

Національна академія аграрних наук України  
Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва

**МЕТА-АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ  
ВПЛИВУ ФІЗІОЛОГІЧНО АКТИВНИХ РЕЧОВИН  
НА СТІЙКІСТЬ РОСЛИН ДО СТРЕСОВИХ ЧИННИКІВ  
Науково-методичні рекомендації**



Харків — 2026

Друкується за рішенням ученої ради Інституту  
рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН України  
(протокол № 4 від 24.04.2026 р.)

**Мета-аналіз результатів досліджень впливу фізіологічно активних речовин на стійкість рослин до стресових чинників: Науково-методичні рекомендації / Укладачі: д-р біол. наук, проф. Колупаєв Ю.Є., д-р філософії (біол.) Шклярєвський М.А., канд. біол. наук Обозний О.І., м.н.с. Шахов І.В., д-р філософії (біол.) Тарабан Д.А., канд. біол. наук Ястреб Т.О. – Харків, 2026. – 27 с.**

Мета-аналіз результатів досліджень фізіологічної активності природних або синтетичних сполук є підходом, що дозволяє узагальнити і об'єктивно оцінити дані про їх вплив на стійкість рослин до стресових чинників, отримані різними дослідницькими колективами і опубліковані у світовій науковій літературі. У роботі описано методику пошуку джерел наукової літератури, встановлення критеріїв відбору та вилучення цільових даних, їх математичної обробки та інтерпретації результатів. На прикладі аналізу даних із стрес-протекторного впливу трегалози на рослини пшениці описано повний алгоритм пошуку і обробки результатів досліджень, формування відповідної бази даних та інтерпретації результатів.

Призначено для наукових працівників у галузі експериментальної біології рослин, рослинництва, викладачів і здобувачів агрономічних та біологічних спеціальностей закладів вищої освіти, а також працівників науково-виробничих підприємств.

**Рецензенти:** д-р с.-г. наук Н.І. Васько (*Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН України*), канд. біол. наук Голтвянський А.В. (*Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна*)

Науково-дослідна робота виконувалась за рахунок бюджетних коштів, спрямованих на забезпечення проведення державними науковими установами наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок за результатами державної атестації.

## Вступ

Мета-аналіз – це кількісний підхід, який об'єднує та порівнює результати численних досліджень для узагальнення діапазону прогнозованих результатів, представлених у літературі, та оцінки консенсусу (Wang et al., 2017). Однією з переваг мета-аналізу порівняно з традиційними оглядами літератури є більша об'єктивність і можливість враховувати вплив розміру вибірки, вказувати довірчі інтервали, виділяти статистично значущі підмножини даних та порівнювати варіації всередині та між категоріями досліджень (Ainsworth et al., 2002).

Мета-аналіз спочатку використовувався для об'єднання великих масивів даних, отриманих у ході медичних досліджень в усьому світі. І нині мета-аналіз у поєднанні з систематичними оглядами вважається найвищим рівнем достовірності доказів відносної ефективності лікарських препаратів і загалом медичних втручань (Bogdanov, Bogdanov, 2017). З 1990-х років мета-аналіз був розроблений як методологія і для галузей екології, сільського господарства та біології (Feng et al., 2009). Мета-аналіз використовувався для вивчення реакції різних видів сільськогосподарських культур на біотичні та/або абіотичні стреси (Wang et al., 2017). Останніми роками такі об'єктивні узагальнення даних проводяться і для оцінки ефективності дії на рослини екзогенних фізіологічно активних речовин (ФАР). Цей метод особливо корисний за наявності суперечливих результатів, оскільки він дозволяє об'єднати дані численних досліджень, підвищуючи статистичну потужність і точність. Поєднуючи результати, мета-аналіз дає змогу виявити закономірності та взаємозв'язки, які можуть бути втрачені в окремих дослідженнях, забезпечуючи всебічне розуміння ролі певних ФАР у реакціях рослин на стрес (Lei et al., 2025). Висновки, зроблені на основі мета-аналізу, можуть бути використані для розробки агротехнологій, що було б неможливо в рамках окремих, як правило, короткострокових дослідницьких проектів, більшість з яких обмежені конкретними кліматичними умовами (Tahjib-Ul-Arif et al., 2022). Для прикладних досліджень мета-аналіз ефектів ФАР доцільно проводити окремо для кожного виду рослин, оскільки ефекти цих сполук можуть бути видоспецифічними, при цьому способи застосування ФАР в експериментах також різняться залежно від видових особливостей рослин.

Останніми роками проведено декілька мета-аналізів впливу на рослини екзогенного мелатоніну (Muhammad et al., 2022; 2024; 2025). Також з використанням інструментарію мета-аналізу оцінювалися стрес-протекторні ефекти донорів нітроген оксиду (Ul-Arif et al., 2022; Liu et al., 2023; Lei et al., 2025). Разом з тим

практику застосування мета-аналізу для об'єктивної оцінки впливу (зокрема, стрес-протекторного) ФАР на рослини не можна назвати поширеною. Зважаючи на це, доцільне викладення у науково-методичній літературі пояснень щодо систематичного пошуку джерел літератури, первинного відбору релевантних публікацій, встановлення модераторів для поділу даних на певні групи, вилучення даних із джерел, їх математичної обробки та інтерпретації результатів.

Не претендуючи на оригінальність підходу, ми поставили за мету розглянути повний алгоритм проведення мета-аналізу – від обґрунтування вибору об'єкта дослідження до математичної обробки та інтерпретації результатів – в контексті оцінки стрес-протекторної дії ФАР. У даних рекомендаціях розглядається методологія систематичного пошуку, вилучення і обробки даних щодо стрес-протекторного впливу конкретної сполуки на конкретний вид культурних рослин, а саме відомостей щодо впливу трегалози на стійкість пшениці до посухи і теплового стресу.

### **Обґрунтування проведення мета-аналізу стрес-протекторного впливу трегалози на стійкість пшениці до осмотичного і теплового стресів (за: Kolupaev et al., 2026)**

Трегалоза – дисахарид, утворений 1,1-зв'язком двох молекул D-глюкози, що вперше був виявлений у жита та деяких видів грибів (Richards et al., 2002). Нині цей дисахарид вважається поширеним в різних організмах, включаючи бактерії, дріжджі, гриби і водорості, а також деяких комах, безхребетних і царстві рослин (Han et al., 2024). Серед розчинних вуглеводів саме трегалоза вважається унікальним стресовим метаболітом рослин. Це пов'язано з її здатністю стабілізувати біомолекули та їх комплекси, чинити пряму антиоксидантну дію та залучатися до клітинного сигналіngu (Iturriaga et al., 2009; Raza et al., 2024). У покритонасінних рослин в оптимальних умовах синтезується незначна кількість трегалози, але при стресових впливах її вміст у рослинах суттєво підвищується (Kosar et al., 2019).

Цілком природно, що накопичення фундаментальних знань про унікальну роль трегалози у стійкості рослин до стресів, що спричиняють зневоднення, стає стимулом для вивчення впливу екзогенної трегалози на посухо-, соле- та теплостійкість культурних рослин (Kosar et al., 2019). Так, до цього часу отримані дані про підвищення посухостійкості пажитника, ріпаку, редису, кукурудзи, соняшнику та інших сільськогосподарських культур (Ali, Ashraf, 2011; Akram et al., 2016; Sadak, 2016; Kosar et al., 2021; 2022). Такі ефекти пов'язують з активацією під впливом трегалози антиоксидантних ферментів, накопиченням низькомолекулярних антиоксидантів та інших сполук зі стрес-протекторною

активністю (Raza, 2021; Choudhary et al., 2025). Менш вивченою залишається феноменологія ефектів екзогенної трегалози на рослини за теплового стресу. Однак під впливом трегалози показано пом'якшення спричинюваних нагріванням окиснювальних пошкоджень у кукурудзи (Li et al., 2014) та підвищення ефективності фотосинтезу у пшениці при тепловому стресі (Raza et al., 2024).

Пшениця стала одним з найважливіших видів сільськогосподарських рослин, на прикладі якого в даний час вивчаються стрес-протекторні ефекти екзогенної трегалози (Aldesuquy, Ghanem, 2015; Kosar et al., 2019). При цьому пшениця щодо реакції на умови дефіциту води належить до категорії «дуже чутливих» видів (Asseng et al., 2012). У той же час 50% земель, зайнятих під вирощування пшениці, зазнають посухи (Hasanuzzaman et al., 2018).

Посуха та високі температури спричиняють суттєві окислювальні ушкодження у клітинах та тканинах рослин пшениці (Kolupaev et al., 2023a; 2023b). При цьому пшениця досить виразно реагує на вплив екзогенних фітогормонів, антиоксидантів, осмопротекторів та сигнальних молекул (Lal et al., 2021). Трегалоза належить до сполук, які поєднують у собі більшість таких властивостей (Kosar et al., 2019; Nan et al., 2024). На її вплив пшениця реагує активацією компонентів антиоксидантної системи та накопиченням осмолітів, що зазвичай супроводжується пом'якшенням порушень базових функцій, спричинюваних стресовими умовами – фотосинтезу, водного режиму, росту та продуктивності (Aldesuquy, Ghanem, 2015; Luo et al., 2022).

Проте дані про вплив трегалози на стійкість пшениці до посухи та високих температур не можна назвати однозначно позитивними. У деяких роботах виявлено пригнічення росту рослин за дії трегалози (Luo et al., 2021). Загалом, незважаючи на те, що активні дослідження впливу трегалози на стійкість культурних рослин проводять майже два десятиліття, вони залишаються слабо проаналізованими. Повною мірою це стосується і пшениці. Для об'єктивного аналізу впливу екзогенної трегалози на стійкість пшениці до посухи та теплового стресу проведено мета-аналіз даних літератури стосовно впливу трегалози на ростові процеси, вміст фотосинтетичних пігментів, генерацію активних форм кисню, активність окремих антиоксидантних ферментів та вміст низькомолекулярних антиоксидантів і осмолітів за фізіологічно нормальних і стресових умов.

### **Методи пошуку і обробки даних**

*Пошук і збір даних.* Дані були зібрані за допомогою пошуку, проведеного в базі даних Google Scholar як найповнішої у жовтні 2025 року. Пошук, що включав комбінацію термінів "trehalose AND (drought OR "heat stress") AND (wheat OR "Triticum aestivum)", виявив 475 документів. При подальшому перегляді назв і

анотацій спочатку було відібрано 46 статей, пов'язаних із впливом трегалози на стійкість пшениці до посухи або теплового стресу. Для подальшої обробки цих статей були виключені огляди і роботи, що містять повторювані дані, після чого здійснювали відбір публікацій для безпосереднього мета-аналізу даних. Критеріями відбору служили: (1) наявність в експерименті варіантів з обробкою рослин трегалозою у певній концентрації та відповідних контрольних варіантів, а також варіантів із впливом посухи чи теплового стресу; 2) описані умови вирощування рослин в лабораторії (фітотроні, теплиці) з обов'язковими даними про умови створення та рівень стресів (режим зволоження або концентрація поліетиленгліколю (для лабораторних дослідів), температура); 3) наявність даних про повторності експериментів і стандартну похибку або стандартне відхилення середніх значень. Дані, представлені у статтях у графічній формі, вилучали із текстів за допомогою програми WebPlotDigitizer (Burda et al., 2017).

У більшості публікацій, дані яких використовувалися для мета-аналізу, застосовувалася одна ефективна концентрація трегалози, за наявності даних щодо дії трегалози в кількох концентраціях для мета-аналізу використовували дані тільки для оптимальної концентрації, що проявляла максимальні стрес-протекторні ефекти. Якщо дія стрес-факторів вивчалася у часовій динаміці, то кожен часову точку вважали окремою парою спостережень (варіанти без обробки та з обробкою трегалозою). Якщо дослідження проводилося з використанням різних генотипів пшениці, дані для кожного з них вважали незалежними парними спостереженнями (варіанти без обробки і з обробкою трегалозою, відповідно). Таким чином, кілька пар варіантів (контроль та дослід з обробкою трегалозою), що стосувалися однієї статті, оцінювалися як незалежні спостереження, як це зазвичай практикується при проведенні мета-аналізу в галузі біології рослин (Klümper, Qaim, 2014; Sun et al., 2020). Після ретельного скринінгу публікацій було відібрано 15 статей, які містили загалом 248 пар (ідентичні варіанти без обробки та з обробкою трегалозою) досліджень різних показників. Ці дані наводяться в Додатку (табл. 1-4) з посиланнями на джерела, які включені до списку літератури.

При аналізі статей було виділено кілька груп показників. Група інтегральних фізіологічних показників включала: (1) ростові показники (оскільки в різних статтях використовувалися різноманітні показники росту, в одному блоці узагальнено оцінювалися відносні дані щодо накопичення сирової та (або) сухої біомаси органів або цілих рослин, лінійного росту або площі листків); (2) показник відносного вмісту води (RWC) у листках; (3) вміст хлорофілів (сумарно хлорофіли *a* та *b*). Група показників окиснювального стресу та пошкодження мембран (4) була представлена даними щодо вмісту пероксиду водню та продукту пероксидного

окислення ліпідів малонового діальдегіду (МДА) у тканинах, а також виходу електролітів із тканин. Дані про функціонування антиоксидантної системи були представлені активністю ферментів супероксиддисмутази (СОД), гваяколпероксидази, каталази та глутатіонредуктази (5). Ще одну групу показників склали величини вмісту основних низькомолекулярних антиоксидантів – аскорбінової кислоти та відновленого глутатіону (GSH), а також поліфункціональних стресових метаболітів – проліну та цукрів.

Для визначення величини ефекту трегалози проводили узагальнену оцінку всіх пар показників у контролі (без обробки трегалозою) та досліді (з обробкою трегалозою) як для груп варіантів без стресових впливів, так і зі стресовими впливами. В окремі категорії виділяли групи варіантів із посухою (осмотичним стресом) або тепловим стресом. Також усі парні дані (контроль, трегалоза) були поділені на категорії фаз розвитку рослин – вегетативна та генеративна. Для обробки даних за певною категорією використовувалися лише ті показники, які були репрезентовані не менш як двома незалежними спостереженнями.

*Статистичний аналіз.* Мета-аналіз було проведено з використанням моделі випадкових ефектів через очікувану гетерогенність серед досліджень. Спочатку було проведено загальний аналіз усього набору даних. Потім було здійснено аналіз підгруп для кожної категорії.

Розміри ефектів були оцінені шляхом обчислення натурального логарифма ( $\ln R$ ) відношення середнього значення відповідного показника при обробці трегалозою ( $X_{\text{експ.}}$ ) до контрольного значення (варіант без обробки трегалозою –  $X_{\text{контр.}}$ ):  $\ln R = \ln (X_{\text{експ.}} / X_{\text{контр.}})$  (Wang et al., 2022).

Для оцінки параметрів моделі було використано REML (оцінка обмеженої максимальної правдоподібності). REML є стандартним методом у багатьох передових статистичних пакетах програмного забезпечення та дозволяє відносно точно виявляти закономірності з невеликою кількістю даних. Ступінь гетерогенності оцінювався з використанням трьох додаткових метрик:  $\tau^2$ , оціненого за допомогою обмеженої максимальної правдоподібності (Viechtbauer, 2005), Q-тесту Кохрана та статистики  $I^2$  (Higgins & Thompson, 2002). Ці метрики були обрані як такі, що використовуються в мета-аналізі і дають вичерпну інформацію про гетерогенність:  $\tau^2$  оцінює дисперсію між дослідженнями, Q-тести на її значущість, а  $I^2$  кількісно визначає частку загальної варіабельності, спричиненої гетерогенністю. Вплив трегалози вважався значимим, якщо 95% довірчі інтервали не перетинали нульову лінію. Усі перетворення даних, аналізи та візуалізації виконувалися за допомогою мови програмування R (версія 4.5.1) та пакета metafor (Viechtbauer, 2010).

## Результати аналізу даних

*Гетерогенність даних.* Мета-аналіз показав, що дані розподілені нормально, зі значною гетерогенністю, що спостерігається для більшості модераторів (Таблиця 1). Це, ймовірно, пов'язано з відмінностями в експериментальних умовах, незважаючи на наявність певних критеріїв у відборі даних (див. «Матеріали та методи»). Зокрема, вік рослин суттєво відрізнявся в різних дослідженнях, як і тривалість та інтенсивність стресових обробок і концентрації екзогенної трегалози.

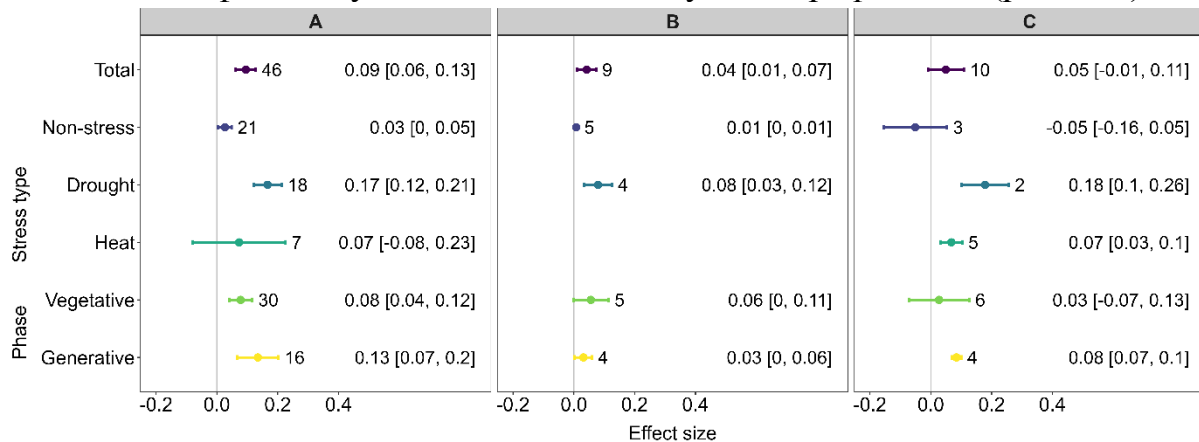
**Таблиця 1.** Аналіз гетерогенності реакції росту, відносного вмісту води, вмісту хлорофілу,  $H_2O_2$ , малонового діальдегіду, виходу електролітів з тканин, активності антиоксидантних ферментів, вмісту аскорбату, глутатіону та осмолітів у пшениці (Kolupaev et al., 2026)

Показник	Модератор	Cochran's Q тест	df	<i>p</i>	$\tau^2$	$I^2$
Ростова відповідь	Загалом	322.56	45	< 0.001	0.00895	91.92
	Без стресу	33.55	20	0.029	0.00092	45.12
	Посуха	88.31	17	< 0.001	0.00614	78.58
	Нагрів	138.81	6	< 0.001	0.03252	98.86
	Вегетативна фаза	140.79	29	< 0.001	0.00762	83.76
	Генеративна фаза	181.58	15	< 0.001	0.01401	96.68
Відносний вміст води	Загалом	269.75	8	< 0.001	0.00180	98.51
	Без стресу	4.18	4	0.382	0.00001	27.07
	Посуха	63.14	3	< 0.001	0.00172	97.99
	Вегетативна фаза	52.70	4	< 0.001	0.00316	87.53
	Генеративна фаза	217.03	3	< 0.001	0.00085	98.71
Вміст хлорофілу	Загалом	129.16	9	< 0.001	0.00818	95.89
	Без стресу	20.54	2	< 0.001	0.00777	92.35
	Посуха	0.85	1	0.358	~ 0	~ 0
	Нагрів	40.47	4	< 0.001	0.00139	86.58
	Вегетативна фаза	58.42	5	< 0.001	0.01411	96.26
	Генеративна фаза	1.13	3	0.769	~ 0	~ 0
Вміст $H_2O_2$	Загалом	262.77	8	< 0.001	0.02268	98.28
	Без стресу	17.18	4	0.002	0.00324	89.66
	Посуха	2.90	3	0.408	0.00011	17.42
	Вегетативна фаза	262.77	8	< 0.001	0.02268	98.28
Вміст малонового діальдегіду	Загалом	534.55	35	< 0.001	0.02581	97.53
	Без стресу	82.61	12	< 0.001	0.01944	95.67
	Посуха	207.29	15	< 0.001	0.01193	93.93
	Нагрів	4.89	6	0.558	0.00018	14.74
	Вегетативна фаза	504.30	27	< 0.001	0.02979	98.10

	Генеративна фаза	11.35	7	0.124	~ 0	0.03
Вихід електролітів	Загалом	86.20	15	< 0.001	0.00773	79.13
	Без стресу	25.03	7	< 0.001	0.01048	74.79
	Посуха	41.51	5	< 0.001	0.00718	86.23
	Нагрів	0.01	1	0.923	~ 0	~ 0
	Вегетативна фаза	74.78	11	< 0.001	0.00973	81.70
	Генеративна фаза	8.54	3	0.036	0.00441	69.14
Активність СОД	Загалом	165.67	13	< 0.001	0.00640	94.54
	Без стресу	2.05	4	0.726	~ 0	~ 0
	Посуха	17.64	3	< 0.001	0.02379	94.65
	Нагрів	7.86	4	0.097	~ 0	1.29
	Вегетативна фаза	21.18	9	0.012	~ 0	0.69
	Генеративна фаза	1.57	3	0.666	~ 0	~ 0
Активність гваяколпероксидази	Загалом	1257.01	21	< 0.001	0.10110	99.06
	Без стресу	182.26	8	< 0.001	0.05428	96.98
	Посуха	352.83	7	< 0.001	0.26175	99.29
	Нагрів	3.79	4	0.435	0.00009	16.06
	Вегетативна фаза	934.56	17	< 0.001	0.11676	98.58
	Генеративна фаза	3.26	3	0.354	0.00009	21.22
Активність каталази	Загалом	688.65	21	< 0.001	0.10043	98.45
	Без стресу	65.59	8	< 0.001	0.01652	89.35
	Посуха	525.75	7	< 0.001	0.20525	99.29
	Нагрів	3.88	4	0.423	~ 0	~ 0
	Вегетативна фаза	663.18	17	< 0.001	0.12052	98.56
	Генеративна фаза	0.51	3	0.917	~ 0	~ 0
Активність глутатіоредуктази	Загалом	115.45	7	< 0.001	0.01643	96.50
	Без стресу	45.71	3	< 0.001	0.02351	96.07
	Посуха	65.39	3	< 0.001	0.00877	94.90
	Вегетативна фаза	115.45	7	< 0.001	0.01643	96.50
Вміст аскорбінової кислоти	Загалом	12.23	7	0.093	0.00117	35.23
	Без стресу	9.77	3	0.021	0.00790	77.20
	Посуха	2.35	3	0.502	~ 0	~ 0
	Вегетативна фаза	12.23	7	0.093	0.00117	35.23
Вміст відновленого глутатіону	Загалом	29.97	13	0.005	0.00276	61.11
	Без стресу	9.02	3	0.029	0.00219	70.35
	Посуха	12.19	9	0.203	0.00154	32.98
	Вегетативна фаза	29.97	13	0.005	0.00276	61.11
Вміст проліну	Загалом	923.78	17	< 0.001	0.09238	98.53

	Без стресу	61.55	5	< 0.001	0.10142	99.02
	Посуха	277.38	11	< 0.001	0.05780	96.30
	Вегетативна фаза	773.38	13	< 0.001	0.03311	96.81
	Генеративна фаза	16.51	3	< 0.001	0.08509	85.59
Вміст розчинних вуглеводів	Загалом	51164.86	8	< 0.001	0.15119	99.93
	Без стресу	48922.16	4	< 0.001	0.27443	99.98
	Посуха	16.13	3	0.001	0.00343	81.59
	Вегетативна фаза	5850.68	4	< 0.001	0.24589	99.83
	Генеративна фаза	1.04	3	0.791	~ 0	~ 0

*Вплив трегалози на інтегральні фізіологічні показники рослин пшениці.* При оцінці всієї сукупності даних виявлено невелике, але значиме при  $p \leq 0.05$  збільшення ростових показників у випадках з обробкою трегалози порівняно з контролем (рис. 1, а). У групі без стресового впливу такий позитивний ефект трегалози був дуже невеликим. Значно більшим цей ефект був у випадках із впливом посухи (осмотичного стресу). У той же час, при тепловому стресі не виявлено помітного впливу трегалози на ростові показники рослин. У цілому посилення ростових показників виявлялося під час обробки рослин трегалозою як на вегетативній, так і на генеративній фазах розвитку. Вищі показники впливу трегалози відзначалися на генеративній фазі, проте ця відмінність від ефектів на вегетативній фазі не була статистично значущою при  $p \leq 0.05$  (рис. 1, а).

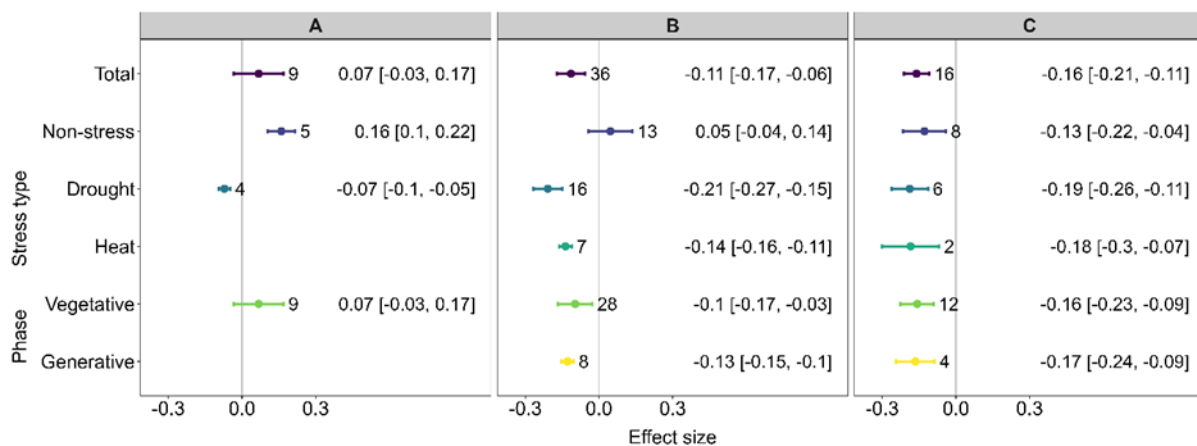


**Рис. 1.** Вплив екзогенної трегалози на параметри росту (А), відносний вміст води (В) та загальний вміст хлорофілу (С) у рослинах пшениці (Kolupaev et al., 2026). Вертикальна лінія вказує на відсутність різниці між контрольними рослинами та рослинами, обробленими трегалозою (розмір ефекту = 0). Числа біля символів вказують кількість точок даних, а смуги похибки вказують на 95% довірчі інтервали. Середні значення ефектів та їх довірчі інтервали також показано на полях праворуч від рисунків.

Обробка рослин трегалозою в цілому лише незначно збільшувала відносний вміст води в тканинах, при цьому без стресового впливу такий ефект не проявлявся (рис. 1, b). Проте за посухи під впливом трегалози підвищувався показник відносного вмісту води (RWC). На вегетативній стадії величина впливу трегалози на RWC виявилася дещо вищою, ніж на генеративній, хоча ці відмінності не можна вважати значимими при  $p \leq 0.05$ .

За відсутності стресових впливів вплив трегалози на сумарний вміст хлорофілів не зафіксовано (рис. 1, c). Однак при обох типах стресів у варіантах з обробкою рослин трегалозою відзначено підвищення вмісту хлорофілів у листках, більш вираженим такий ефект був за умов посухи. Проте в цілому (при оцінці варіантів без стресів та зі стресовими впливами) на вегетативній фазі не вдалося зафіксувати підвищення вмісту хлорофілу під впливом трегалози, водночас на генеративній фазі розвитку такий ефект виявився значним при  $p \leq 0.05$ , хоча й невеликим.

*Вплив трегалози на показники окислювального стресу та стану біомембран.*  
За оцінки всієї сукупності даних не виявлялося значного впливу трегалози вміст гідроген пероксиду в тканинах рослин (рис. 2, a). У той же час за відсутності стресових впливів обробка трегалозою спричиняла невелике, але значиме при  $p \leq 0.05$  підвищення вмісту  $H_2O_2$  у рослин пшениці. З іншого боку, в умовах осмотичного стресу відзначалося зниження вмісту гідроген пероксиду під впливом обробки рослин трегалозою.



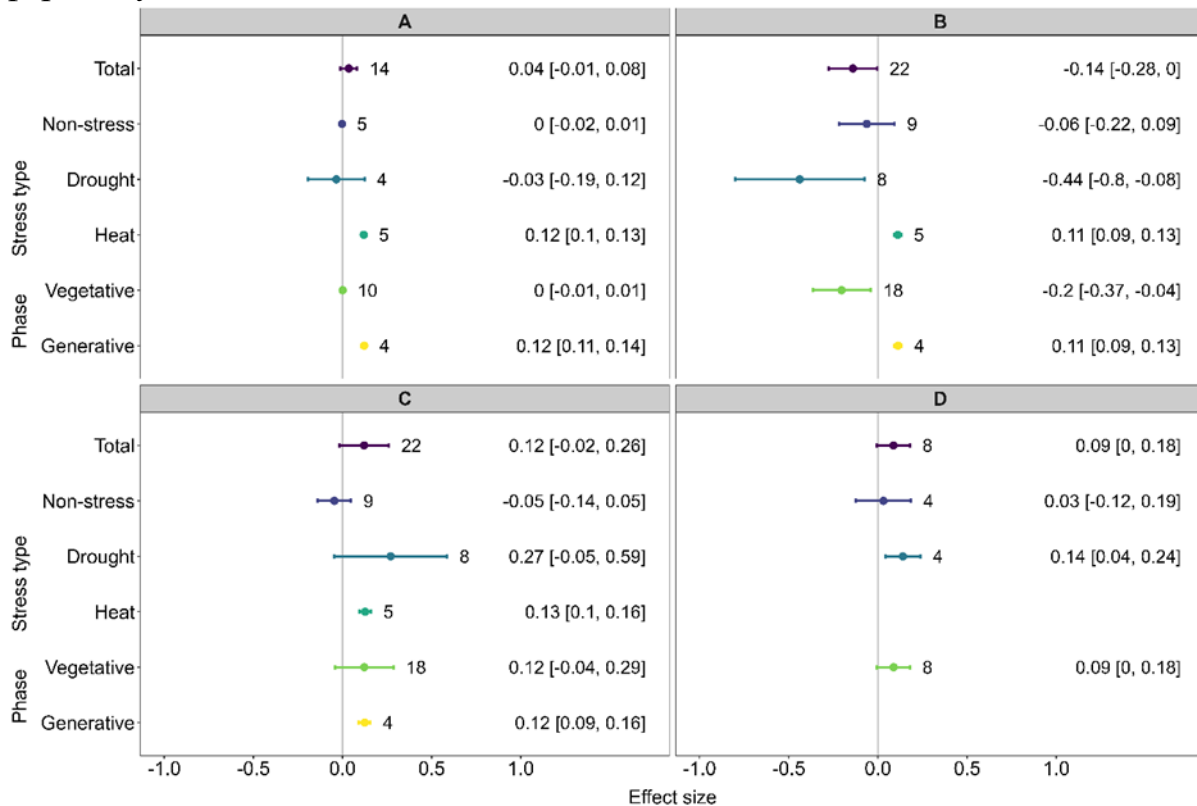
**Рис. 2.** Вплив екзогенної трегалози на вміст гідроген пероксиду (A), малонового діальдегіду (B) та вихід електролітів з тканин (C) у рослинах пшениці. Вертикальна лінія вказує на відсутність різниці між контрольною групою та рослинами, обробленими трегалозою (розмір ефекту = 0). Числа біля символів вказують кількість точок даних, а смуги похибки вказують на 95% довірчі інтервали. Середні значення ефектів та їх довірчі інтервали також показані на полях праворуч від рисунків.

Більш однозначним виявився вплив екзогенної трегалози на вміст одного з основних продуктів пероксидного окиснення ліпідів, МДА. Кількість цього маркера окиснювального стресу у випадках з обробкою трегалозою не набагато, але

достовірно при  $p \leq 0.05$  знижувалася за загальної оцінки всіх спостережень (рис. 2, b), хоча в оптимальних умовах вплив трегалози на вміст МДА не виявлявся. У той же час як за посухи, так і за теплового стресу вміст МДА в тканинах рослин, оброблених трегалозою, був нижчим, ніж у контрольних. Ефекти зниження кількості МДА зафіксовані як на вегетативній, так і на генеративній фазах розвитку рослин.

Обробка рослин трегалозою сприяла збереженню цілісності клітинних мембран. Про це свідчить зниження показника виходу електролітів з тканин у варіантах із трегалозою, яке було значимим не тільки за обох типів стресових впливів, але й для групи варіантів без стресу (рис. 2, c). Такий ефект практично однаково проявлявся як на вегетативній, і на генеративній фазах розвитку рослин.

*Вплив трегалози на активність антиоксидантних ферментів.* Активність СОД у рослин пшениці слабо змінювалася під час обробки трегалозою (рис. 3, a). Лише у варіантах з тепловим стресом та спостережень на генеративній фазі розвитку під впливом трегалози відзначалося невелике збільшення активності ферменту.



**Рис. 3.** Вплив екзогенної трегалози на активність супероксиддисмутази (A), гваяколпероксидази (B), каталази (C) та глутатіонредуктази (D) у рослинах пшениці (Kolupaev et al., 2026). Вертикальна лінія вказує на відсутність різниці між контрольними рослинами та рослинами, обробленими трегалозою (розмір ефекту = 0). Числа біля символів вказують кількість точок даних, а смуги похибки вказують на 95% довірчі інтервали. Середні значення ефектів та їх довірчі інтервали також показані на полях праворуч від рисунків.

Активність гваяколпероксидази в цілому і групи варіантів без стресових впливів майже не змінювалася у відповідь на обробку трегалозою (рис. 3, b). Тим не менш, не можна не відзначити істотні при  $p \leq 0.05$ , але протилежні за напрямом зміни активності ферменту за дії посухи та теплового стресу: у першому випадку обробка рослин трегалозою спричиняла невелике зниження активності гваяколпероксидази, а в другому – підвищення. Протилежними за знаком виявилися і зміни активності гваяколпероксидази на різних фазах розвитку: зниження на вегетативній та підвищення на генеративній (рис. 3, b).

Також не спостерігалось значних змін активності каталази за обробки рослин пшениці трегалозою. Значимого при  $p \leq 0.05$  впливу трегалози на активність ферменту не виявлено при оцінці всієї сукупності результатів, отриманих за умов посухи, а також на вегетативній фазі розвитку рослин (рис. 3, c). Однак при тепловому стресі та на генеративній фазі під впливом трегалози виявлялося невелике підвищення активності каталази.

Активність глутатіонредуктази репрезентована невеликою кількістю досліджень (усього 8), що ускладнює висновки. В цілому, а також окремо у групі варіантів без стресових впливів не зафіксовано змін активності глутатіонредуктази (рис. 3, d). Однак виявлено невелике, але значиме при  $p \leq 0.05$  підвищення активності ферменту під впливом трегалози в умовах посухи.

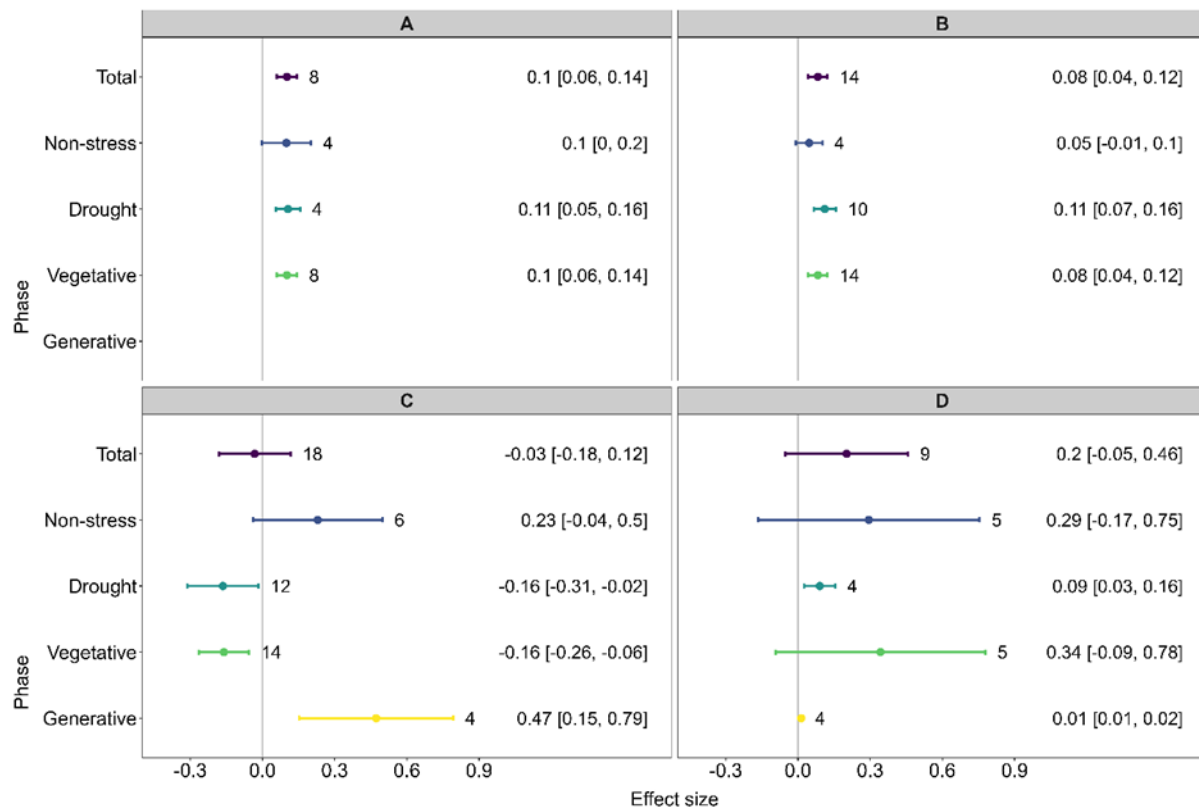
*Вплив трегалози на вміст низькомолекулярних антиоксидантів та осмолітів.* Вплив трегалози на вміст аскорбінової кислоти належить до маловивчених (всього 8 досліджень), що не дає підстав для повноцінного аналізу. Однак можна говорити про тенденцію до підвищення вмісту аскорбату в цілому та за умов посухи (рис. 4, a). При цьому всі дослідження, доступні на момент виконання мета-аналізу, були проведені на вегетативній фазі розвитку рослин.

Уміст іншого ключового антиоксиданту – глутатіону – в цілому під впливом трегалози значно збільшувався, хоча за відсутності стресових впливів такий ефект не проявлявся (рис. 4, b). Під час стресу посухи вміст GSH під впливом трегалози помітно збільшувався.

Вміст проліну під час обробки рослин пшениці трегалозою змінювався слабо (рис. 4, z). За відсутності стресових впливів значного впливу обробки трегалозою на вміст проліну не виявлено. Однак за посухи виявлено невелике, але значиме при  $p \leq 0.05$  зниження вмісту проліну. У той же час зафіксовано зниження вмісту проліну при застосуванні трегалози на вегетативній фазі розвитку та підвищення – на генеративній (рис. 4, c).

Загальний вміст розчинних вуглеводів істотно не змінювався під впливом обробки трегалозою в загальній сукупності результатів і групах без стресових впливів, проте при стресі посухи він збільшувався (рис. 4, d). На вегетативній фазі

значних змін вмісту цукрів при обробці рослин трегалозою не зафіксовано, хоча на генеративній фазі виявлялося невелике підвищення цього показника.



**Рис. 4.** Вплив екзогенної трегалози на вміст аскорбінової кислоти (А), відновленого глутатіону (В), проліну (С) та цукрів (D) у рослинах пшениці. Вертикальна лінія вказує на відсутність різниці між контрольною групою та рослинами, обробленими трегалозою (розмір ефекту = 0). Числа біля символів вказують кількість точок даних, а смуги похибки вказують на 95% довірчі інтервали. Середні значення ефектів та їх довірчі інтервали також показано на полях праворуч від рисунків.

*Висновки.* Мета-аналіз 241 пари спостережень, що містяться в 15 статтях, дозволяє зробити висновок, що екзогенна трегалоза в цілому позитивно впливає на посухо- і теплостійкість пшениці. Проте помітне поліпшення ростових показників під впливом трегалози зафіксовано лише за стресу посухи, але не теплового стресу. У той же час обробка трегалозою зменшувала пероксидне окиснення ліпідів та сприяла збереженню цілісності мембран та пулу хлорофілів при обох типах стресів. Ймовірно, екзогенна трегалоза може чинити як пряму захисну дію, пов'язану з антиоксидантними ефектами та участю в гідратації компонентів мембран, так і опосередковану, обумовлену залученням у складні клітинні сигнальні процеси. Обсяг результатів досліджень поки що не дозволяє побудувати повну картину протекторної дії трегалози при посузі та тепловому стресі у пшениці. У той же час проведений мета-аналіз вказує на необхідність спеціального вивчення специфічних

особливостей дії трегалози при різних типах стресів та у розрізі різних таксономічних груп рослин.

### Список літератури

- Ainsworth, E.A., Davey, P.A., Bernacchi, C.J., Dermody, O.C., Heaton, E.A., Moore, D.J., Morgan, P.B., Naidu, S.L., Ra, H.Y., Zhu, X.G., Curtis, P.S., Long, S.P., 2002. A meta-analysis of elevated CO<sub>2</sub> effects on soybean (*Glycine max*) physiology, growth and yield. *Global Change Biol.* 8, 695–709.
- Ahmed H.E., Kord M.A., Youssef H., Qaid E.A., 2016: Exogenous application of trehalose improves the physiological status of wheat cv. Giza 168 grown under stress. – *Egyptian Journal of Botany*, 56: 627–646.
- Ahsan A., Kader M., Rohman M., Mokarroma N., Mustakim A., 2024: Exogenous trehalose boosted drought tolerance in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) by enhancing glyoxalase system. – *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, 49(3): 211-223.
- Akram N.A., Waseem M., Ameen R., Ashraf M., 2016: Trehalose pretreatment induces drought tolerance in radish (*Raphanus sativus* L.) plants: some key physio-biochemical traits. – *Acta Physiologiae Plantarum*, 38: 3. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-2018-1>
- Aldesuquy H., Ghanem H., 2015: Exogenous salicylic acid and trehalose ameliorate short term drought stress in wheat cultivars by up-regulating membrane characteristics and antioxidant defense system. – *Journal of Horticulture*, 2(2): 139. <http://dx.doi.org/10.4172/2376-0354.1000139>
- Ali Q., Ashraf M., 2011: Induction of drought tolerance in maize (*Zea mays* L.) due to exogenous application of trehalose: growth, photosynthesis, water relations and oxidative defence mechanism. – *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197(4): 258–271. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2010.00463.x>
- Asseng S., Milroy S., Bassu S., Saab M.T.A., 2012: Wheat. – In: Steduto P., Hsiao T.C., Fereres E., Raes D. (eds), *Crop yield response to water*: 92–100. Rome.
- Bogdanov, A.A., Bogdanov, An.A. Network meta-analysis for clinicians. *Journal of Modern Oncology*. 2021; 23 (3): 418–424. DOI: 10.26442/18151434.2021.3.201202
- Burda B.U., O'Connor E.A., Webber E.M., Redmond N., Perdue L.A., 2017: Estimating data from figures with a Web-based program: considerations for a systematic review. – *Research Synthesis Methods*, 8(3): 258–262. <https://doi.org/10.1002/jrsm.1232>
- Choudhary A., Nepovimova E., Rajput V.D., Malik T., Choudhary M., Bhardwaj N., Peter L., Puri S., Kimta N., 2025: Mechanistic understanding of GABA and trehalose in modulating plant response to drought stress. – *Plant Stress*, 16: 100838. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.100838>
- Feng, Z., Kobayashi, K., Wang, X., Feng, Z., 2009. A meta-analysis of responses of wheat yield formation to elevated ozone concentration. *Chinese Sci. Bull.* 54, 249–255.
- Han Y., Liang A., Xu D., Zhang Y., Shi J., Li M., Liu T., Qi H., 2024: Versatile roles of trehalose in plant growth and development and responses to abiotic stress. – *Vegetable Research*, 4: e007. <https://doi.org/10.48130/vegres-0024-0007>
- Hasanuzzaman M., Mahmud J.A., Anee T.I., Nahar K.M., Islam M.T., 2018: Drought stress tolerance in wheat: Omics approaches in understanding and enhancing antioxidant defense. – In: Zargar S.M., Zargar M.Y. (eds), *Abiotic stress-mediated sensing and signaling in plants: an omics perspective*: 267–307. Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-7479-0\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7479-0_10)

- Heshmat S.A., Farag L.I., Hanan E.G., 2018a: Assessment of salicylic acid and trehalose impact on root growth and water relations in relation to grain yield of droughted wheat cultivars. – Nutrition & Food Science International Journal, 7(1): 555701. <https://doi.org/10.19080/NFSIJ.2018.07.555701>
- Heshmat S.A., Ibraheem F.L., Ghanem H.E., 2018b: Comparative effects of salicylic acid and/or trehalose on osmotic adjustment and solutes allocation of two droughted wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. – Advances in Agricultural Technology & Plant Sciences, 1(1): 180001
- Higgins J.P.T., Thompson S.G., 2002: Quantifying heterogeneity in a meta-analysis. – Statistics in Medicine, 21(11): 1539–1558. <https://doi.org/10.1002/sim.1186>
- Iturriaga G., Suárez R., Nova Franco B., 2009: Trehalose metabolism: from osmoprotection to signaling. – International Journal of Molecular Sciences, 10(9): 3793–3810. <https://doi.org/10.3390/ijms10093793>
- Klümper W., Qaim M., 2014: A meta-analysis of the impacts of genetically modified crops. – PLoS One, 9(11): e111629. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111629>
- Kolupaev Y.E., Yastreb T.O., Ryabchun N.I., Kokorev A.I., Kolomatska V.P., Dmitriev A.P., 2023a: Redox homeostasis of cereals during acclimation to drought. – Theoretical and Experimental Plant Physiology, 35(2): 133–168. <https://doi.org/10.1007/s40626-023-00271-7>
- Kolupaev Y.E., Yastreb T.O., Ryabchun N.I., Yemets A.I., Dmitriev O.P., Blume Y.B., 2023b: Cellular mechanisms of the formation of plant adaptive responses to high temperatures. – Cytology and Genetics, 57(1): 55–75. <https://doi.org/10.3103/S0095452723010048>
- Kolupaev Yu.E., Shkliarevskiy M.A., Taraban D.A., Shakhov I.V., Oboznyi A.I., Yastreb T.O., 2026: Meta-analysis of the protective effect of trehalose on *Triticum aestivum* under drought and high-temperature stress. – Botanica, 32(2). In press.
- Kosar F., Akram N.A., Ashraf M., Ahmad A., Alyemeni M.N., Ahmad P., 2021: Impact of exogenously applied trehalose on leaf biochemistry, achene yield and oil composition of sunflower under drought stress. – Physiologia Plantarum, 172: 317–333. <https://doi.org/10.1111/ppl.13155>
- Kosar F., Akram N.A., Sadiq M., Al Qurainy F., Ashraf M., 2019: Trehalose: a key organic osmolyte effectively involved in plant abiotic stress tolerance. – Journal of Plant Growth Regulation, 38: 606–618. <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9876-x>
- Kosar F., Alshallash K.S., Akram N.A., Sadiq M., Ashraf M., Alkhalifah D.H.M., Abdel Latef A.A.H., Elkelish A., 2022: Trehalose-induced regulations in nutrient status and secondary metabolites of drought-stressed sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants. – Plants, 11: 2780. <https://doi.org/10.3390/plants11202780>
- Lal M.K., Tiwari R.K., Gahlaut V., Mangal V., Kumar A., Singh M.P., Paul V., Kumar S., Singh B., Zinta G., 2022: Physiological and molecular insights on wheat responses to heat stress. – Plant Cell Reports, 41(3): 501–518. <https://doi.org/10.1007/s00299-021-02784-4>
- Lei, Y., Chen, S., Xu, L., Zhang Y., Yang, Y. Enhancing plant drought tolerance through exogenous nitric oxide: a comprehensive meta-analysis. BMC Plant Biol 25, 447 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06491-0>
- Li Z.G., Luo L.J., Zhu L.P., 2014: Involvement of trehalose in hydrogen sulfide donor sodium hydrosulfide-induced the acquisition of heat tolerance in maize (*Zea mays* L.) seedlings. – Botanical Studies, 55: 20. <https://doi.org/10.1186/1999-3110-55-20>

- Li Y.-X., Ma L.-L., Zhang Y., Qin B.-Y., Zhang W.-J., Ma S.-Y., Huang Z.-L., Fan Y.-H., 2023b: Effects of exogenous trehalose on physiological characteristics and yield of wheat flag leaves under high temperature stress at grain filling stage. – *Acta Agronomica Sinica*, 49(8): 2210–2224. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2023.21057>
- Liu, X.; Gong, D.; Ke, Q.; Yin, L., Wang, S.; Gao, T. Meta-Analysis of the Effect of Nitric Oxide Application on Heavy Metal Stress Tolerance in Plants. *Plants* 2023, 12, 1494. <https://doi.org/10.3390/plants12071494>
- Luo Y., Gao Y.M., Wang W., Zou C.J., 2014: Application of trehalose ameliorates heat stress and promotes recovery of winter wheat seedlings. – *Biologia Plantarum*, 58: 395–398 <https://doi.org/10.1007/s10535-014-0397-6>
- Luo Y., Wang W., Fan Y.Z., Gao Y.M., Wang D., 2018: Exogenously-supplied trehalose provides better protection for D1 protein in winter wheat under heat stress. – *Russian Journal of Plant Physiology*, 65: 115–122. <https://doi.org/10.1134/S1021443718010168>
- Luo Y., Liu X.Y., Xue Y.J., Cao X., Liu J., Geng M., 2021: Respiration responses of wheat seedlings to treatment with trehalose under heat stress. – *Biologia Plantarum*, 65: 265–272. <https://doi.org/10.32615/bp.2021.025>
- Luo Y., Liu X., Li W., 2021a: Exogenously-supplied trehalose inhibits the growth of wheat seedlings under high temperature by affecting plant hormone levels and cell cycle processes. – *Plant Signaling & Behavior*, 16(6): 1907043. <https://doi.org/10.1080/15592324.2021.1907043>
- Luo Y., Wang Y., Xie Y., Gao Y., Li W., Lang S., 2022: Transcriptomic and metabolomic analyses of the effects of exogenous trehalose on heat tolerance in wheat. – *International Journal of Molecular Sciences*, 23: 5194. <https://doi.org/10.3390/ijms23095194>
- Ma C., Wang Z., Kong B., Lin T., 2013: Exogenous trehalose differentially modulates antioxidant defense system in wheat callus during water deficit and subsequent recovery. – *Journal of Plant Growth Regulation*, 70: 275–285. <https://doi.org/10.1007/s10725-013-9799-2>
- Mohsin S.M., Fardus J., Nagata A., Tamano N., Mitani H., Fujita M., 2022: Comparative study of trehalose and trehalose 6-phosphate to improve antioxidant defense mechanisms in wheat and mustard seedlings under salt and water deficit stresses. – *Stresses*, 2(3): 336–354. <https://doi.org/10.3390/stresses2030024>
- Muhammad I., Fahad S., Khalofah A., Zheng B., Shen W. 2025: Melatonin enhances antioxidant defense systems and stress tolerance in plants under variable environmental conditions. *Rice (New York)*, 18(1): 70. <https://doi.org/10.1186/s12284-025-00825-0>
- Muhammad I., Ullah F., Ahmad S., AlMunqedhi B.M., Al Farraj D.A., Elshikh M.S., Shen W., 2024: A meta-analysis of photosynthetic efficiency and stress mitigation by melatonin in enhancing wheat tolerance. – *BMC Plant Biology*, 24(1): 427. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05132-2>
- Muhammad I., Yang L., Ahmad S., Mosaad I.S.M., Al-Ghamdi A.A., Abbasi A.M., Zhou X.B. 2022: Melatonin application alleviates stress-induced photosynthetic inhibition and oxidative damage by regulating antioxidant defense system of maize: A meta-analysis. *Antioxidants*, 11(3): 512. <https://doi.org/10.3390/antiox11030512>
- Qaid E.A., 2020: Effect of exogenous trehalose on physiological responses of wheat plants under drought stress. – *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 16(4): 35–48.

- Raza A., 2021: Eco-physiological and biochemical responses of rapeseed (*Brassica napus* L.) to abiotic stresses: consequences and mitigation strategies. – *Journal of Plant Growth Regulation*, 40: 1368–1388.
- Raza A., Bhardwaj S., Atikur Rahman M., García-Caparrós P., Habib M., Saeed F., Charagh S., Foyer C.H., Siddique K.H.M., Varshney R.K., 2024: Trehalose: a sugar molecule involved in temperature stress management in plants. – *The Crop Journal*, 12(1): 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2023.09.010>
- Richards A., Krakowka S., Dexter L., Schmid H., Wolterbeek A., Waalkens-Berendsen D., Shigoyuki A., Kurimoto M., 2002: Trehalose: a review of properties, history of use and human tolerance, and results of multiple safety studies. – *Food and Chemical Toxicology*, 40(7): 871–898. [https://doi.org/10.1016/S0278-6915\(02\)00011-X](https://doi.org/10.1016/S0278-6915(02)00011-X)
- Sadak M.S., 2016: Mitigation of drought stress on Fenugreek plant by foliar application of trehalose. – *International Journal of ChemTech Research*, 9: 147–155.
- Sun Y., Wang C., Chen H.Y.H., Ruan H., 2020: Response of plants to water stress: a meta-analysis. – *Frontiers in Plant Science*, 11: 978. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00978>
- Tahjib-Ul-Arif M, Wei X, Jahan I, Hasanuzzaman M, Sabuj ZH, Zulficar F, Chen J, Iqbal R, Dastogeer KMG, Sohag AAM, Tonny SH, Hamid I, Al-Ashkar I, Mirzapour M, El Sabagh A., Murata Y., 2022: Exogenous nitric oxide promotes salinity tolerance in plants: A meta-analysis. *Front. Plant Sci.* 13:957735. doi: 10.3389/fpls.2022.957735
- Viechtbauer W., 2005: Bias and efficiency of meta-analytic variance estimators in the random-effects model. – *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 30(3): 261–293. <https://doi.org/10.3102/10769986030003261>
- Viechtbauer W., 2010: Conducting meta-analyses in R with the metafor package. – *Journal of Statistical Software*, 36(3): 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v036.i03>
- Wang Y., Gun S., Li Y., Qu L., 2022: Meta-Analysis of effects of melatonin treatment on plant drought stress alleviation. – *Agriculture*, 12(9): 1335. <https://doi.org/10.3390/agriculture12091335>
- Wang, J. Y., Xiong, Y. C., Li, F. M., Siddique, K. H., Turner, N. C., 2017: Effects of drought stress on morphophysiological traits, biochemical characteristics, yield, and yield components in different ploidy wheat: A meta-analysis. *Advances in agronomy*, 143, 139-173. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.01.002>

## ДОДАТКИ

### Інформаційна база даних щодо впливу трегалози на інтегральні показники стресостійкості та функціонування антиоксидантної та осмопротекторної систем пшениці

#### Додаток 1

Вплив трегалози на інтегральні фізіологічні показники пшениці (Kolupaev et al., 2026)

Indicator	Reference	Phase	Variant	Stress type	n control	Value control	SE control	n trehalose	Value trehalose	SE trehalose
Growth	Qaid et al., 2020	vegetative	non-stress		3	643.67	20.11	3	635.66	22.33
		vegetative	non-stress		3	757.37	22.96	3	814.70	23.04
		vegetative	non-stress		3	67.00	2.40	3	65.95	2.21
		vegetative	non-stress		3	76.80	1.95	3	79.87	1.99
		vegetative	non-stress		3	14.20	0.78	3	14.63	0.40
		vegetative	non-stress		3	18.11	0.14	3	18.87	0.30
		vegetative	stress	drought	3	501.00	17.96	3	559.89	16.16
		vegetative	stress	drought	3	555.90	23.56	3	642.93	25.65
		vegetative	stress	drought	3	53.38	2.19	3	59.80	1.48
		vegetative	stress	drought	3	57.42	2.82	3	66.17	3.15
		vegetative	stress	drought	3	11.09	0.32	3	12.72	0.56
		vegetative	stress	drought	3	12.27	0.37	3	14.62	0.51
	Heshmat et al., 2018a	generative	non-stress		10	4.42	0.287	10	4.49	0.184
		generative	non-stress		10	2.95	0.403	10	3.53	0.169
		generative	non-stress		10	2.00	0.137	10	2.09	0.112
		generative	non-stress		10	1.54	0.09	10	1.82	0.125
		generative	non-stress		10	10.90	0.112	10	11.14	0.157
		generative	non-stress		10	10.10	0.112	10	10.44	0.189
		generative	stress	drought	10	2.59	0.173	10	3.49	0.134
		generative	stress	drought	10	1.89	0.025	10	2.19	0.313
generative		stress	drought	10	0.476	0.094	10	1.41	0.088	
generative		stress	drought	10	0.87	0.142	10	0.996	0.153	
Ma et al., 2013	vegetative	non-stress		6	10.4	0.15	6	10.6	0.20	
	vegetative	non-stress		6	10.4	0.15	6	10.6	0.20	

		vegetative	non-stress		6	10.9	0.2	6	12.0	0.1
		vegetative	non-stress		6	12.6	0.2	6	12.2	0.2
		vegetative	stress	drought	6	7.53	0.10	6	8.48	0.10
		vegetative	stress	drought	6	7.21	0.3	6	9.23	0.4
		vegetative	stress	drought	6	7.95	0.3	6	10.5	0.1
	Ahmed et al., 2016	vegetative	non-stress		3	52.17	1.89	3	55.77	1.02
		vegetative	non-stress		3	14.92	0.51	3	14.35	0.58
		vegetative	non-stress		3	20.81	0.39	3	19.92	0.55
		vegetative	stress	drought	3	34.57	1.11	3	39.25	1.50
		vegetative	stress	drought	3	9.18	0.37	3	11.97	0.39
		vegetative	stress	drought	3	12.43	0.76	3	15.53	0.85
	Li et al., 2023b	generative	stress	heat	3	15.4	0.0	3	16.3	0.1
		generative	stress	heat	3	5.28	0.1	3	6.65	0.15
		generative	stress	heat	3	17.2	0.1	3	19.0	0.2
		generative	stress	heat	3	8.25	0.15	3	11.0	0.15
	Luo et al., 2014	vegetative	non-stress		3	0.22	0.01	3	0.22	0.01
		vegetative	stress	heat	3	0.23	0.02	3	0.22	0.02
	Luo et al., 2021a	vegetative	non-stress		3	0.55	0.25	3	0.79	0.3
		vegetative	non-stress		3	12.9	2.5	3	11.2	2.7
		vegetative	stress	heat	3	0.67	0.2	3	0.23	0.22
		vegetative	stress	heat	3	12.5	0.7	3	9.2	1.0
Relative water content	Qaid, 2020	vegetative	non-stress		3	90.75	1.11	3	93.26	2.18
		vegetative	non-stress		3	89.67	1.67	3	92.54	5.71
		vegetative	stress	drought	3	77.07	4.28	3	84.25	0.66
		vegetative	stress	drought	3	68.92	0.78	3	78.8	0.95
	Heshmat et al., 2018a	generative	non-stress		3	88.28	0.2	3	88.73	0.2
		generative	non-stress		3	90.99	0.2	3	92.12	0.2
		generative	stress	drought	3	74.77	0.2	3	80.18	0.2
		generative	stress	drought	3	80.63	0.2	3	83.78	0.2
	Luo et al., 2014	vegetative	non-stress		3	86.92	0.25	3	86.98	0.69
	Chlorophyll content	Mohsin et al., 2022	vegetative	non-stress		3	14.2	0.26	3	12.26
		vegetative	stress	drought	3	8.67	0.37	3	9.96	0.4
Ahmed et al., 2016		vegetative	non-stress		3	1.43	0.04	3	1.49	0.03
		vegetative	stress	drought	3	1.06	0.04	3	1.31	0.05
Li et al., 2023b		generative	stress	heat	3	44.01	0.37	3	47.82	0.41
		generative	stress	heat	3	38.95	0.5	3	43.26	0.75
		generative	stress	heat	3	43.88	0.51	3	47.48	0.45

		generative	stress	heat	3	39.94	0.55	3	43.18	0.8
	Luo et al, 2014	vegetative	non-stress		5	2.41	0.01	5	2.31	0.04
		vegetative	stress	heat	5	2.26	0.01	5	2.27	0.02

Тут і у додатках 2-4: n – кількість досліджень; SE – стандартне відхилення.

## Додаток 2

Вплив трегалози на показники окиснювального стресу у пшениці (Kolupaev et al., 2026)

Indicator	Reference	Phase	Variant	Stress type	n control	Value control	SE control	n trehalose	Value trehalose	SE trehalose
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> content	Ma et al., 2013	vegetative	non-stress		6	9.92	0.1	6	11.5	0.1
		vegetative	non-stress		6	10.4	0.1	6	11.8	0.1
		vegetative	non-stress		6	10.2	0.2	6	12.2	0.2
		vegetative	stress	drought	6	13.8	0.2	6	13.1	0.1
		vegetative	stress	drought	6	16	0.5	6	15	0.1
		vegetative	stress	drought	6	14.4	0.2	6	13.1	0.2
	Mohsin et al., 2022	vegetative	non-stress		3	255	3	3	283	5
		vegetative	stress	drought	3	416	10	3	383	3
	Luo et al., 2018	vegetative	non-stress		5	109	10	5	169	1
Malondialdehyde content	Qaid, 2020	vegetative	non-stress		3	2.75	0.12	3	2.5	0.1
		vegetative	non-stress		3	3.08	0.12	3	3.15	0.1
		vegetative	stress	drought	3	3.62	0.15	3	3.21	0.15
		vegetative	stress	drought	3	4.29	0.15	3	3.61	0.15
	Ahsan et al., 2024	vegetative	stress	drought	3	12.6	0.5	3	10	0.5
		vegetative	stress	drought	3	14	0.5	3	11.1	0.5
		vegetative	stress	drought	3	15.9	0.5	3	12.6	0.5
		vegetative	stress	drought	3	19	0.5	3	16.7	0.5
		vegetative	stress	drought	3	22.9	0.5	3	20	0.5
		vegetative	stress	drought	3	25.9	0.5	3	23.4	0.5
	Aldesuquy, Ghanem, 2015	generative	non-stress		3	0.51	0.07	3	0.46	0.01
		generative	non-stress		3	0.89	0.07	3	0.58	0.07
		generative	stress	drought	3	0.56	0.07	3	0.52	0.07
		generative	stress	drought	3	0.98	0.07	3	0.62	0.07
	Ma et al., 2013	vegetative	non-stress		6	11.8	0.75	6	15.2	0.75
		vegetative	non-stress		6	14.1	0.75	6	18.8	0.75
		vegetative	non-stress		6	16.9	0.75	6	19.6	0.75

		vegetative	stress	drought	6	30.1	0.75	6	22.2	0.75
		vegetative	stress	drought	6	39.7	0.75	6	27.4	0.75
		vegetative	stress	drought	6	35.7	0.75	6	22.4	0.75
	Mohsin et al., 2022	vegetative	non-stress		3	36.8	2	3	40.6	2
		vegetative	stress	drought	3	64.8	2	3	54.6	1
	Ahmed et al., 2016	vegetative	non-stress		3	2.6	0.02	3	2.7	0.02
		vegetative	non-stress		3	3.4	0.02	3	3.3	0.02
		vegetative	stress	drought	3	3.5	0.04	3	3.1	0.02
		vegetative	stress	drought	3	4	0.02	3	3.7	0.02
	Li et al., 2023b	generative	stress	heat	3	25.4	0.1	3	22	0.7
		generative	stress	heat	3	38.7	0.7	3	34.4	0.2
		generative	stress	heat	3	20.5	0.7	3	18	0.4
		generative	stress	heat	3	32.5	0.7	3	29	0.5
	Luo et al., 2018	vegetative	non-stress		5	4.6	0.1	5	4.8	0.7
		vegetative	stress	heat	5	7	0.1	5	5.9	0.1
	Luo et al., 2021a	vegetative	non-stress		3	2.95	1	3	2.1	0.2
		vegetative	non-stress		3	2	0.1	3	2.4	0.1
		vegetative	stress	heat	3	5.1	1.74	3	3.7	0.73
		vegetative	stress	heat	3	2.5	0.5	3	1.8	0.3
Electrolyte leakage	Qaid, 2020	vegetative	non-stress		3	31.06	1.31	3	31.13	0.61
		vegetative	non-stress		3	37.12	2.78	3	35.97	1.24
		vegetative	stress	drought	3	42.43	2.08	3	34.03	0.66
		vegetative	stress	drought	3	59.21	1.02	3	42.74	0.59
	Aldesuqu, Ghanem, 2015	generative	non-stress		3	27.27	0.81	3	22.62	0.66
		generative	non-stress		3	23.48	0.81	3	17.82	0.86
		generative	stress	drought	3	35.65	0.71	3	30.5	0.81
		generative	stress	drought	3	25.2	0.86	3	23.82	0.87
	Ahmed et al., 2016	vegetative	non-stress		3	34.54	1.59	3	32.04	0.57
		vegetative	non-stress		3	38.63	0.68	3	35.68	1.59
		vegetative	stress	drought	3	54.77	0.68	3	44.54	1.02
		vegetative	stress	drought	3	49.09	1.13	3	42.95	1.59
	Luo et al., 2022	vegetative	non-stress		3	12.88	1.43	3	8.58	0.43
		vegetative	non-stress		3	8.3	1.57	3	8.58	1.15
		vegetative	stress	heat	3	59.53	3.15	3	49.8	3.43
		vegetative	stress	heat	3	52.95	2.57	3	43.79	2.86

### Додаток 3

Вплив трегалози на активність антиоксидантних ферментів у пшениці (Kolupaev et al., 2026)

Indicator	Reference	Phase	Variant	Stress type	n control	Value control	SE control	n trehalose	Value trehalose	SE trehalose	
Superoxide dismutase activity	Ma et al., 2013	vegetative	non-stress		6	18.6	0.15	6	18.67	0.19	
		vegetative	non-stress		6	18.86	0.3	6	18.89	0.37	
		vegetative	non-stress		6	19.16	0.15	6	19.05	0.09	
		vegetative	stress	drought	6	20.56	0.19	6	20.87	0.26	
		vegetative	stress	drought	6	17.34	0.5	6	18.4	0.54	
		vegetative	stress	drought	6	17.72	0.69	6	18.67	0.19	
	Mohsin et al., 2022	vegetative	non-stress		3	3.78	0.44	3	4.18	0.29	
		vegetative	stress	drought	3	18.38	0.99	3	13.36	0.87	
	Li et al., 2023b	generative	stress	heat	3	199	2.53	3	229	2.88	
		generative	stress	heat	3	181.66	2.17	3	205.15	2.16	
		generative	stress	heat	3	214.54	2.17	3	241.27	2.17	
		generative	stress	heat	3	196.48	2.12	3	219.6	2.89	
	Luo et al., 2018	vegetative	non-stress		5	62.65	0.2	5	57.82	4.3	
		vegetative	stress	heat	5	60.97	1.89	5	60.13	2.62	
	Guaiacol peroxidase activity	Qaid, 2020	vegetative	non-stress		3	0.092	0.001	3	0.097	0.001
			vegetative	non-stress		3	0.087	0.003	3	0.103	0.001
vegetative			stress	drought	3	0.131	0.004	3	0.115	0.001	
vegetative			stress	drought	3	0.125	0.005	3	0.12	0.006	
Ma et al., 2013		vegetative	non-stress		6	8.48	0.2	6	6.47	0.26	
		vegetative	non-stress		6	8.52	0.31	6	6.12	0.31	
		vegetative	non-stress		6	8.6	0.3	6	5.69	0.31	
		vegetative	stress	drought	6	9.47	0.31	6	8	0.18	
		vegetative	stress	drought	6	10.7	0.35	6	8.32	0.39	
		vegetative	stress	drought	6	9.81	0.32	6	7.64	0.24	
Mohsin et al., 2022		vegetative	non-stress		3	0.56	0.02	3	0.5	0.02	
		vegetative	stress	drought	3	0.23	0.02	3	0.03	0.01	
Ahmed et al., 2016		vegetative	non-stress		3	0.065	0.002	3	0.088	0.003	
		vegetative	non-stress		3	0.114	0.004	3	0.12	0.004	
		vegetative	stress	drought	3	0.163	0.002	3	0.073	0.002	
		vegetative	stress	drought	3	0.256	0.009	3	0.187	0.002	
		generative	stress	heat	3	119.25	1.49	3	136.85	1.66	

	Li et al., 2023b	generative	stress	heat	3	100.37	2.03	3	112.4	3.34
		generative	stress	heat	3	136.11	1.29	3	151.48	1.85
		generative	stress	heat	3	107.22	0.92	3	118.14	1.48
	Luo et al., 2018	vegetative	non-stress		5	8.79	0.27	5	8.46	0.75
		vegetative	stress	heat	5	8.46	0.81	5	8.79	0.27
Catalase activity	Qaid, 2020	vegetative	non-stress		3	0.78	0.02	3	0.76	0.02
		vegetative	non-stress		3	0.82	0.02	3	1.03	0.07
		vegetative	stress	drought	3	0.42	0.01	3	0.64	0.01
		vegetative	stress	drought	3	0.18	0.01	3	0.47	0.02
	Ma et al., 2013	vegetative	non-stress		6	0.342	0.007	6	0.304	0.008
		vegetative	non-stress		6	0.336	0.008	6	0.293	0.007
		vegetative	non-stress		6	0.338	0.006	6	0.283	0.01
		vegetative	stress	drought	6	0.365	0.009	6	0.328	0.008
		vegetative	stress	drought	6	0.392	0.005	6	0.346	0.009
		vegetative	stress	drought	6	0.374	0.004	6	0.336	0.01
	Mohsin et al., 2022	vegetative	non-stress		3	383	11	3	350	16
		vegetative	stress	drought	3	217	10	3	256	11
	Ahmed et al., 2016	vegetative	non-stress		3	0.74	0.024	3	0.84	0.011
		vegetative	non-stress		3	1.055	0.066	3	0.892	0.014
		vegetative	stress	drought	3	0.204	0.016	3	0.53	0.016
		vegetative	stress	drought	3	0.653	0.016	3	0.672	0.016
	Li et al., 2023b	generative	stress	heat	3	24.96	0.58	3	28.53	0.29
		generative	stress	heat	3	17.92	0.29	3	19.95	0.48
		generative	stress	heat	3	35.56	0.97	3	40.48	0.67
		generative	stress	heat	3	22.55	23.32	3	25.06	0.38
	Luo et al., 2018	vegetative	non-stress		5	22.07	3.25	5	22.53	3.05
vegetative		stress	heat	5	19.48	3.11	5	30.13	1.68	
Glutathione reductase activity	Ma et al., 2013	vegetative	non-stress		6	0.11	0.002	6	0.115	0.002
		vegetative	non-stress		6	0.104	0.004	6	0.12	0.003
		vegetative	non-stress		6	0.107	0.002	6	0.122	0.001
		vegetative	stress	drought	6	0.135	0.001	6	0.136	0.002
		vegetative	stress	drought	6	0.123	0.002	6	0.148	0.002
		vegetative	stress	drought	6	0.116	0.001	6	0.137	0.002
	Mohsin et al., 2022	vegetative	non-stress		3	0.286	0.008	3	0.233	0.009
		vegetative	stress	drought	3	0.099	0.006	3	0.126	0.006

**Додаток 4.**

**Вплив трегалози на вміст низькомолекулярних аніоксидантів та осмолітів (Kolupaev et al., 2026)**

Indicator	Reference	Phase	Variant	Stress type	n control	Value control	SE control	n trehalose	Value trehalose	SE trehalose
Ascorbate content	Ma et al., 2013	vegetative	non-stress		6	1.1	0.02	6	1.2	0.01
		vegetative	non-stress		6	1	0.05	6	1.2	0.01
		vegetative	non-stress		6	1	0.07	6	1.2	0.01
		vegetative	stress	drought	6	1.4	0.04	6	1.5	0.08
		vegetative	stress	drought	6	1.2	0.05	6	1.4	0.01
		vegetative	stress	drought	6	1.1	0.005	6	1.2	0.05
	Mohsin et al., 2022	vegetative	non-stress		3	3225	190	3	2992	140
		vegetative	stress	drought	3	1992	140	3	2060	160
Reduced glutathione content	Ahsan et al., 2024	vegetative	stress	drought	3	364.1	15	3	367.3	15
		vegetative	stress	drought	3	328.5	17	3	351.1	19
		vegetative	stress	drought	3	296.1	15	3	331.7	20
		vegetative	stress	drought	3	312.3	20	3	315.5	20
		vegetative	stress	drought	3	212	20	3	279.9	22
		vegetative	stress	drought	3	139.2	21	3	153.7	15
	Ma et al., 2013	vegetative	non-stress		6	672.8	10	6	706.3	10
		vegetative	non-stress		6	674.6	14	6	734.4	20
		vegetative	non-stress		6	667.5	18	6	732.7	18
		vegetative	stress	drought	6	560.1	10	6	611.2	10
		vegetative	stress	drought	6	472	20	6	567.1	14
		vegetative	stress	drought	6	581.2	18	6	685.1	10
	Mohsin et al., 2022	vegetative	non-stress		3	53.2	1.5	3	51.2	1
		vegetative	stress	drought	3	28.8	3	3	33	2
Proline content	Qaid, 2020	vegetative	non-stress		3	3	0.05	3	3.2	0.05
		vegetative	non-stress		3	3.8	0.05	3	3.6	0.05
		vegetative	stress	drought	3	6.2	0.05	3	3.8	0.05
		vegetative	stress	drought	3	6.6	0.2	3	4.5	0.2
	Ahsan et al., 2024	vegetative	stress	drought	3	4.1	0.4	3	3.6	0.4
		vegetative	stress	drought	3	6.3	0.7	3	5.2	0.5
		vegetative	stress	drought	3	9.7	0.3	3	7.1	0.3
		vegetative	stress	drought	3	2.3	0.1	3	2	0.25
		vegetative	stress	drought	3	2.7	0.75	3	2.3	0.2
		vegetative	stress	drought	3	5.8	0.3	3	4.8	0.2

	Ahmed et al., 2016	vegetative	non-stress		3	1.7	0.05	3	1.8	0.05
		vegetative	non-stress		3	2.8	0.05	3	3.1	0.05
		vegetative	stress	drought	3	3.1	0.15	3	2.7	0.15
		vegetative	stress	drought	3	5.2	0.05	3	3.9	0.08
	Heshmat et al., 2018b	generative	non-stress		3	1.2	0.1	3	2.8	0.4
		generative	non-stress		3	2.5	0.6	3	4.7	0.1
		generative	stress	drought	3	1.9	0.1	3	2.9	0.1
		generative	stress	drought	3	5.9	0.6	3	6.5	0.2
Sugars content	Qaid, 2020	vegetative	non-stress		3	9.48	0.23	3	10.72	0.7
		vegetative	non-stress		3	14.11	0.31	3	15.31	0.35
		vegetative	stress	drought	3	8.67	0.14	3	9.76	0.13
		vegetative	stress	drought	3	12.28	0.28	3	14.39	0.14
	Heshmat et al., 2018b	generative	non-stress		3	35.1	0.5	3	36	0.3
		generative	non-stress		3	31.6	0.1	3	32	0.1
		generative	stress	drought	3	37.9	2	3	39.8	0.1
		generative	stress	drought	3	36.5	0.8	3	37.2	0.6
Zhang et al., 2022	vegetative	non-stress		3	26.03	0.08	3	88.7	0.14	

Notes: n – number of studies; SE – standard error.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	3
ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОВЕДЕННЯ МЕТА-АНАЛІЗУ СТРЕС-ПРОТЕКТОРНОГО ВПЛИВУ ТРЕГАЛОЗИ НА СТІЙКІСТЬ ПШЕНИЦІ ДО ОСМОТИЧНОГО І ТЕПЛОВОГО СТРЕСІВ .....	4
Методи пошуку і обробки даних .....	5
Результати аналізу даних .....	8
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ .....	15
ДОДАТКИ (Інформаційна база даних щодо впливу трегалози на інтегральні показники стресостійкості та функціонування антиоксидантної та осмопротекторної систем пшениці).....	19

МЕТА-АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ  
ВПЛИВУ ФІЗІОЛОГІЧНО АКТИВНИХ РЕЧОВИН  
НА СТІЙКІСТЬ РОСЛИН ДО СТРЕСОВИХ ЧИННИКІВ  
Науково-методичні рекомендації