

ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ НАСІННЯ МЕТАБОЛІЧНО АКТИВНИМИ РЕЧОВИНАМИ НА ФОРМУВАННЯ КОРЕНЕВОЇ СИСТЕМИ ТА ВОДНИЙ ПОТЕНЦІАЛ КОРЕНІВ ПРОРОСТКІВ ПШЕНИЦІ М'ЯКОЇ (*TRITICUM AESTIVUM* L.) ЗА УМОВ ВОДНОГО ДЕФІЦИТУ

Паливода Юлія Миколаївна

аспірантка

Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя, м. Ніжин, Чернігівська обл., Україна

ORCID: 0000-0001-6544-3441

yulia.palivoda@gmail.com

Гавій Валентина Миколаївна

кандидат біологічних наук, доцент

Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя, м. Ніжин, Чернігівська обл., Україна

ORCID: 0000-0002-2804-0456

gaviyv@gmail.com

Пшениця – одна з найважливіших сільськогосподарських культур у світі, виробництво якої є важливим для людства.

Несприятливі умови навколишнього середовища негативно впливають на фізіологічні процеси росту і розвитку пшениці та призводять до зниження урожайності. Одним із найгостріших екологічних факторів є водний дефіцит, спричинений посухою.

Рослини розвивають різні складні механізми стійкості та адаптації до водного дефіциту, включаючи фізіологічні реакції. Водний потенціал рослин підтримується на високому рівні за рахунок добре сформованої кореневої системи.

Питання щодо вивчення посухостійкості зернових культур, є актуальними, оскільки вони орієнтовані на вивчення реакцій рослин на водний стрес та впровадження методів підвищення стійкості рослин до посухи. Одним з таких методів є застосування метаболічно активних речовин.

*У статті наведено порівняльну характеристику впливу метаболічно активних речовин та їх комбінацій на механізми формування потужної кореневої системи та зниженню водного потенціалу коренів проростків пшениці м'якої (*Triticum aestivum* L.) в умовах водного дефіциту, змодельованого за допомогою ПЕГ 6000.*

*Встановлено, що попередня обробка насіння розчинами убіхінону – 10 та магній сульфату ($MgSO_4$), комбінаціями: вітамін E + метіонін + параоксибензойна кислота (ПОБК), вітамін E + метіонін + параоксибензойна кислота (ПОБК) + магній сульфат ($MgSO_4$) стимулювала розвиток кореневої системи на 16,9 %, 8,9 %, 14,2 % та 10,2 % відповідно, порівняно з насінням яке знаходилося в умовах водного дефіциту, змодельованого за допомогою ПЕГ 6000. За обробки насіння пшениці *T. aestivum* розчином вітаміну E та комбінацією вітамін E + метіонін + параоксибензойна кислота (ПОБК) + магній сульфат ($MgSO_4$) посилюють водозатримуючу здатність коренів в умовах уповільненого надходження води.*

Обробка насіння метаболічно активними речовинами сприяє підвищенню посухостійкості пшениці м'якої та може бути використана як елементи технології вирощування зернових культур в умовах водного дефіциту.

Ключові слова: метаболічно активні речовини, пшениця, ПЕГ 6000, ризогенез, лінійний ріст.

DOI <https://doi.org/10.32782/agrobio.2023.2.10>

Вступ. Пшениця займає чільне місце серед зернових культур у всьому світі і є головним продовольчим продуктом.

Україна є однією з країн лідерів у світовому виробництві пшениці. Посівні площі пшениці становлять більше 22% усіх посівних площ зернових (Khoroshun, 2023).

Нарощування виробництва пшениці в Україні є пріоритетним і не втрачає своєї актуальності. Несприятливі умови довкілля, що зумовлені глобальними змінами клімату, висувають надзвичайно важливе завдання перед аграріями – підвищення продуктивності пшениці. Одним із найгостріших екологічних факторів, який негативно впливає на фізіологічні та обмінні процеси в рослинах є водний дефіцит, спричинений посухою. Водний дефіцит — це нестача води у тканинах рослин, що виникає внаслідок її значної втрати при випаровуванні або недо-

статньому поглинанні з ґрунту і негативно впливає на їх метаболізм. (Oo et al., 2020).

Долаючи дефіцит води, рослини розвивають різні складні механізми стійкості та адаптації, включаючи фізіологічні реакції (Oguz et al., 2022; Zhuk, 2011).

Питання щодо вивчення механізмів посухостійкості пшениці м'якої актуальні, оскільки вони зосереджені на вивченні реакції рослин на дефіцит води та впровадженні методів підвищення посухостійкості рослин. Водний потенціал рослини може підтримуватися на високому рівні за рахунок збільшення поглинання води добре сформованими кореневими системами.

Згідно з дослідженням групи вчених з Єгипту, Пакистану та Саудівської Аравії (Seleiman et al., 2021) корінь є першим органом, який реагує на водний дефіцит. Рослини постійно отримують воду з поживними речо-

винами із ґрунту через корені, тому коренева система відіграє вирішальну роль у відповідь на стрес дефіциту води. Деякі рослини збільшують ріст коренів на ранній стадії стресу від посухи, щоб поглинати воду з глибоких горизонтів ґрунту (Chaichi et al., 2019). Завдяки такій розгалуженій кореневій системі та великій глибині вкорінення рослини здатні підтримувати вищий водний потенціал в умовах посухи, що забезпечує додаткові переваги для їхнього росту та розвитку. На глибину, об'єм і розподіл коренів в основному впливають глибина і діапазон вологості ґрунту (Bychkova & Khlebova, 2015).

Вчені світу досліджують різноманітні стратегії стійкості до посухи, серед яких застосування екзогенних регуляторів, хімікатів, синтетичних гормонів і сполук, які мають велике значення для підвищення стійкості до посухи на різних стадіях росту рослин (Moumita et al., 2019; Maltseva et al., 2011; Ansari et al., 2013; Jia et al., 2021; Ali et al., 2020).

Застосування біологічно активних речовин дозволяє повною мірою розкрити потенціал рослин, підвищити їх стійкість до різноманітних стресових факторів, збільшити врожайність (Zabolotna et al., 2021; Maltseva et al., 2011).

Використання природних антиоксидантів (аскорбінова та саліцилова кислоти, фітогормони, вітаміни, гумінові кислоти тощо) здатні індукувати стійкість до абіотичних стресорів у рослин. Гіберелінова кислота, стимулює ріст рослин і покращує фізіологічні параметри в умовах посухи, пом'якшуючи окиснювальні пошкодження, спричинені посухою. (Moumita et al., 2019). Обробка насіння саліциловою кислотою покращила енергію проростання та схожість жита *Secale montanum* Guss. у умовах уповільненого надходження води (Ansari et al., 2013).

На сьогодні актуальною є розробка найбільш ефективних та найменш шкідливих для довкілля індукторів стійкості рослин.

У галузі рослинництва часто використовують метаболічно активні речовини, що стимулюють фізіолого-біохімічні показники зернових та зернобобових культур (Kurylenko et al., 2021; Koziuchko & Navii, 2020).

Метою цієї роботи було дослідити вплив попередньої обробки насіння метаболічно активними речовинами на формування кореневої системи пшениці у змодельованих умовах посухи.

Матеріали і методи досліджень. У дослідженнях нами було використане насіння пшениці м'якої (*Triticum aestivum* L.) сорту Провінціалка, селекції Носівської селекційно-дослідної станції Миронівського інституту пшениці імені В.М. Ремесла НААН України. Цей сорт є одним із найбільш придатних для вирощування високоякісного продовольчого зерна в зоні Лісостепу та Полісся. Пшениця м'яка сорту Провінціалка характеризується високою посухостійкістю (6,6 – 8 балів) (Derzhavnyi reiestr sortiv roslyn, 2022). Дослідження проводили в навчально-науковій лабораторії з біохімічних та медико-валеологічних досліджень Ніжинського державного університету імені Миколи Гоголя. Для моделювання водного дефіциту використовували розчин

нейоногенного високомолекулярного полімеру поліетиленгліколю 6000 (ПЕГ 6000) концентрацією 12%. Дослідженнями (Jia et al., 2021) рекомендується використовувати саме таку концентрацію ПЕГ 6000 для оцінки на стійкість до посухи.

Визначення впливу метаболічно активних речовин на формування кореневої системи проростків пшениці м'якої (*T. aestivum*) за тривалої дії посухи проводилися в чашках Петрі. Попередньо насіння пшениці замочували на 3 години у розчинах досліджуваних метаболічно активних речовин та їх комбінацій. Дослідження передбачало використання таких варіантів:

1. Контроль (необроблене насіння + дистильована вода).
2. Обробка насіння розчином ПЕГ 6000 (12%).
3. Обробка насіння розчином вітаміну Е (10^{-8} М) – Е.
4. Обробка насіння розчином убіхінону-10 (10^{-8} М) – Q.
5. Обробка насіння розчином метіоніну (0,001%) – М.
6. Обробка насіння розчином параоксibenзойної кислоти (ПОБК) (0,001%) – П.
7. Обробка насіння розчином $MgSO_4$ (0,001%) – Mg.
8. Обробка насіння комбінацією речовин: вітамін Е (10^{-8} М) + убіхінон-10 (10^{-8} М) – EQ.
9. Обробка насіння комбінацією речовин: вітамін Е (10^{-8} М) + метіонін (0,001%) + ПОБК (0,001%) – ЕМП.
10. Обробка насіння комбінацією речовин: вітамін Е (10^{-8} М) + метіонін (0,001%) + ПОБК (0,001%) + $MgSO_4$ (0,001%) – ЕМПМg.

Зазначені концентрації метаболічно активних сполук виявили ефективність щодо впливу на фізіологічні показники росту і розвитку зернових, зернобобових і овочевих культур (Kurylenko et al., 2021; Koziuchko et al., 2020; Lisovytskyi & Kuchmenko, 2020). Повторність дослідів була чотирьохкратна.

Оброблене насіння переносили до чашок Петрі і заливали 20 мл 12% розчину ПЕГ 6000 і пророщували протягом 10 діб в термостаті при температурі 20°C. На 7 день визначали біометричні показники проростків, на 10 день – вміст води (ваговим методом) (Yeshchenko et al., 2014).

Статистичне опрацювання матеріалів проводили за допомогою методів математичної статистики, використовуючи стандартні вбудовані функції пакету спеціалізованого програмного забезпечення MS Office Excel – 2010.

Результати. Процеси росту і розвитку рослин значною мірою залежать від формування та діяльності кореневої системи, яка відіграє одну з вирішальних ролей у процесі постачання рослинам вологи та у мінеральному живленні рослини.

Одним із механізмів адаптивної реакції пшениці на низький вміст води є розвиток потужної кореневої системи. Добре розвинена коренева система рослин сприяє кращому поглинанню поживних речовин з глибоких шарів ґрунту.

Показники розвитку кореневої системи проростків насіння пшениці, попередньо замочене у розчинах метаболічно активних сполук в умовах уповільненого надходження води на розчині ПЕГ 6000 наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Фізіологічні показники розвитку кореневої системи проростків насіння пшениці м'якої (*T. aestivum*) сорту Провінціалка за умов водного дефіциту, змодельованого за допомогою ПЕГ 6000 за дії метаболічно активних речовин

Варіанти дослідів	Кількість коренів		Лінійний ріст коренів	
	шт.	% до контролю	см	% до контролю
Контроль	4,7±0,19	100,0	7,5±0,5#	100,0
ПЕГ 6000	4,5±0,18	95,1	6,1±0,3*	81,4
ПЕГ+Е	4,6±0,12	98,1	6,7±0,2#	89,0
ПЕГ+Q	4,7±0,12	99,4	8,8±0,2*#	116,9
ПЕГ+М	5,1±0,10*	108,5	6,9±0,2#	91,6
ПЕГ+П	4,6±0,13	97,2	7,6±0,3*#	100,7
ПЕГ+Mg	4,7±0,11	99,8	8,2±0,2*#	108,9
ПЕГ+EQ	4,9±0,06	105,1	7,5±0,2#	99,6
ПЕГ+ЕМП	4,8±0,08	102,1	8,6±0,2*#	114,2
ПЕГ+ЕМПМg	4,8±0,09	102,1	8,3±0,2*#	110,2

* Різниця достовірна у порівнянні з контролем ($p < 0,05$);

– достовірно у порівнянні з групою рослин, насіння яких пророщене в умовах уповільненого надходження води на розчині ПЕГ ($p < 0,05$)

Обробка насіння розчином М найбільш ефективно стимулювала коренеутворення проростків пшениці в умовах дефіциту води, досягаючи кількість в середньому 5,1 шт. на рослині.

Розчин Q найбільш ефективно стимулював лінійний ріст коренів за умов водного дефіциту, перевищуючи контрольний показник на 16,9%, нівелюючи інгібуючу дію ПЕГ. Ефективна стимуляція лінійного росту коренів проростків пшениці в умовах посухи також відмічена за використання розчину Mg та комбінацій ЕМП і ЕМПМg. Вони не тільки зменшили пригнічуючу дію ПЕГ, а й стимулювали лінійний ріст кореневої системи.

Важливою фізіологічною характеристикою, яка впливає на водний потенціал є відносний вміст води у тканинах рослини. Цей показник вважається маркером водного стану рослин, який регулює метаболічну активність у тканинах. У змодельованих умовах посухи у проростків пшениці спостерігали зневоднення тканин коренів. Метаболічно активні речовини посилюють водозатримуючі процеси коренів в умовах водного дефіциту на розчині ПЕГ 6000 (табл. 2).

В цілому вміст води у тканинах коренів був меншим у варіантах, які були пророщені на розчині ПЕГ. Замочування насіння в розчинах метаболічно активних речовин пом'якшує інгібуючий вплив змодельованої посухи.

Так, у варіанті ПЕГ вміст води у тканинах коренів у порівнянні з контролем зменшився на 21,9%. Вплив метаболічно активних речовин на вміст води у тканинах коренів *T. aestivum* показав, що найкращу ефективність має обробка насіння розчином Е та комбінацією ЕМПМg, перевищуючи показники рослин, насіння яких знаходилося в умовах посухи, на 11% та 11,5% відповідно. Висока ефективність була відмічена і за використання розчинів: П, Q та Mg.

Таблиця 2

Вміст води у тканинах коренів пшениці м'якої сорту «Провінціалка» в умовах посухи, змодельованої за допомогою ПЕГ 6000 за дії метаболічно активних речовин

Варіанти дослідів	Вміст води у тканинах коренів	
	%	% до контролю
Контроль	85,95±1,41	100
ПЕГ	67,09±1,39	78,1
ПЕГ+Е	76,7±0,89	89,1#
ПЕГ+Q	71,4±1,35	83,1#
ПЕГ+М	69,61±2,11	81,0#
ПЕГ+П	72,69±0,63	84,6#
ПЕГ+Mg	76,54±0,92	84,4#
ПЕГ+EQ	66,8±1,32	77,7
ПЕГ+ЕМП	68,9±2,24	80,2#
ПЕГ+ЕМПМg	77,03±0,43	89,6#

– Різниця достовірна у порівнянні з групою рослин, насіння яких пророщене в умовах уповільненого надходження води на розчині ПЕГ ($p < 0,05$)

Обговорення. Посухостійкість – складна інтегрована ознака, що контролюється не за окремими властивостями рослини, а цілісною системою організму і проявляється в його здатності витримувати значне зневоднення та перегрівання, зберігаючи за цих умов нормальний ріст, розвиток та відтворення. Стійкість рослин до посухи пов'язана з низкою процесів на морфологічному, фізіологічному та молекулярному рівнях (Aslam M. et al., 2015; Foyer & Noctor 2005; Orliuk & Usyk, 2005).

Для нормального росту і розвитку рослин необхідний баланс між надходженням та втратами води, тобто, щоб рослина зводила свій водний баланс без великого дефіциту. Для цього в рослині в процесі природного добору сформувалось пристосування до поглинання води – потужна коренева система. Не дивлячись на це пристосування, в рослині часто спостерігається водний дефіцит (Mashevska, 2015).

Вченими (Kolodka & Tverdokhlib, 2022; Moskalets & Rybalchenko, 2015) з'ясовано, що рослини мають морфологічні та анатомічні пристосування до збереження оптимальної обводненості тканин при сухості повітря та ґрунту. Вони здійснюють це трьома основними напрямками:

1. Підвищене поглинання ґрунтової води завдяки збільшенню потужності кореневої системи і зниженому водному потенціалу коренів.

2. Ксеноморфна будова листків для регулювання втрати води (невелика площа листової поверхні при високому вмісті фотосинтетичних пігментів).

3. Накопичення та активація транспорту води.

В результаті проведених нами досліджень встановлено, що під час водного дефіциту, змодельованого за допомогою ПЕГ-6000, пшениця використовує один із механізмів посухостійкості, а саме розвиток потужної кореневої системи. Рослини пшениці з більш розвинутою кореневою системою мають більший вміст води в органах, характеризуються водопоглинаючою і водозатримуючою здатністю (Orliuk & Usyk, 2005).

Якщо порівняти показники лінійного росту коренів проростків пшениці, насіння яких було попередньо оброблено метаболічно активними речовинами, з показниками проростків, вирощених із насіння в умовах імітації посухи (ПЕГ), з'ясовано, що метаболічно активні речовини сприяють росту коренів в умовах посухи (табл. 1). Найбільш ефективно стимулює лінійний ріст коренів в умовах водного дефіциту розчин Q. Це може бути обумовлене тим, що Q має антиоксидантну дію і захищає мембрани клітин від руйнівного впливу активних форм кисню, що накопичуються в умовах водного дефіциту (Liu, M. & Lu, S., 2016). Висока ефективність щодо стимулювання лінійного росту коренів проростків пшениці в умовах посухи була відмічена також при використанні таких комбінацій метаболічно активних речовин: ЕМП і ЕМПМg, а також розчину Mg. Ефективність використаних комбінацій метаболічно активних сполук можна пояснити тим, що вітамін Е є антиоксидантом, впливає на мембранопроникність та збільшує поглинання поживних речовин, що є важливим в умовах посухи (Szabados & Savoure, 2010). ПОБК регулює активність комплексу антиоксидантних ферментів та виконує в клітині функцію сигнальних молекул при формуванні захисних реакцій (Barkosky & Einhellig, 2003). Метіонін відіграє важливу роль у життєдіяльності рослин як амінокислота, що має рістстимулюючий компонент і є готовим запасом речовин, необхідних для перебігу біологічних процесів. Метіонін стимулює коренеутворення, адже завдяки збільшенню кількості корневих волосків зростає її поглинальна здатність (Avhustynovych & Chumak, 2018). $MgSO_4$ – це джерело іонів Mg^{2+} , що підтримують осмотичний потенціал клітин. Він позитивно впливає на засвоєння фосфору та його переміщення рослиною, процеси дихання, перетворення мінерального азоту на білкові сполуки. Також, він активує більшість ферментів та бере участь у формуванні пектинових речовин стінок клітин (Abid et al., 2008). Метаболічно активні речовини, з яких складаються комбінації, підсилюють дію один одного та найефективніше стимулюють процес формування потужної кореневої системи.

Потужна коренева система дає можливість витримувати тривалий водний дефіцит. Завдяки розгалуженій кореневій системі та глибині вкорінення підтримується вищий водний баланс, що забезпечує додаткові переваги для росту та розвитку пшениці м'якої сорту Провінціалка.

У рослинних організмів є декілька адаптивних стратегій, за допомогою яких вдається пережити засушливі періоди і одним із них є накопичення води, підтримуючи таким чином необхідну міру гідратації своїх клітин і орга-

нів (Zaimenko et al., 2013). Особлива роль води, як розчинника речовин і засобу стабілізації температури рослинного організму.

У ході дослідження впливу метаболічно активних речовин на вміст води в проростках пшениці м'якої (*T. aestivum*) було з'ясовано, що вміст води у тканинах кореня були меншими у варіантах, що пророщувалися на розчині ПЕГ 6000, тобто в умовах уповільненого надходження води. Попереднє замочування насіння в розчинах метаболічно активних речовин пом'якшує інгібуючий вплив змодельованого водного дефіциту на корені рослин. У порівнянні з варіантом ПЕГ найвищі показники вмісту води у тканинах кореня мали проростки, насіння, яких оброблене розчином Е та комбінацією ЕМПМg.

Високі показники вмісту води у тканинах кореня в умовах водного стресу, підтверджуються результатами попередніх наших досліджень, де обробка насіння розчинами метаболічно активних сполук стимулювала приріст сирової маси підземних органів пшениці м'якої сорту Провінціалка в умовах водного дефіциту (Palyvoda et al., 2021).

Таким чином, рослини здатні підтримувати нормальні фізіологічні процеси в умовах легкого або помірного стресу від посухи шляхом розвитку потужної кореневої системи. Попередня обробка насіння метаболічно активними речовинами пшениці м'якої (*T. aestivum* L.) стимулювала процес формування кореневої системи.

Висновки.

1. Використання метаболічно активних речовин в умовах водного дефіциту оптимізувало формування кореневої системи пшениці сорту Провінціалка.

2. Обробка насіння розчинами Q та Mg, комбінаціями: ЕМП, ЕМПМg, стимулювала розвиток кореневої системи, що свідчить про індукцію адаптивних морфологічних змін у проростків пшениці в умовах посухи.

3. Досліджувані комбінації метаболічно активних речовин стимулювали накопичення вмісту води у тканинах коренів. Високі показники були встановлені при обробці насіння комбінацією ЕМПМg.

4. Обробка насіння метаболічно активними речовинами сприяє посиленню поглинання води з ґрунту завдяки збільшенню потужності кореневої системи та зниженню водного балансу коренів, що забезпечує підвищення посухостійкості пшениці м'якої, тому, подальше вивчення їх впливу на зернові культури в умовах посухи є перспективним напрямком досліджень.

5. Попередня обробка насіння метаболічно активними речовинами може бути використана як елементи технології за вирощування зернових культур в умовах водного дефіциту.

Бібліографічні посилання:

1. Abid M., Haddad M. & Ferchichi A. (2008) Effect of magnesium sulphate on the first stage of development of Lucerne. *Options Méditerranéennes: Série A*, 79. 405–408
2. Ali, Q., Javed, M., Haider, M., Habib, N., Rizwan, M., Perveen, R., Ali, S., Alyemeni, M., El-Serehy, H. & Al-Misned, F. (2020) α -Tocopherol foliar spray and translocation mediates growth, photosynthetic pigments, nutrient uptake, and oxidative defense in Maize (*Zea mays* L.) under drought stress. *Agronomy*, 10 (9), 1235 doi: 10.3390/agronomy10091235
3. Ansari O., Azadi M., Sharif-Zadeh F. & Younesi E. (2013) Effect of hormone priming on germination characteristics and enzyme activity of Mountain rye (*Secale montanum*) seeds under drought stress conditions. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 9, 3. 61–71

4. Aslam M., Maqbool M.A. & Cengiz R. (2015). Drought Stress in Maize (*Zea mays* L.). SpringerBriefs in Agriculture . DOI:10.1007/978-3-319-25442-5_3.
5. Avhustynovych M. & Chumak A. (2018) Aminokysloty: mif chy realnist [Amino acids: myth or reality]. *Propozytsiia: Holovnyi zhurnal z pytan ahrobiznesu*. 12 (in Ukrainian).
6. Barkosky, R.R. & Einhellig, F.A. (2003) Allelopathic interference of plant water relationships by para-hydroxybenzoic acid. *Botanical Bulletin of Academia Sinica.*, 44, 53–58
7. Bychkova O. & Khlebova L. (2015) Physiological assessment of drought resistance in spring Durum wheat. *Acta Biologica Sibirica*, 1(1-2), 107–117. (in English). doi:10.14258/abs.v1i1-2.853
8. Chaichi M., Sanjarian F., Razavi K. & Gonzalez-Hernandez J. L. (2019) Analysis of transcriptional responses in root tissue of bread wheat landrace (*Triticum aestivum* L.) reveals drought avoidance mechanisms under water scarcity. *PLoS one*, 14(3) doi: 10.1371/journal.pone.0212671
9. Derzhavnyi reiestr sortiv roslyn, prydatnykh dlia poshyrennia v Ukraini na 2022 rik [State register of plant varieties suitable for dissemination in Ukraine] (2022) (Chynnyi vid 2022-09-08). Vyd. ofits. Kyiv. 526 (in Ukrainian).
10. Foyer C.H. & Noctor G. (2005). Redox homeostasis and antioxidant signaling: a metabolic interface between stress perception and physiological responses. *Plant Cell*. 2005. 17(7). P. 1866–1875. doi: 10.1105/tpc.105.033589
11. Jia, P., Melnyk, A., Zhang, Z., Butenko, S. & Kolosok, V. (2021). Effects of seed pre-treatment with plant growth compound regulators on seedling growth under drought stress. *Agraarteadus*, 32(2), 251–256 doi:10.15159/jas.21.35
12. Khoroshun V. (2023). TOP-10 krain vyrobnykiv pshenytsi v 2022/23 MR. Latifundist.com. (data zvernennia 12 chervnia 2023) <https://latifundist.com/rating/top-10-krayin-virobnikiv-pshenytsi-v-2022-23-mr>
13. Kolodka A. & Tverdokhlib O. (2022) Mekhanizm posukhostiikosti u Roslyn [Mechanism of drought resistance in plants]. V mizhnarodna konferentsiia molodykh uchenykh: Kharkivskiy pryrodnychiy forum (19-20 travnia 2022 r., m. Kharkiv): zbirnyk tez. Kharkiv: KhNPU imeni H. S. Skovorody, 50–54 (in Ukrainian).
14. Koziuchko, A. & Havii, V. (2020) Efektyvnist vplyvu peredposivnoi obrobky nasinnia metabolichno aktyvnymy rehovynamy ta rehuliatorom rostu roslyn «Vympel» na asimiliatsiini protsesy soi sortu Annushka u fazi tsvitinnia Roslyn [The effectiveness of the influence of pre-sowing treatment of seeds with metabolically active substances and plant growth regulator "Vympel" on the assimilation processes of Annushka soybeans in the flowering phase of plants]. *Zbirnyk naukovykh prats AOHOS*, 2. 82–85 (in Ukrainian).
15. Koziuchko, A.H., Havii, V.M. & Kuchmenko, O.B. (2020) Vplyv peredposivnoi obrobky nasinnia metabolichno aktyvnymy rehovynamy na okremi fiziolohichni pokaznyky soi sortu Annushka ta yii produktyvnist [The effect of pre-sowing treatment of seeds with metabolically active substances on certain physiological indicators of Annushka soybean and its productivity]. *Naukovi zapysky Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Ser. Biolohiia. Ternopil: TNPU im. V. Hnatiuka*, 1–2 (79), 84–90 (in Ukrainian). doi: 10.25128/2078-2357.20.1-2.12
16. Kurylenko, A., Kurylenko, O., Kuchmenko O. & Havii V. (2021) Vplyv peredposivnoi obrobky nasinnia kompozytsiiami metabolichno aktyvnykh rehovyn na morfometrychni pokaznyky ozymoho zhyta v umovakh pivdnia Polissia Ukrainy. [Influence of presowing treatment of seeds with compositions of metabolically active substances on morphometric indexes of winter rye]. *Visnyk Sum'skoho natsionalnoho ahrarynoho universytetu. Seriya: «Ahronomiia i biolohiia»*. 4(46). 25–32. (in Ukrainian). doi: 10.32845/agrobio.2021.4.4.
17. Lisovytskyi V., & Kuchmenko O. (2020) Vplyv metabolichno-aktyvnykh rehovyn na okremi fizioloho-biokhimichni pokaznyky rostu i rozvytku ohirktiv sortu Nizhynskiyi. *Naukovi zapysky NaUKMA. Biolohiia i ekolohiia*. 3. 35–42 (in Ukrainian). doi:10.18523/2617-4529.2020.3.35-42
18. Liu, M. & Lu, S. (2016) Plastoquinone and ubiquinone in plants: Biosynthesis, physiological function and metabolic engineering. *Front Plant Sci.*, 7, 1898 (in English). doi:10.3389/fpls.2016.01898
19. Maltseva, N.M., Haievskiy, A.P. & Derevianko, K.Iu. (2011) Vplyv biolohichno aktyvnykh rehovyn ta yikh kompozytsii na vmist fotosyntetychnykh pihmentiv u lystkakh ozymoi pshenytsi v umovakh defitsytu fosforu [The influence of biologically active substances and their compositions on the content of photosynthetic pigments in winter wheat leaves under conditions of phosphorus deficiency]. *Fyzyolohiia y byokhymiya kult. roslyn*, 43(5), 403–411 (in Ukrainian).
20. Mashevska A. (2015) Fiziolohiia ta biokhimiia roslyn: Materialy dlia opratsiuvannia temy «Vodnyi rezhym roslyn» z kursu «Fiziolohiia ta biokhimiia roslyn» [Physiology and biochemistry of plants materials for processing the topic "water regime of plants" from the course "Physiology and biochemistry of plants"]. Lutsk : Vezha-Druk. 40. (in Ukrainian)
21. Moskalets T. & Rybalchenko V. (2015) Morfo-fiziolohichni ta molekuliarno-henetychni oznaky kseromorfnosti *Triticum aestivum* L. [Morpho-physiological and molecular-genetic characters xeromorphs of *Triticum aestivum* L.]. *Naukovyi visnyk Chernivetskoho universytetu. Biolohiia (Biolohichni systemy)*. 7 (1), 45–52 (in Ukrainian).
22. Mounita, Mahmud J., Biswas P., Nahar K., Fujita M. & Hasanuzzaman M. (2019) Exogenous application of gibberellic acid mitigates drought-induced damage in spring wheat. *Acta Agrobotanica*. 72(2), 1776 doi:10.5586/aa.1776
23. Oguz, M., Aycan, M., Oguz, E., Poyraz, I. & Yildiz, M. (2022) Drought stress tolerance in plants: Interplay of molecular, biochemical and physiological responses in important development stages. *Physiologia*. 2, 180–197 doi:10.3390/physiologia2040015
24. Oo, A.T., van Huylbroeck, G. & Speelman, S. (2020) Measuring the economic impact of climate change on crop production in the dry zone of myanmar: A ricardian approach. *Climate*. 8, 9 doi:10.3390/cli8010009
25. Orliuk A. & Usyk L. (2005) Morfolohichni i fizioloho-biokhimichni pokaznyky posukhostiikosti *Triticum aestivum* L. [Morphological and physiological and biochemical indicators drought resistance of *Triticum aestivum* L.]. *Chorn. Botan. Zhurn.* 1. 90–98. (in Ukrainian)
26. Palyvoda, Iu.M., Havii, V.M. & Kuchmenko, O.B. (2021) Fizioloho-biokhimichni pokaznyky prorostkiv pshenytsi miakoi (*Triticum aestivum* L.) pry modeliuvanni vodnoho defitsytu za dii metabolichno aktyvnykh spoluk [Physiological

and biochemical indicators of common wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) in the simulation of water deficit under the action of metabolically active compounds]. *Naukovi zapysky Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Ser. Biologiya. Ternopil: TNPU im. V. Hnatiuka*, 3(81), 44–54 (in Ukrainian). doi: 10.25128/2078-2357.21.3.7

27. Sattler, S.E., Gilliland, L.U., Magallanes-Lundback, M., Pollard, M. & Della Penna, D. (2004). Vitamin E is essential for seed longevity and for preventing lipid peroxidation during germination. *The Plant Cell*, 16, 1419–1432.

28. Seleiman, M.F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H., & Battaglia, M. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10, 259 doi:10.3390/plants10020259

29. Szabados L. & Savoure A. (2010) Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in Plant Science*, 15 (2). 89–97 doi: 10.1016/j.tplants.2009.11.009

30. Yeshchenko, V.O., Kopytko, P.H. & Opryshko V.P. (2014). *Osnovy naukovykh doslidzhen v ahronomii* [Fundamentals of scientific research in agronomy]. Kyiv, 332 (in Ukrainian).

31. Zaimenko N., Didyk N., Dziuba O., Zakrasov O., Rositska N. & Viter A. (2013). Induktsiia zakhysnykh reaktsii na posukhu u roslyn kukurudzy analysymom za riznykh zvolozhenosti y typu gruntu [Induction of defense responses to drought in maize plants by analcime at different humidities and soil type]. *Fyzyolohyia y byokhymyia kult. roslyn*, 45 (1). 35–4. (in Ukrainian).

32. Zhuk, O. (2011). Formuvannia adaptivnoi vidpovidi roslyn na defitsyt vody [Formation of adaptive response of plants to water deficit]. *Fyzyolohyia y byokhymyia kult. roslyn*, 43(1), 26–37 (in Ukrainian).

Palivoda Yu. M., PhD Student, Nizhyn Mykola Gogol State University, Nizhyn, Chernihiv region, Ukraine

Haviy V. M., Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Nizhyn Mykola Gogol State University, Nizhyn, Chernihiv region, Ukraine

The effect of pretreatment of seeds with metabolically active substances on the formation of the root system and the water potential of the roots of common wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) under conditions of water deficit

Wheat, one of the most important agricultural crops in the world, the production of which is important for humanity. Unfavorable environmental conditions negatively affect the physiological processes of growth and development of wheat and lead to a decrease in productivity. One of the most acute environmental factors is water scarcity caused by drought. Plants develop various complex mechanisms of resistance and adaptation to water deficit, including physiological responses. The water potential of plants is maintained at a high level due to a well-formed root system. Questions regarding the study of drought resistance of grain crops are relevant, as they are focused on the study of plant reactions to water stress and the implementation of methods to increase plant resistance to drought. One of these methods is the use of metabolically active substances. The article provides a comparative description of the influence of metabolically active substances and their combinations on the mechanisms of the formation of a powerful root system and the reduction of the water potential of the roots of common wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) in conditions of water deficit, simulated with the help of PEG 6000. It was established that pretreatment of seeds with solutions of ubiquinone-10 and magnesium sulfate ($MgSO_4$), combinations: vitamin E + methionine + paraoxybenzoic acid (POBA), vitamin E + methionine + paraoxybenzoic acid (POBA) + magnesium sulfate ($MgSO_4$) stimulated the development of the root system by 16.9%, 8.9%, 14.2%, and 10.2%, respectively, compared to seeds that were in conditions of water deficit simulated using PEG 6000. Treatment of wheat seeds of *T. aestivum* with a solution of vitamin E and a combination of vitamin E + methionin + paraoxybenzoic acid (POBA) + magnesium sulfate ($MgSO_4$) increases the water-holding capacity of the roots in conditions of slow water supply. Treatment of seeds with metabolically active substances helps to increase the drought resistance of common wheat and can be used as elements of the technology of growing grain crops in conditions of water deficit.

Key words: metabolically active substances, wheat, PEG 6000, rhizogenesis, linear growth.