансгенних рослин зменшувався в середньому на 9,6%, тоді як у вихідної форми на 25,3%. А у рослин варіанту 2 лише на 6,8%. Маса зерна з рослини, порівняно з варіантом 70% ПВ, у нього складала 94,4%, а в середньому у T_4 рослин вона знижувалася у два рази менше (9%), ніж у рослин вихідної форми (18,6%). Перевагу за цим показником T_4 рослинам надали додаткові продуктивні стебла. Щодо МТЗ то вона зменшувалась у контрольних рослин цього генотипу, в порівнянні з варіантом 70% ПВ на 14,6%, на відміну від T_4, де воно складало в середньому 4,2 відсотки. Меншим зниженням, цього показника характеризувались і T_2 рослини в порівнянні з їх вихідними формами.

Отже, генетично змінені рослини пшениці за показниками структури зернової продуктивності достовірно перевищували відповідні значення у нетрансформованих рослин, що свідчить про підвищену толерантність до ґрунтової посухи.

Висновки

Таким чином, за нормальних умов зрошення достовірних відмінностей між аналізованими варіантами рослин за сумарним вмістом

хлорофілу та показниками зернової продуктивності не було виявлено. Наявно прослідкувалась генотипова різниця, за якою переваги належали рослинам генотипу УК 106/19.

За дії 7-ми добової посухи відбувалось зниження і вмісту фотосинтетичних пігментів, і показників продуктивності. Кращу толерантність до дії стресового фактору продемонстрували нащадки трансгенних рослин, особливо генотипу УК 95/17, оскільки пригнічення активності ендогенних генів катаболізму проліну, що забезпечує стабільне накопичення L-проліну в генетично модифікованих рослинах сприяє посиленню адаптивного потенціалу, ліпшій функціональній активності фотосинтетичного апарату і збереженню продуктивності в умовах осмотичного стресу.

Інформація про фінансову підтримку, подяки: відсутня.

Конфлікт інтересів: автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

References

1. Bapela T., Shimelis H., Tsilo T. J., Mathew I. Genetic Improvement of Wheat for Drought Tolerance: Progress, Challenges and Opportunities. *Plants.* 2022. Vol. 11. P. 1331. https://doi.org/10.3390/plants11101331.
2. Demydov O., Blyzniuk R., Pirych A. Yurchenko T., Kovalyshyna H. Drought resistance of soft spring wheat varieties of different ecological and geographical origins in the Forest Steppe of Ukraine. *Plant and Soil Science.* 2023. Vol. 14. (3). P. 84–96. https://doi.org/10.31548/plant3.2023.84.
3. Dubrovna O. V., Mykhalska S. I., Komisarenko A. H. Improvement of economic and useful characters of wheat using RNA interference technology. *Regulatory Mechanisms in Biosystems.* 2024. Vol. 15. (1). P. 10–23. https://doi.org/10.15421/022402.
4. Dubrovna O. V., Mykhalska S. I., Komisarenko A. G. Using of proline metabolism genes in plant genetic engineering. *Cytology and genetics.* 2022. Vol. 56 (4). P. 361–378. https://doi.org/10.3103/S009545272204003X.
5. Dubrovna O. V., Priadkina G. O., Mykhalska S. I., Komisarenko A. G. Drought-tolerance of transgenic winter wheat with partial suppression of the proline dehydrogenase gene. *Regulatory Mechanisms in Biosystems.* 2022. Vol. 13 (4). P. 385–392. https://doi.org/10.15421/022251.
6. El Sabagh A., Hossain A., Barutcular C., Gormus O., Ahmad Z., Hussain S., Islam M., Alharby H., Bamagoos A., Kumar N. Effects of drought stress on the quality of major oilseed crops: Implications and possible mitigation strategies. *Applied Ecology and Environmental Research.* 2019. Vol. 17 (2). P. 4019–4043. https://doi.org/10.15666/aeer/1702_40194043.
7. Ghosh U. K., Islam M. N., Siddiqui M. N., Cao X., Khan M. A. R. Proline, a multifaceted signalling molecule in plant responses to abiotic stress: understanding the physiological mechanisms. *Plant Biology*. 2022. Vol. 24. (2). P. 227–239. https://doi.org/10.1111/plb.13363.
8. Hossain A., Skalicky M., Brestic M., Maitra S., Ashraful Alam M., Syed M. A., Hossain J., Sarkar S., Saha S., Bhadra P., Shankar T., Bhatt R., Kumar C. A., EL Sabagh A., Islam T. Consequences and mitigation strategies of abiotic stresses in wheat (*Triticum aestivum* L.) under the changing climate. *Agronomy.* 2021. Vol. 11 (2). P. 241. https://doi.org/10.3390/agronomy11020241.
9. Kiriziy D. A., Stasyk O. O. Effects of drought and high temperature on physiological and biochemical processes, and productivity of plants. *Plant Physiology and Genetics.* 2022. Vol. 5 (2). P. 95–122. https://doi.org/10.15407/frg2022.02.095. [in Ukrainian]\
10. Morales F., Ancin M., Fakhet D., González-Torralba J., Gámez A. L., Seminario A., Soba D., Mariem S. B., Garriga M., Aranjuelo I. Photosynthetic metabolism under stressful growth conditions as a bases for crop breeding and yield improvement. *Plants.* 2020. Vol. 9 (1). P. 88. https://doi.org/10.3390/plants9010088.
11. Nyaupane S., Poudel M. R., Panthi B., Dhakal A., Paudel H., Bhandari R. Drought stress effect, tolerance, and management in wheat – a review. *Cogent Food & Agriculture*. 2024. Vol. 10 (1). https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2296094.
12. Rehman S. U., Bilal M., Rana R. M., Tahir M. N., Shan M. K. N., Ayalew H., Yan G. Cell membrane stability and chlorophyll content variation in wheat (*Triticum aestivum*) genotypes under conditions of heat and drought. *Crop and Pasture Science*. 2016. Vol. 67 (7). P. 712–718. http://dx.doi.org/10.1071/CP15385.
13. Sato H., Mizoi J., Shinozaki K., Yamaguchi-Shinozaki K. Complex plant responses to drought and heat stress under climate change. *Plant Journal.* 2024. Vol. 117. P. 1873–1892. https://doi.org/10.1111/tpj.16612.
14. Seleiman M. F., Al-Suhaibani N., Ali N., Akma M., Alotaibi M., Refa Y., Dindaroglu T., Abdul-Wajid H. H., Battaglia M. L. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants.* 2021. Vol. 10. P. 259. https://doi.org/10.3390/plants10020259.
15. Singh C., Yadav S., Khare V., GuptaV., Patial M., Kumar S., Mishra C. N., Tyagi B. S., Gupta A., Tiwari R. Wheat Drought Tolerance: Unveiling a Synergistic Future with Conventional and Molecular Breeding Strategies. *Plants.* 2025. Vol. 14 (7). P. 1053. https://doi.org/10.3390/plants1407105310.

KOMISARENKO A. G., MYKHALSKA S. I.
Institute of Plant Physiology and Genetics of National Academy of Sciences of Ukraine,
Ukraine, 03022, Kyiv, Vasylkivska str., 31/17

ASSESSMENT OF THE LEVEL OF DROUGHT TOLERANCE OF TRANSGENIC WINTER WHEAT PLANTS WITH PARTIAL SUPPRESSION OF THE PROLINE DEHYDROGENASE GENE

Aim. To investigate the level of tolerance of biotechnological plants of soft winter wheat (*Triticum aestivum* L.) of seed generations T_2 and T_4 to soil drought based on a comparative analysis of the content of total chlorophyll and productivity

elements of genetically modified and non-transgenic forms. ***Methods***. Determination of chlorophyll content and structural analysis of the yield. ***Results.*** Grain productivity indicators and the content of the photosynthetic pigment - chlorophyll in biotechnological wheat plants T2 and T4 and their original genotypes under different cultivation conditions were studied. ***Conclusions.*** Under normal irrigation conditions, some differences were found between transgenic and non-transgenic plant forms in chlorophyll content, but they were not observed in productivity elements. The genotypic difference was monitored, in which the advantage belonged to plants of the UK 106/19 genotype. Drought led to a decrease in the content of photosynthetic pigments and yield indicators in all analyzed plant variants. The best tolerance to the stress factor was demonstrated by the descendants of transgenic plants, which were characterized by higher grain productivity.
Keywords: winter wheat, transgenic plants, proline dehydrogenase gene, drought, chlorophylls, productivity.

Надходження статті: 30 березня 2026 р.
Прийняття до друку після рецензування: 30 квітня 2026 р.
Публікація: 30 листопада 2026 р.