

Physiological aspects of adaptive plasticity of *Solanum tuberosum* L. varieties and hybrids under variations of the hydrothermal regime in the Polissia region of Ukraine

N. Pysarenko¹ | M. Furdyha² | N. Zakharchuk² | V. Hordienko²

Article info

Correspondence Author

N. Zakharchuk

E-mail:

vs_potato@meta.ua

¹Polissia Research Department, Institute for Potato Research, NAAS, Tsentralna Str., 6, Fedorivka village, Korosten district, Zhytomyr region, 11699, Ukraine

²Institute for Potato Research NAAS, Yaroslava Mudroho Str., 22, Nemishaive, Bucha district, Kyiv region, 07853, Ukraine

Citation: Pysarenko, N., Furdyha, M., Zakharchuk, N., & Hordienko, V. (2025). Physiological aspects of adaptive plasticity of *Solanum tuberosum* L. varieties and hybrids under variations of the hydrothermal regime in the Polissia region of Ukraine. *Scientific Progress & Innovations*, 28(4), 10–22. doi: 10.31210/spi2025.28.04.02

The research aimed to reveal the specific features of adaptive plasticity expression in varieties and hybrids of different maturity groups by analysing the dynamics of physiological indicators of the water regime during critical phases of plant growth. The research was conducted under field conditions at the Polissia Research Department of the Institute for Potato Research, NAAS (Zhytomyr Polissia) in 2024–2025 and involved 45 potato genotypes. Water retention capacity (WRC) and water recovery capacity (WReC) coefficients were assessed under laboratory conditions by sampling leaf material at the following growth stages: budding, flowering, active tuber formation, and yield accumulation. These measurements were taken in parallel with the determination of the hydrothermal coefficient (HTC). A consistent decrease in WRC by 16–20 % and WReC by 15–30 % was observed throughout the growth phases, reflecting the progressive water stress experienced by the plants. Early-ripening varieties showed the highest sensitivity to stress, whereas hybrid material of all maturity groups exhibited relatively greater stability of these parameters. Middle-early hybrids demonstrated a more stable water regime compared with varieties of the same maturity group, particularly in terms of water balance recovery. Mid-ripening genotypes exhibited the highest level of water homeostasis, even in the later stages of ontogenesis (WRC = 59 %, WReC = 86 %). Correlation analysis confirmed the presence of positive relationships between HTC and water regime parameters, differentiated by maturity groups: early genotypes showed a higher sensitivity of water recovery processes to moisture availability ($r \approx 0.90$), middle-early genotypes were characterized by moderate and stable correlations, while mid-ripening genotypes displayed the lowest correlation coefficients, reflecting their relative independence from fluctuations in hydrothermal conditions. Hierarchical clustering divided the potato genotype collection into two main groups based on water-exchange strategies: Cluster I ($n = 26$) with elevated water retention and recovery coefficients (WRC = 69.7 ± 1.9 %, WReC = 98.2 ± 2.4 %) and Cluster II ($n = 19$) with moderate values (WRC = 64.2 ± 3.1 %, WReC = 91.3 ± 2.8 %). Genotypes and divergent forms with WReC exceeding 100 % were identified. Among the promising sources for drought resistance breeding, the following hybrids were highlighted: (P.14.3/5, P.16.50-16, P.17.44-1, P.19.15-16, P.17.24-26, P.15.56-10, P.17.29/21, P.17.38/16, P.15.5/27, P.17.20-13, P.13.52-11, P.13.42/3, P.17.34/8, P.17.30-3, P.17.39/22) and varieties (Tyras, Mezhyrichka 11, Opillia, Zhytnytsia, Myroslava, Lietana). The obtained results confirm the effectiveness of using water retention and recovery coefficients as markers for assessing the adaptive potential of genotypes and provide a scientific foundation for improving breeding programs towards enhancing potato resistance to abiotic stress.

Keywords: potato, breeding material, plant water homeostasis, adaptive potential, water stress (abiotic), physiological response, genetic differentiation for water deficit tolerance.

Фізіологічні аспекти адаптивної пластичності сортів і гібридів *Solanum tuberosum* L. при різних варіаціях гідротермічного режиму Полісся України

Н. В. Писаренко¹ | М. М. Фурдига² | Н. А. Захарчук² | В. В. Гордієнко²

¹Поліське дослідне відділення Інституту картоплярства НААН, с. Федорівка, Житомирська обл., Україна

²Інститут картоплярства НААН, смт. Немішаєве, Київська обл., Україна

Метою дослідження було виявлення особливості прояву адаптивної пластичності сортів і гібридів різних груп стиглості шляхом аналізу динаміки фізіологічних показників водного режиму у критичні фази розвитку рослин. Дослідження виконано в польових умовах Поліського дослідного відділення ІК НААН (Житомирське Полісся) в 2024–2025 рр. на 45-ти генотипах картоплі. Оцінювали коефіцієнти водоутримання (Кву) та водовідновлення (Квв) у лабораторних умовах, відбираючи зразки листків у фазах: бутонізації, квітання, активного бульбоутворення та накопичення продуктивності, паралельно з визначенням гідротермічного коефіцієнта (ГТК). Встановлено закономірне зниження Кву на 16–20 % та Квв на 15–30 % упродовж фаз розвитку, що відображає прогресуючий водний стрес у рослин. Ранні сорти виявили найбільшу чутливість до стресу, тоді як гібридний матеріал усіх груп стиглості мав відносно вищу стабільність показників. Середньоранні гібриди мали стійкіший водний режим порівняно із сортами цієї групи, зокрема за відновленням водного балансу. Середньостиглі генотипи відзначалися найвищим рівнем водного гомеостазу навіть у пізніх фазах онтогенезу (Кву = 59 %, Квв = 86 %). Кореляційний аналіз підтвердив наявність позитивних залежностей між ГТК та показниками водного режиму з диференціацією за групами стиглості: у ранніх генотипів проявлялася вища чутливість процесів водовідновлення до рівня зволоження ($r \approx 0.90$), середньоранні характеризувалися помірними стабільними зв'язками, середньостиглі сорти демонстрували найнижчі коефіцієнти кореляції, що відображає їх відносну автономність від коливань гідротермічних умов. Ієрархічна кластеризація розділила колекцію генотипів картоплі на дві основні групи за стратегіями водного обміну: Кластер I ($n=26$) з підвищеними значеннями коефіцієнтів водоутримання та водовідновлення (Кву = $69,7 \pm 1,9$ %, Квв = $98,2 \pm 2,4$ %) та Кластер II ($n=19$) з помірними (Кву = $64,2 \pm 3,1$ %, Квв = $91,3 \pm 2,8$ %). Виявлено генотипи та дивергентні форми з показниками Квв понад 100 %. Серед перспективних джерел для селекції на посухостійкість виділено гібриди (П.14.3/5, П.16.50-16, П.17.44-1, П.19.15-16, П.17.24-26, П.15.56-10, П.17.29/21, П.17.38/16, П.15.5/27, П.17.20-13, П.13.52-11, П.13.42/3, П.17.34/8, П.17.30-3, П.17.39/22) та сорти (Тирас, Межирічка 11, Опілля, Житниця, Мирослава, Летана). Отримані результати підтверджують ефективність використання коефіцієнтів водоутримання та водовідновлення як маркерів оцінки адаптивного потенціалу генотипів і створюють наукове підґрунтя для удосконалення селекційних програм у напрямі підвищення стійкості картоплі до абіотичного стресу.

Ключові слова: картопля, селекційний матеріал, водний гомеостаз рослин, адаптивний потенціал, водний стрес (абіотичний), фізіологічна реакція, генетична диференціація за стійкістю до водного дефіциту.

Бібліографічний опис для цитування: Писаренко Н. В., Фурдига М. М., Захарчук Н. А., Гордієнко В. В. Фізіологічні аспекти адаптивної пластичності сортів і гібридів *Solanum tuberosum* L. при різних варіаціях гідротермічного режиму Полісся України. *Scientific Progress & Innovations*. 2025. № 28 (4). С. 10–22.

Вступ

Стрімке посилення кліматичних змін у Східній Європі спричиняє частіші та подовжені періоди літніх посух у регіонах, які раніше мали достатнє зволоження. Згідно з метеоспостереженнями останніх десятиліть, у зоні Полісся України відзначається зростання середньорічних температур, різкі коливання температурних режимів, скорочення кількості опадів у літній період та поява короткочасних зливових опадів, що суттєво змінює гідротермічний баланс агроландшафтів [1–3]. Такі тенденції створюють серйозні ризики для стабільності врожаїв культур, традиційно вирощуваних у Поліссі, зокрема картоплі (*Solanum tuberosum* L.), яка залишається однією з основних продовольчих культур України [4].

Дефіцит вологи є одним із провідних обмежувальних чинників продуктивності картоплі у світі [5–7]. Ця культура має відносно поверхневу кореневу систему ($\approx 85\%$ коренів розташовані у верхніх до 30 см шарі ґрунту) та високу транспіраційну активність, що робить її особливо чутливою до водного стресу на етапах формування та накопичення маси бульб [8–10]. В умовах дефіциту води відбуваються зниження фотосинтетичної активності, прискорене старіння листків і порушення водного гомеостазу, що призводить до втрати врожаю та зниження якості бульб [11]. Значне скорочення листової поверхні та надземної біомаси обмежує надходження асимілянтів для формування бульб [12]. Рівень зниження врожайності визначається інтенсивністю дефіциту води: Martínez-Romero et al. (2019) [13] відзначають, що зменшення поливу на 20 % від оптимального призводить до падіння врожаю приблизно на 5 %, тоді як Greenwood et al. (2010) [14] повідомляють, що при дефіциті понад 35 % темпи росту істотно знижуються і втрати врожаю стають критичними.

Зважаючи на ці виклики, пошук ефективних методів оцінки адаптивності селекційного матеріалу до абіотичного стресу є ключовим завданням сучасного картоплярства [15]. У міжнародних дослідженнях широко використовують фізіологічні індикатори водного стану рослин, зокрема Relative Water Content (RWC) та показники осмотичного регулювання, як критерії толерантності до водного дефіциту. Наприклад, Verbeke et al. (2022) [16] показали, що осмотична адаптація у пшениці варіювалася залежно від фенофази і умов водного стресу, вимірюваних через осмотичний потенціал і водний вміст. Elsayed et al. (2021) [17] застосували гіперспектральні індекси для точного визначення Leaf RWC і його зв'язку з урожайністю, підкреслюючи практичну цінність цього фізіологічного показника. Дослідження Soltys-Kalina et al. (2016) [18] зосереджувалося безпосередньо на картоплі, вивчаючи листову RWC та врожай сортів 'Wauseon', 'Katahdin' та інших під водним стресом; сорт Wauseon показав мінімальне зниження як RWC, так і врожайності, що свідчить про його високу толерантність до посухи. Огляд Farooq et al. (2009) [19] узагальнює основні механізми впливу посухи на рослини, включно з порушенням фотосинтезу та водного балансу, забезпечуючи методологічний фундамент для досліджень адаптації.

В Україні інтерес до фізіологічних маркерів стійкості картоплі зростає на тлі кліматичних змін, проте системні дослідження селекційного матеріалу в умовах Полісся залишаються обмеженими. Селекція на стійкість до стресу ґрунтується на вивченні закономірностей формування адаптивних реакцій та визначенні морфо-анатомічних, фізіолого-біохімічних і молекулярних характеристик, які забезпечують резистентність культури до посухи [20–23]. У практиці наукових досліджень широко застосовують індексний підхід для аналізу реакції сортів на водний дефіцит, який оцінює втрату врожаю порівняно з оптимальними умовами і використовується для відбору посухостійких форм [24–26]. Особливо важливим критерієм є водоутримувальна здатність тканин листка та їхня спроможність швидко відновлювати водний баланс після посушливого періоду. Такий підхід не дає прямого виміру врожайності, проте відображає потенціал рослини відновлювати фізіологічні, біохімічні та молекулярні функції, що сприяє формуванню високої продуктивності порівняно з неспухостійкими генотипами [27, 28]. Для умов Полісся було показано ефективність оцінки коефіцієнтів водоутримання та водовідновлення картоплі [29–31], що дозволяє глибше зрозуміти механізми адаптації і виявити селекційно цінні джерела стійкості.

Отже, використання фізіологічних показників водного режиму, таких як RWC та відновлювальна здатність, є ефективним підходом для відбору адаптивних генотипів у селекційній практиці. Водночас відзначається дефіцит даних щодо реакції сортів і гібридів різних груп стиглості на змінний гідротермічний режим у жорстких кліматичних умовах Полісся України. Актуальність подальших досліджень обумовлена потребою інтеграції водно-фізіологічних критеріїв із кліматичними даними для підвищення ефективності селекційного добору.

Мета дослідження

Виявити особливості прояву адаптивної пластичності сортів і гібридів картоплі (*Solanum tuberosum* L.) різних груп стиглості в умовах змін гідротермічного режиму Полісся України шляхом аналізу динаміки та взаємозв'язків фізіологічних показників водного режиму впродовж критичних фаз розвитку рослин.

Для досягнення мети було визначено такі завдання:

1. Охарактеризувати динаміку коефіцієнтів водоутримання (Кву) та водовідновлення (Квв) у сортів і гібридів різних груп стиглості впродовж критичних фаз онтогенезу.
2. З'ясувати відмінності між сортовим та гібридним матеріалом за рівнем стабільності та стійкості до водного стресу.
3. Виявити кореляційні зв'язки між гідротермічним коефіцієнтом (ГТК) та показниками водного режиму залежно від групи стиглості й типу селекційного матеріалу.
4. Виділити сорти й гібриди з високими та стабільними значеннями Кву і Квв як перспективні джерела для селекції картоплі на посухостійкість.

5. Описати диференціацію генотипів за допомогою кластеризації на основі показників водного режиму для оцінки генетичної мінливості адаптивних ознак.

Матеріали і методи

Дослідження з оцінки адаптивної пластичності за фізіологічною реакцією рослин картоплі (*Solanum tuberosum* L.) виконано в польовій сівозміні лабораторії селекції та насінництва картоплі Поліського дослідного відділення Інституту картоплярства НААН в 2024–2025 рр. Дослідне поле розташоване в зоні Житомирського Полісся України (50,7011° N, 29,3400° E, висота ≈ 148 м), яка характеризується помірно-континентальним кліматом з виразними міжрічними коливаннями гідротермічного режиму.

Ґрунти – дерново-підзолисті піщані, типові для Полісся, з низьким вмістом гумусу (< 0,8 %), кислою реакцією ґрунтового розчину (pH < 5,0), низьким ступенем насичення основами (< 50 %) та малою ємністю вологи (польова вологоємність до ~21 %). За гранулометричним складом переважає піщана фракція (≈ 93–96 %), а частка пилувато-глинистої фракції становить ≈ 4–7 %.

Предмет дослідження. Оцінювали сорти та перспективні гібриди різних груп стиглості селекції Поліського дослідного відділення і Інституту картоплярства НААН. Групи стиглості сортів та гібридів визначали за комплексом ознак: тривалістю вегетаційного періоду, динамікою перебігу основних фенологічних фаз, темпами наростання врожаю на контрольних термінах (60–65 та 75–80 день від садіння), а також за морфо-фізіологічним станом рослин протягом сезону досліджень.

Ранньостиглі (вегетаційний період до 100 днів):

Сорти – Слаута, Тирас, Радомисль, Взірець.

Гібриди – 3.16.50-16 (Межирічка 11 / Bellarosa), П.17.38/4 (Вектар / Радомисль), П.16.16-9 (П.12.2-3 / П.12.19-15), П.17.20-3 (Палац / Взірець), П.17.24-26 (П.1348-22 / П.13.17-1), П.17.44-1 (Зелений гай / Спокуса), П.19.15-16 (Радомисль / Світана), П.19.15-13 (Радомисль / Світана), П.14.3/5 (Вимір / Н.05.3-5).

Середньоранні (101–115 днів):

Сорти – Партнер, Межирічка 11, Опілля, Світана, Базалія.

Гібриди – П.16.40/2 (П.03.1-6 / Karlena), П.15.5/27 (П.09.27/9 / Вигода), П.15.56-10 (П.09.77/5 0 / Подольанка), П.17.29/21 (Вектар / Взірець), П.17.13/7 (Н.11.12-8 / Партнер), П.17.38/16 (Вектар / Радомисль), П.17.28-2 (Лілея / Взірець), П.18.87/2 (F1 Б.9-10-11), П.17.19-26 (П.13.54-2 / Взірець), П.17.1-4 (П.10.11-5 / Aladin), П.19.15-18 (Радомисль / Світана), П.17.20-13 (Палац / Взірець), 3.14.64-2 (Вересівка / Струмок), П.13.52-11 (Гурман / П.07.85/13).

Середньостиглі (116–130 днів):

Сорти – Летана, Житниця, Мирослава, Джавеліна, Дивина.

Гібриди – 3.16.59-10 (Ірбицький / Подолія), П.17.34/8 (Дубрава / Взірець), П.17.39/22 (Маг / Радомисль), П.18.78/1 (Летана / Фальварк), Г.10.6/23 (Г.89.715с88 / Тирас), П.17.30-3 (Зорачка / Взірець),

П.18.51/3 (Г.08.197/105 / Red Konik), П.13.42/3 (Подолія / Летана).

Дослід закладали на дворядкових ділянках із міжряддям 0,70 м та відстанню між рослинами в рядку 0,25 м. Довжина рядка становила 7,5 м (30 рослин / рядок), ширина ділянки – 1,40 м; облікова площа – 10,50 м². Густота стояння – 57,1 тис. рослин/га. Для садіння використовували насінневі бульби фракції 45–55 г. Термін садіння 2024–2025 років припадав на другу декаду травня. Мінеральне живлення забезпечували внесенням добрив у період садіння в локальний спосіб у дозі N–P₂O₅–K₂O = 8–20–40 кг/га д. р., що відповідало стартовому живленню культури. Додатково застосовували підживлення сульфатом амонію (1,0 ц/га) у фазі активного росту рослин. Захист рослин здійснювали відповідно до загальноприйнятих для культури регламентів інтегрованої системи захисту, без застосування зрошення.

Відбір зразків і фенологія. Для кожного генотипу в кожному повторенні відбирали по 10 листків середнього ярусу з фізіологічно активних пагонів. Відбір виконували у ранкові години (07:00–8:00) за відсутності опадів, у чотири строки вегетації: бутонізація (І облік), цвітіння (ІІ), активне бульбоутворення (ІІІ), накопичення продуктивності (ІV), з інтервалом 14–15 днів.

Визначення водного режиму (Кву, Квв) проводили за методикою, описаною в патенті Григорюка та ін. (2002) [32]. Свіжа маса (М₀): листки одразу після відбору зважували на аналітичних терезах (точність ± 0,001 г). Часткове зневоднення (Кву): зразки розміщували на стелажах у вентиляваному приміщенні за умови 20–22 °C і відносної вологості 45–60 % протягом 24 годин; після цього зважували (М₁). Відновлення водного балансу (Квв): листки занурювали у дистильовану воду при 20–22 °C на 24 годин у напівтемряві; перед зважуванням (М₂) поверхневу воду вилучали фільтрувальним папером.

Показники:

$$\text{коефіцієнт водоутримання} - K_{\text{ву}}(\%) = \frac{M_1}{M_0} \times 100$$

$$\text{коефіцієнт водовідновлення} - K_{\text{вв}}(\%) = \frac{M_2}{M_0} \times 100$$

Щоденні метеодані щодо температури повітря отримували із сервісу «Радар погода», кількість опадів визначали шляхом власних вимірювань на дослідній ділянці. Інтенсивність посухи в період відбору зразків визначали за гідротермічним коефіцієнтом (ГТК) за формулою (3) Селянінова [33]:

$$ГТК = \frac{\sum r}{0.1 \times \sum t \circ C} \quad (3)$$

де $\sum t$ — сума середньодобових температур > 10 °C за період, $\sum r$ — сума опадів за той же період (мм). Градацію ГТК (гідротермічного коефіцієнта) використовували відповідно до класифікації, опублікованої у «Словнику агронома» (SuperAgronom.com):

< 0,4 – дуже сильна посуха; 0,4–0,5 – сильна посуха; 0,6–0,7 – середня посуха; 0,8–0,9 – слабка посуха; 1,0–1,5 – достатньо вологий; > 1,5 – надмірно вологий.

Значення ГТК для певної вегетаційної фази розвитку рослин у період обліку 2024–2025 років представлено на *рис. 1*.

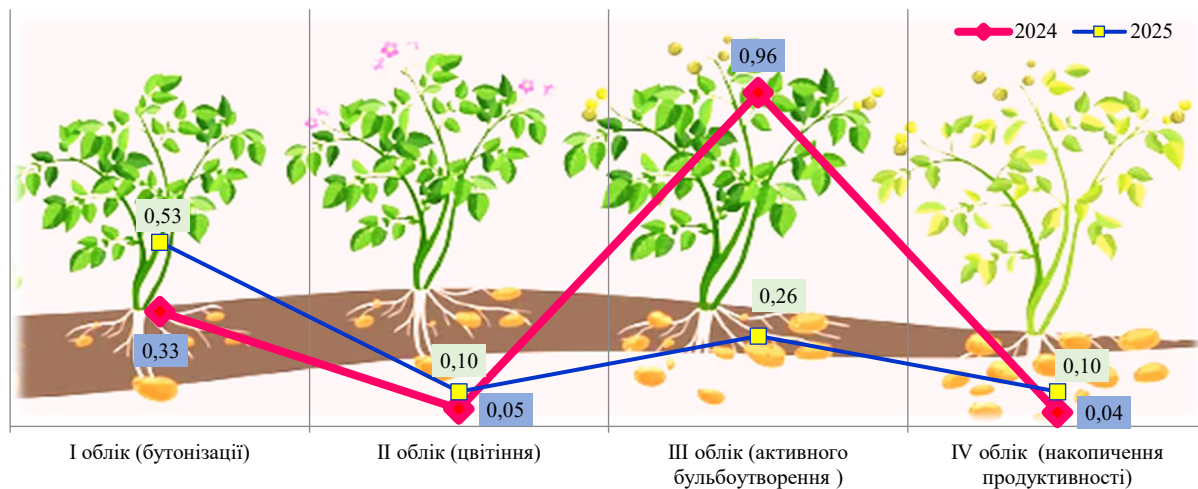


Рис. 1. Гідротермічний коефіцієнт (ГТК) у ключові фази розвитку картоплі (I–IV обліки) 2024–2025 років

Примітки: перший облік припав на першу декаду липня, другий – на третю декаду липня, третій – на першу декаду серпня, четвертий – на другу декаду серпня.

Значення гідротермічного коефіцієнта (ГТК) у роки досліджень свідчать про переважання посушливих умов. 2024 року в перший, другий та четвертий облікові періоди відмічали дуже сильну посуху, тоді як у третій облік умови зволоження були близькими до достатніх. 2025 року протягом усіх періодів відбору зразків рослин фіксувалися посушливі умови різної інтенсивності: від сильної посухи (0,53) до дуже сильних проявів (0,10–0,26).

Обробку експериментальних даних проводили із застосуванням стандартних статистичних методів у середовищі Microsoft Excel (модуль Data Analysis Toolpak) для розрахунку середніх арифметичних значень та коефіцієнтів кореляції. Для побудови теплових карт кореляцій та дендрограм ієрархічної кластеризації (метод Уорда) використовували мову програмування Python. Теплові карти формували за допомогою бібліотеки seaborn (функція heatmap) із подальшою графічною візуалізацією у matplotlib.

Дендрограми ієрархічної кластеризації будували з використанням модуля scipy.cluster.hierarchy (метод Уорда), а їх візуалізацію виконували в matplotlib.

Результати та їх обговорення

Аналіз фізіологічних показників водоутримання (Кву) та водовідновлення (Квв) у різних груп стиглості картоплі.

Протягом вегетаційного періоду 2024–2025 років, який характеризувався посушливими умовами від гострої до сильної посухи, спостерігали чітку закономірність зниження водного режиму рослин картоплі. Коефіцієнт водоутримання (Кву) демонстрував стабільну тенденцію до зниження від I до IV обліку в усіх досліджуваних групах у межах 16–20 %, що відображає прогресуючий розвиток водного стресу в міру переходу від бутонізації до фази накопичення маси бульб. Коефіцієнт водовідновлення (Квв) характеризувався ще більш вираженим спадом, особливо у критичний період накопичення продуктивності (IV облік), коли показники зменшувалися на 15–30 % (залежно від групи стиглості) порівняно з фазою бутонізації (*табл. 1*).

Таблиця 1

Показники водного режиму сортів і гібридів картоплі за групами стиглості та фенологічними фазами розвитку (середнє за 2024–2025 рр.), (%)

Матеріал	Стиглість	Фаза бутонізації (I облік)		Фаза цвітіння (II облік)		Фаза активного бульбоутворення (III облік)		Фаза накопичення продуктивності (IV облік)	
		Кву	Квв	Кву	Квв	Кву	Квв	Кву	Квв
Сорти	Ранні	72	103	68	101	63	91	53	73
Гібриди		74	103	72	102	67	97	58	86
Сорти	Середньоранні	73	99	69	101	61	89	56	78
Гібриди		74	100	71	102	68	96	58	82
Сорти	Середньо	77	101	76	104	69	95	57	86
Гібриди		77	105	76	104	70	98	59	86

Рання група стиглості.

Сорти – відзначалися найбільшою чутливістю до водного дефіциту серед усіх груп. Кву знижувався в середньому на 19 %, а Квв – майже на 28 %, що свідчить про слабку здатність підтримувати водний баланс у критичні періоди. Гібриди демонстрували вищу стійкість до посухи порівняно з сортами. Зниження Кву становило близько 16 %, а Квв – лише 17 %, що підтверджує наявність у них ефективніших адаптивних механізмів.

Середньорання група стиглості.

Сорти – показували проміжні результати. Зниження Кву становило 17 %, що менше, ніж у ранніх сортів, однак Квв характеризувався різкішим падінням між II і IV обліками – до 23 %. Гібриди продемонстрували суттєво стабільніший водний режим порівняно з сортами. Особливо помітною була перевага у здатності до відновлення водного балансу – зниження до 20 %, тоді як у сортів воно сягало 23 %.

Середньостигла група стиглості.

Сорти проявили вищі початкові значення Кву (77 %). Проте упродовж вегетації спостерігали суттєве зниження цього показника (до 20 %). Гібриди вирізнялися найвищою стійкістю серед усіх досліджуваних матеріалів. В IV обліку вони зберігали відносно високі показники як Кву (59 %), так і Квв (86 %), що підтверджує їхню здатність підтримувати функціонування водного режиму навіть в умовах сильного стресу.

Адаптивні особливості за фенологічними фазами.

Бутонізація (I облік) – усі групи характеризувалися високими початковими значеннями з мінімальними відмінностями між сортами та гібридами.

Цвітіння (II облік) – відмічено прояв диференціації за стійкістю, особливо в ранній групі, де гібриди мали виражену перевагу. Активне бульбоутворення (III облік) – критичний період, у якому розрив між сортами та гібридами був найбільш помітним; гібриди всіх груп демонстрували кращі показники водовідновлення. Інтенсивне накопичення продуктивності (IV облік) – фаза, у якій відмінності в адаптивному потенціалі проявилися найсильніше; гібриди стабільно зберігали вищу здатність до водовідновлення порівняно з сортами.

Селекційна цінність та перспективи.

Отримані результати переконливо свідчать про переваги перспективних гібридів над наявними сортами у всіх групах стиглості. Їхня здатність підтримувати водний баланс у критичні фази формування продуктивності має визначальне значення в умовах кліматичних змін та зростання періодів з посухами. Гібриди вирізняються не лише кращими абсолютними показниками, але й більш стабільною динамікою деградації водного режиму, що свідчить про наявність ефективніших механізмів адаптації до водного стресу. Це дає підстави прогнозувати їхню високу продуктивність у зоні Полісся України та доцільність широкого впровадження у виробництво як заміну наявним сортам.

Кореляційний аналіз взаємозв'язку ГТК із показниками водного режиму.

Для уточнення реакції різних груп стиглості на гідротермічні умови було проведено кореляційний аналіз між показником ГТК у період обліків 2024–2025 років та коефіцієнтами водоутримання (Кву) і водовідновлення (Квв). Результати відображені на тепловій карті (рис. 2).

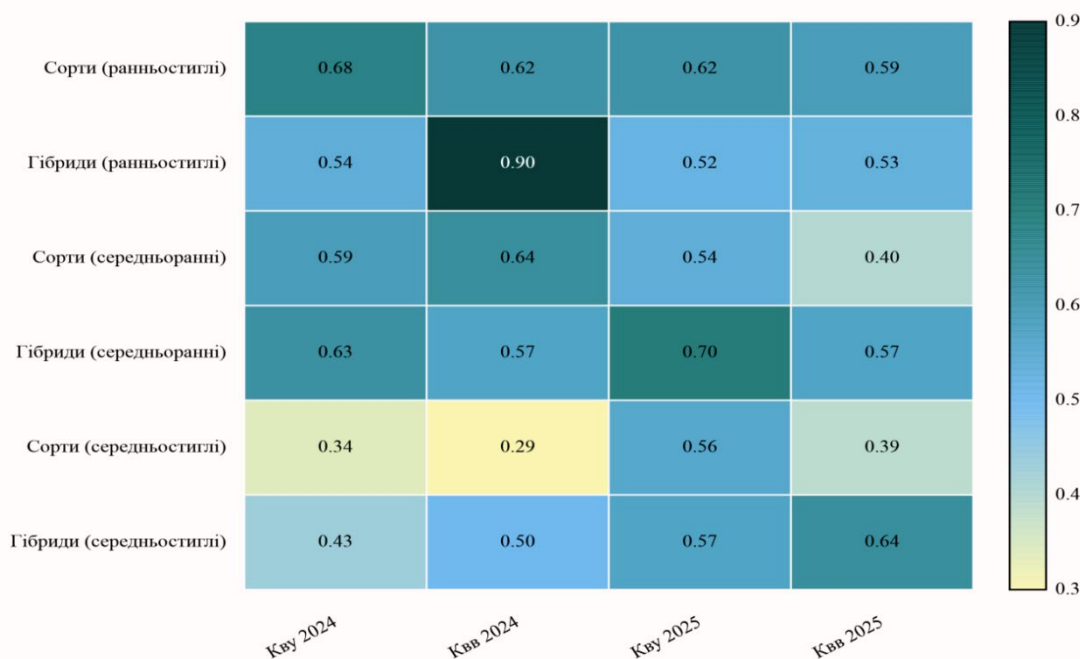


Рис. 2. Матриця кореляцій (heatmap) між ГТК та коефіцієнтами водного режиму картоплі

Отримані за тепловою картою результати свідчать, що сила зв'язку між ГТК та показниками водоутримання (Кву) і водовідновлення (Квв) суттєво варіює залежно від групи стиглості й матеріалу (сорт/гібрид). Усі зв'язки позитивні, від'ємних не зафіксовано. Ранні сорти характеризуються помірною позитивною кореляцією ($r \approx 0,59-0,68$) з обома показниками, що відображає їх відносну залежність від рівня зволоження та помірну чутливість до гідротермічних коливань. Ранні гібриди демонструють найвищу залежність за Квв 2024 року ($r = 0,90$), що вказує на високу чутливість процесів водовідновлення у критичні періоди. Водночас 2025 року кореляції зменшуються до помірних ($r \approx 0,52-0,54$), що відображає річну варіабельність і потенційно більш гнучкий механізм реагування. Середньоранні сорти демонструють стабільні помірні позитивні кореляції ($r \approx 0,40-0,64$), що підтверджує проміжний тип реакції між ранньою та середньостиглою групами. Середньоранні гібриди відзначаються підвищеними та відносно стабільними значеннями ($r \approx 0,57-0,70$), особливо 2025 року, тобто фізіологічні процеси цих генотипів тісніше узгоджені з гідротермічними умовами (перевага у прогнозованості, але й більша потенційна чутливість). Середньостиглі сорти показують найнижчі коефіцієнти ($r \approx 0,29-0,56$), що свідчить про слабший і менш стабільний зв'язок із ГТК. Це можна інтерпретувати як відносну автономність водного режиму від коливань зволоження (потенційна стійкість), однак це не виключає впливу інших факторів (температурний стрес, фенологічна асинхронія). Середньостиглі

гібриди проявляють збалансований профіль ($r \approx 0,43-0,64$): помірна залежність без надмірної прив'язаності до ГТК, що узгоджується з ознаками адаптивності.

Загалом гібриди демонструють або вищу, або більш збалансовану кореляцію з ГТК порівняно із сортами. Для селекції це означає, що гібриди з низько-помірними r доцільні для цілей стабільності в посушливі роки (відносна автономність водного режиму), генотипи з вищими r забезпечують кращу пластичність у роки з більш сприятливим зволоженням. Кореляційні оцінки інтерпретуються як індикатори чутливості/стабільності, а не причинно-наслідкові зв'язки, і мають розглядатися разом із динамікою Кву/Квв у фенологічних фазах.

Аналіз водного режиму генотипів ранньої групи стиглості.

Результати оцінки водного режиму ранніх сортів і гібридів картоплі за період 2024–2025 рр. показали чітку закономірність поступового зниження коефіцієнтів водоутримання (Кву) та водовідновлення (Квв) у міру проходження облікових фаз, що свідчить про поступове виснаження водного балансу рослин упродовж вегетації. Важливо зазначити, що в ранньостиглих генотипів четвертий облік (95-й день) практично збігається із завершенням їхнього вегетаційного періоду (до 100 днів), тому зафіксовані зміни водного режиму відображають не лише реакцію на водний дефіцит, а й природну динаміку фізіологічних процесів, пов'язаних із фінальними стадіями розвитку (*табл. 2*).

Таблиця 2

Динаміка коефіцієнтів водоутримання (Кву) та водовідновлення (Квв) сортів і гібридів ранньої групи стиглості за період обліків (середнє за 2024–2025 рр.), %

Код	Матеріал	I облік		II облік		III облік		IV облік	
		Кву	Квв	Кву	Квв	Кву	Квв	Кву	Квв
S3	Взірець	67	108	65	103	51	91	39	61
G4	П.17.20-3	69	95	67	101	68	93	51	80
S4	Радомисль	75	102	72	103	68	86	53	70
S1	Слаута	73	105	64	102	61	93	54	80
G2	П.17.38/4	71	106	72	103	67	93	54	86
G9	П.14.3/5	80	107	77	108	60	95	57	89
G8	П.19.15-13	70	104	70	106	66	99	58	82
G7	П.19.15-16	77	104	76	96	72	104	58	90
G3	П.16.16-9	71	100	70	106	66	95	59	81
G1	3.16.50-16	79	113	74	103	71	99	59	90
G5	П.17.24-26	74	99	70	96	65	98	62	91
G6	П.17.44-1	76	99	71	97	70	98	63	82
S2	Тирас	74	95	71	95	70	92	65	81
Середнє		73	103	70	101	66	95	56	82
НІР _{0,05} (середнє)		5,6	5,1	4,3	5,1	4,6	4,6	6,6	5,7

Коефіцієнт водоутримання (Кву). У більшості генотипів відмічено стійку тенденцію до зниження показників від першого до четвертого обліку. Найвищі початкові значення зафіксовано в гібридів П.19.15-16, П.14.3/5, 3.16.50-16 та сорту Радомисль. У подальші фази ці генотипи мали більш інтенсивне зниженням Кву, що свідчить про їхню чутливість до прогресуючого водного дефіциту. Гібриди П.17.44-1, П.17.24-26 та сорт Тирас мали відносно стабільну динаміку, зберігаючи відносно високий рівень Кву

на пізніших етапах вегетації. Сорт Візець продемонстрував найнижчі показники, особливо у четвертому обліку. Коефіцієнт водовідновлення (Квв). Динаміка Квв виявилася більш варіабельною. На ранніх етапах вищі значення спостерігали у гібрида 3.16.50-16, проте у наступних фазах відбувалося їх зниження на 23 %, хоча рівень залишався одним із найвищих серед досліджуваних генотипів у четвертому обліку. Високою стабільністю Квв характеризувалися гібриди П.17.44-1, П.17.24-26 та

П.19.15-16. Серед сортового матеріалу найбільш стійкі значення утримував сорт Тирас, тоді як сорт Вірець проявив найнижчі показники у фінальний період вегетаційного розвитку. Отримані результати підтверджують, що показники водоутримання (Кву) та водовідновлення (Квв) є чутливими фізіологічними маркерами посухостійкості та відображають генотип-специфічну адаптивну реакцію рослин. У наших дослідженнях виявлено позитивні кореляції між гідротермічним коефіцієнтом і показниками водного режиму, що узгоджується з результатами фізіолого-біохімічних робіт, де стабільність водного статусу розглядається як основна передумова адаптації рослин до водного дефіциту [34].

Дослідження Romero et al. (2017) [35] продемонстрували тісну кореляцію між спектральними показниками та фізіологічними змінними водного статусу картоплі, зокрема із загальним вмістом води та відносною швидкістю росту бульб. Це підтверджує надійність використання водних індексів для оцінки посухостійкості різних генотипів. У їхніх дослідженнях було встановлено, що відносний вміст води у листках є надійним маркером, який суттєво варіює між генотипами, що повністю узгоджується з відмінностями, які ми виявили між сортами та гібридами різних груп стиглості.

Комплексні дослідження Shi et al. (2015) [36] свідчать, що посухостійкі сорти характеризуються сильнішою кореневою системою та вищою здатністю до поглинання води на пізніх стадіях розвитку, а також підтримують вищий відносний вміст води у листках порівняно з чутливими генотипами. Важливо, що у посухостійких сортів рівні супероксидних радикалів та перекису водню були нижчими, а активність антиоксидантних ферментів вищою. Це дозволяє припустити, що виявлені відмінності в показниках Кву та Квв між групами стиглості можуть бути пов'язані з різною активністю антиоксидантних систем захисту та ефективністю кореневого поглинання води.

Softys-Kalina et al. (2016) [18] підтвердили, що відносна водоутримувальна здатність листків (RWC) у картоплі є надійним маркером посухостійкості та суттєво варіює між генотипами.

Obidiegwu et al. (2015) [5] підкреслили, що комплексна фенотипічна реакція картоплі на посуху обумовлена інтерактивною дією генотипового потенціалу, стадії розвитку та умов навколишнього середовища, що пояснює виявлену нами мінливість кореляцій між ГТК та показниками водного режиму в різні роки досліджень (особливо у ранніх гібридів: від $r = 0,90$ у 2024 р. до $r \approx 0,52-0,54$ у 2025 р.).

Gervais et al. (2021) [6] встановили, що толерантні генотипи демонструють суттєве збільшення миттєвої ефективності використання води порівняно з чутливими генотипами під час посухи завдяки диференційному пригніченню продигової провідності та транспірації. Це узгоджується з нашими даними про диференційовану реакцію гібридів та сортів на гідротермічні умови, де гібриди демонстрували або вищу, або більш збалансовану кореляцію з ГТК порівняно із сортами.

Особливості середньостиглих генотипів, які ми виявили, частково узгоджуються з концепцією

Monneveux et al. (2013) [37] про те, що реакція форм з тривалішим вегетаційним періодом на дефіцит вологи може бути більш стабільною завдяки більш тривалому періоду формування кореневої системи. Наші результати, які демонструють слабку залежність фізіологічних показників середньостиглих генотипів від коливань ГТК ($r \approx 0,29-0,56$), можуть відображати саме цю відносну автономність водного режиму. Водночас дослідження підкреслюють, що картопля є дуже чутливою до водного стресу порівняно з іншими культурами через неглибоку та розріджену кореневу систему, а фізіологічна реакція на посуху залежить від сорту, фізіологічного віку бульб, а також від тривалості та інтенсивності стресу.

Lal et al. (2022) [38] у комплексному огляді механістичних концепцій реакції картоплі на теплову та посушливу напругу підкреслили важливість інтеграції фізіологічних, біохімічних та молекулярних підходів для розуміння адаптивних механізмів. Автори зазначають, що тепловий та посушливий стрес негативно впливають на ріст рослин, процеси розвитку та врожайність, особливо на критичних стадіях бульбоутворення. Це пояснює виявлену нами річну варіабельність кореляцій та підкреслює необхідність оцінки генотипів в умовах, максимально наближених до реальних польових.

Alvarez-Morezuelas et al. (2022) [39] продемонстрували, що фізіологічна реакція картоплі на посуху залежить від походження насіннєвого матеріалу та тривалості стресу, що може пояснювати міжрічні відмінності, які ми виявили. Aliche et al. (2021) [40] з'ясували, що ранньостиглі сорти можуть демонструвати стабільну врожайність у різних локаціях з різним рівнем водозабезпечення, що підтверджує потенціал ранньостиглого матеріалу для селекції на посухостійкість і узгоджується з помірною позитивною кореляцією ($r \approx 0,59-0,68$), виявленою у ранніх сортів нашого дослідження.

Широкомасштабна оцінка генофонду картоплі, проведена Cabello et al. (2012, 2013) [24, 41], показала наявність значної генотипічної варіабельності за посухостійкістю. Дослідники виявили високу частку акцесій, які поєднують посухостійкість з високою врожайністю в умовах зрошення, особливо серед андських ландрасів, зокрема у видів *S. curtilobum* та культурних груп *S. tuberosum* *L. stenotomum*, *Andigenum* і *Chaucha*.

Schafleitner et al. (2007) [42] у фізіологічних та молекулярних дослідженнях підтвердили, що андські ландраси, зокрема *Sullu* (*S. tuberosum* subsp. *Andigena*), характеризуються вищою посухостійкістю порівняно з комерційними сортами *S. tuberosum* subsp. *tuberosum* завдяки диференційній експресії генів, пов'язаних з водним стресом. Це відкриває перспективи для селекційних програм, спрямованих на використання генетичного різноманіття для покращення адаптивності картоплі до посушливих умов.

Отже, кореляційний аналіз взаємозв'язку ГТК із показниками водного режиму виявив суттєві генотип-специфічні відмінності між групами стиглості та типами селекційного матеріалу. Загалом гібриди демонструють або вищу ($r \approx 0,70-0,90$), або більш

збалансовану кореляцію з ГТК порівняно із сортами, що узгоджується з даними світової літератури про диференційну ефективність використання води різними генотипами [38]. Виявлені кореляційні оцінки слід інтерпретувати як індикатори чутливості/стабільності водного режиму, а не причинно-наслідкові зв'язки, оскільки дослідження підкреслюють залежність експресії фізіологічних ознак від конкретного сценарію посухи [5, 39].

Для селекційної практики отримані результати мають важливе прикладне значення: генотипи з низько-помірними коефіцієнтами кореляції ($r \approx 0,29-0,56$), зокрема середньостиглі сорти, доцільні для забезпечення стабільності врожайності в посушливі роки завдяки відносній автономності водного режиму від коливань зволоження. Натомість генотипи з вищими коефіцієнтами кореляції ($r \approx 0,70-0,90$), зокрема ранні гібриди 2024 року, забезпечують кращу пластичність та можливість повної реалізації продуктивного потенціалу у роки з більш сприятливим гідротермічним режимом. Комплексну оцінку кореляційних зв'язків потрібно розглядати разом із динамікою Кву/Квв у конкретних фенологічних фазах для

прийняття обґрунтованих селекційних рішень щодо добору батьківських форм та напрямів подальшої селекції на посухостійкість.

Аналіз водного режиму генотипів середньоранньої групи стиглості.

Дослідження водного режиму середньоранньої групи генотипів культур за період 2024–2025 років свідчить про специфічні закономірності, що відрізняють цю групу від ранньостиглих форм за характером динаміки та стабільністю досліджуваних генотипів. Порівняльна характеристика з ранньою групою виявила, що середньоранні генотипи демонстрували загалом співставні показники водного режиму, проте з принципово відмінною динамікою. За коефіцієнтом водоутримання середньоранні форми характеризуються меншою амплітудою зниження показників, зберігаючи дещо вищий рівень при завершальному обліку. За коефіцієнтом водовідновлення спостерігали подібність до ранньої групи динаміки, однак із нижчими початковими значеннями, що компенсувало більш стабільні показники на завершальних етапах вегетації (*табл. 3*).

Таблиця 3

Динаміка коефіцієнтів водоутримання (Кву) та водовідновлення (Квв) сортів і гібридів середньоранньої групи стиглості за період обліків (середнє за 2024–2025 рр.), %

Код	Матеріал	I облік		II облік		III облік		IV облік	
		Кву	Квв	Кву	Квв	Кву	Квв	Кву	Квв
S9	Світана	77	101	68	96	60	87	49	81
G20	П.19.15/18	72	93	65	86	65	88	50	74
S6	Партнер	67	90	69	107	52	79	53	73
G12	П.15.56-10	71	98	66	103	66	97	53	82
G19	П.17.1-4	75	104	76	106	72	96	54	77
G16	П.17.28-2	74	99	70	100	70	94	55	80
G17	П.18.87/2	74	113	78	108	69	102	56	82
S5	Межирічка 11	68	93	67	94	62	97	57	80
G13	П.17.29/21	78	100	71	102	69	98	57	87
G14	П.17.13/7	65	96	64	101	65	94	57	76
G18	П.17.19-26	76	97	78	101	67	93	58	80
S7	Базалія	82	109	75	109	67	94	58	75
G15	П.17.38/16	71	92	71	104	69	97	59	85
G21	П.17.20-13	81	108	77	103	72	93	59	84
S8	Опілля	72	101	66	100	63	89	63	81
G10	3.16.40/2	73	102	76	107	70	109	63	86
G11	П.15.5/27	75	91	70	92	74	87	64	85
G22	3.14.64-2	69	96	64	97	64	90	65	79
G23	П.13.52-11	80	112	73	107	63	98	66	89
Середнє		73	100	70	101	66	94	57	81
НІР _{0,05} (середнє)		3,8	3,2	3,7	3,3	3,6	2,4	4,5	3,1

Динаміка коефіцієнта водоутримання (Кву) характеризується чітко вираженим градієнтом зниження від початкової до завершальної фази розвитку. Максимальними початковими показниками відзначалися сорти Базалія та гібриди П.17.20-13, П.13.52-11, П.17.29/21, які сформували групу лідерів за водоутримуючою здатністю. Найбільш критичне зниження спостерігали у сорту Світана з амплітудою втрат до 28 % між крайніми точками обліків. Особливої уваги заслуговує група генотипів зі стабільною динамікою водоутримання, до якої належать гібриди П.17.13/7, П.17.38/16, 3.16.40/2, П.15.5/27, 3.14.64-2 та сорти Межирічка 11 і Опілля. Ці генотипи продемонстрували збалансоване зниження показників, зберігши

високі значення навіть на завершальному обліку. Сорт Партнер виявив нетипову динаміку з мінімальними значеннями у третьому обліку та подальшою стабілізацією. Коефіцієнт водовідновлення (Квв). Динаміка Квв була більш варіабельною. Лідерські позиції на початкових етапах мали гібриди П.17.87/2, П.13.52-11, П.17.20-13 та сорт Базалія, які зберігали досить високі показники навіть на завершальному обліку (75–89 %). Стабільністю показників Квв характеризувалися гібриди П.15.56-10, П.17.29/21, П.17.38/16, П.15.5/27 та сорт Опілля, у яких амплітуда коливань була мінімальною ($\leq 20\%$). Контрастну групу склали генотипи з різким зниженням водовідновлення, включаючи сорт Базалія та низку

гібридів (П.19.15/18, П.17.1-4, П.18.87/2, П.17.20-13, П.13.52-11), що свідчить про їх обмежену здатність до підтримки водного гомеостазу у стресових умовах під час вегетації.

Дослідження водного режиму генотипів середньостиглої групи стиглості.

У середньостиглій групі генотипів середні значення коефіцієнта водоутримання (Кву) у фазу бутонізації перевищували показники ранньостиглих та середньоранніх груп на 4 %. Ця тенденція збереглася і в наступних фазах розвитку, де перевага становила 6–3 %, що свідчить про вищий рівень акумуляції вологи в листковому апараті середньостиглих генотипів у період інтенсивного вегетативного росту.

Таблиця 4

Динаміка коефіцієнтів водоутримання (Кву) та водовідновлення (Квв) сортів і гібридів середньостиглої групи стиглості за період обліків (середнє за 2024–2025 рр.), %

Код	Матеріал	I облік		II облік		III облік		IV облік	
		Кву	Квв	Кву	Квв	Кву	Квв	Кву	Квв
S14	Дивина	73	101	72	109	64	92	54	78
S13	Джавеліна	79	107	80	96	66	92	54	87
G27	П.18.78/1	75	103	72	98	70	97	55	77
G26	П.17.39/22	77	108	81	110	70	109	55	95
G24	3.16.59-10	77	105	75	103	68	95	56	89
S11	Житниця	75	100	80	99	73	98	57	91
G30	П.18.51/3	78	109	76	107	67	90	58	79
S12	Летана	78	98	79	107	73	98	59	87
G28	Г.10.6/23	76	102	80	101	71	95	60	76
S10	Мирослава	78	96	71	106	68	96	60	89
G29	П.17.30-3	73	109	71	108	74	103	60	89
G25	П.17.34/8	81	108	81	101	74	103	63	81
G31	П.13.42/3	79	100	76	102	67	95	66	100
Середнє		77	103	76	103	69	97	58	86
НІР _{0,05} (середнє)		3,7	3,2	4,1	4,4	3,3	4,2	3,6	3,3

Коефіцієнт водоутримання (Кву). У фазу бутонізації найвищі значення Кву мали гібриди П.17.34/8 і П.13.42/3 та сорт Джавеліна. У подальших фазах відносну стабільність динаміки зберігали гібриди П.13.42/3, П.17.34/8, П.17.30-3 та сорти Летана і Мирослава, у яких показники у фазу накопичення продуктивності перевищували середнє значення по групі. Натомість сорти Дивина та Джавеліна демонстрували виражене зниження значень Кву, з відхиленням на 4 % від середнього показника групи на завершальному етапі обліку. Найбільша стійкість за водоутриманням у IV обліку була притаманна гібридам П.17.34/8 і П.13.42/3, які утримували найвищі показники серед усіх середньостиглих генотипів. Коефіцієнт водовідновлення (Квв). Динаміка Квв у середньостиглій групі була відносно стабільною, зберігаючи високі значення протягом фази бутонізації та цвітіння. Найвищими початковими показниками, з перевагою над середнім значенням по групі на 5–6 %, відзначали гібриди П.17.39/22, П.17.34/8, П.17.30-3, П.18.51/3, а також сорт Джавеліна. Водночас, високі показники у фазу накопичення продуктивності зафіксовано в сортів Житниця та Мирослава і гібридів 3.16.59-10, П.17.30-3, П.13.42/3. Стабільністю показників Квв протягом усього вегетаційного періоду характеризувалися гібриди П.17.39/22, П.13.42/3 та сорт Житниця.

Навіть у фазу накопичення продуктивності ці генотипи зберігали перевагу на 1–2 % порівняно з іншими групами. Аналіз коефіцієнта водовідновлення (Квв) також виявив високу адаптивність середньостиглих форм. Їхні стартові значення у фазу бутонізації перевищували показники ранніх та середньоранніх груп на 3 %. У наступних фазах розвитку різниця між групами була мінімальною, проте середньостиглі генотипи продемонстрували відносно вищий рівень Квв у фазу інтенсивного накопичення продуктивності, на 5 % та 4 % відповідно. Це вказує на їхню кращу здатність підтримувати водний баланс у ключовий період формування врожаю (*табл. 4*).

Аналіз дендрограми генотипів картоплі за коефіцієнтами водовіддачі (Кву) та водоутримання (Квв).

Для визначення подібності генотипів картоплі за рівнем водоутримання та водовідновлювального потенціалу листя в умовах абіотичного стресу було проведено ієрархічну кластеризацію методом Уорда з використанням евклідової відстані. Аналіз базувався на середніх значеннях коефіцієнтів водоутримання (Кву) та водовідновлення (Квв), отриманих протягом двох років досліджень (2024–2025 рр.) за чотирма обліками упродовж вегетаційного періоду.

Загальна структура кластеризації. Результати кластерного аналізу (*рис. 3*) дозволили розподілити 45 досліджених генотипів на два чітко диференційовані кластери при Ward-відстані ≈ 16 :

Характеристика Кластеру II (оранжевий, n = 26) – група з вищими показниками водоутримання і водовідновлення. Це свідчить, що генотипи цього кластера відзначаються більш вираженою здатністю до акумуляції вологи в листкових тканинах та ефективнішими механізмами її відновлення після водного дефіциту;

Кластер II (зелений, n = 19) – група з помірними та зниженими показниками водного обміну.

Що може свідчити про знижену водоутримувальну здатність і менш виражену відновну реакцію після водного стресу порівняно з генотипами кластера I

Отже, кластеризація виявила дві відмінні стратегії регуляції водного балансу у досліджених сортів і гібридів.

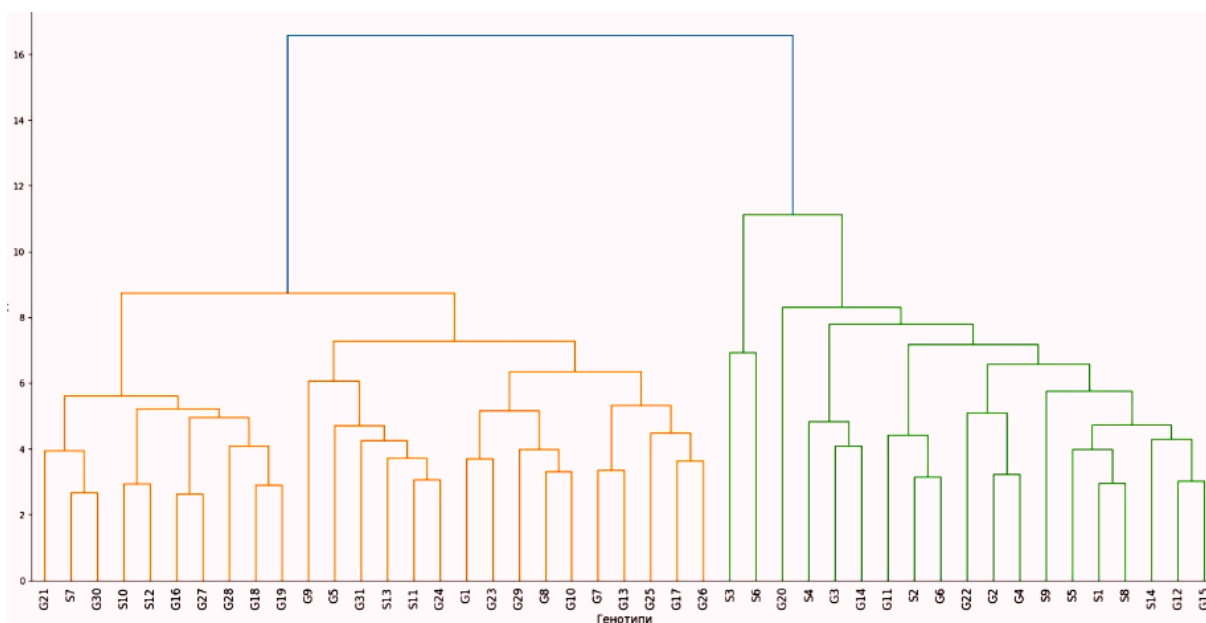


Рис. 3. Ієрархічна кластерна дендрограма сортів і гібридів картоплі за середніми значеннями коефіцієнтів водоутримання (Кву) і водовідновлення (Квв) за обліками 2024–2025 рр. (метод Уорда, евклідова відстань)
Примітки: Характеристика Кластеру I (оранжевий): середній Кву = $69,7 \pm 1,9$ % (CV = 2,7 %), середній

Підкластер 1 (стабільного водного балансу) увійшли генотипи: G21 (П.17.20-13), S7 (Базалія), G30 (П.18.51/3), S10 (Мирослава), S12 (Летана), G16 (П.17.28-2), G27 (П.18.78/1), G28 (Г.10.6/23), G18 (П.17.19-26), G19 (П.17.1-4). Середній Кву = $69,7 \pm 1,7$ % (CV=2,4 %); середній Квв = $95,1 \pm 1,8$ % (CV=1,9 %). Генотипи з мінімальною варіабельністю, які можна вважати еталонними для селекції на стабільність водного режиму;

Підкластер 2 (оптимізованого водовідновлення): G9 (П.14.3/5), G5 (П.17.24-26), G31 (П.13.42/3), S13 (Джавеліна), S11 (Житниця), G24 (З.16.59-10). Середній Кву = $69,4 \pm 1,5$ % (CV=2,2 %); середній Квв = $97,3 \pm 1,7$ % (CV=1,8 %). Вирізняється найвищим рівнем водовідновлення та низькою варіабельністю ознак, що є показником ефективної адаптивної реакції;

Підкластер 3 (максимального водовідновлення): G1 (З.16.50-16), G23 (П.13.52-11), G29 (П.17.30-3), G8 (П.19.15-13), G10 (З.16.40/2) Середній Кву = $69,3 \pm 2,0$ % (CV=2,8 %); середній Квв = $100,6 \pm 1,7$ % (CV=1,7 %). Єдиний підкластер з показниками Квв понад 100 %, що свідчить про наявність

компенсаторних механізмів і високий адаптивний потенціал;

Підкластер 4 (підвищеної варіабельності): G7 (П.19.15-16), G13 (П.17.29/21), G25 (П.17.34/8), G17 (П.18.87/2), G26 (П.17.39/22). Середній Кву = $70,6 \pm 2,3$ % (CV=3,3 %); середній Квв = $99,8 \pm 3,5$ % (CV=3,5%). Має найвищі абсолютні значення, але зростаючу варіабельність, що може вказувати на складну генетичну детермінацію ознак;

Характеристика Кластеру II (зелений): середній Кву = $64,2 \pm 3,1$ % (CV=4,8 %), середній Квв = $91,3 \pm 2,8$ % (CV=3,1 %). Ця група генотипів може розглядатися як більш чутлива до абіотичного стресу, але водночас цікава для пошуку специфічних адаптивних механізмів.

Підкластер 5 (мінімального водоутримання): S3 (Взірець), S6 (Партнер). Середній Кву = $57,7 \pm 3,3$ % (CV=5,7 %); середній Квв = $88,9 \pm 2,5$ % (CV=2,8 %). Найнижчі показники серед усіх груп, що свідчить про підвищену вразливість до водного дефіциту;

Підкластер 6 (перехідної групи): S4 (Радомисль), G3 (П.16.16-9), G14 (П.17.13/7). Середній Кву = $65,2 \pm 2,2$ % (CV=3,3%); середній Квв = $92,4 \pm 2,8$ % (CV=3,0 %). Генотипи з проміжними значеннями, які можуть використовуватись як донори “балансованих” адаптивних ознак;

Підкластер 7 (високого Кву, помірного Квв): G11 (П.15.5/27), S2 (Тирас), G6 (П.17.44-1). Середній Кву = $70,0 \pm 0,4$ % (CV=0,5%); середній Квв = $91,0 \pm 2,6$ % (CV=2,9%). Генотипи зі стійким утриманням води, але відносно слабшим відновленням, що вказує на специфічну стратегію уникання стресу;

Підкластер 8 (збалансованої групи): G22 (З.14.64-2), G2 (П.17.38/4), G4 (П.17.20-3). Середній Кву = $64,8 \pm 1,0$ % (CV=1,6%); середній Квв = $93,0 \pm 3,5$ % (CV=3,7%). Генотипи зі збалансованим поєднанням ознак і прийнятним рівнем варіабельності;

Підкластер 9 (стабільні сорти за інтегральними водними показниками): S5 (Межирічка 11), S1 (Слаута), S8 (Опілля). Середній Кву = $63,9 \pm 1,7$ % (CV=2,7%); середній Квв = $92,8 \pm 1,9$ % (CV=2,1 %).

Підкласстер складається виключно з районуваних сортів вітчизняної селекції, що демонструють помірні, але фенотипічно стабільні показники водного обміну. Характерні значення відображають селекційні пріоритети попередніх програм, орієнтованих на компромісний баланс між адаптивними ознаками та господарсько-цінними характеристиками.

Підкласстер 10 (високої регенеративності): S14 (Дивина), G12 (П.15.56-10), G15 (П.17.38/16). Середній Кву = $65,5 \pm 1,9$ % (CV=2,9%); середній Квв = $94,7 \pm 0,3$ % (CV=0,3%). Генотипи з найнижчою варіабельністю Квв (CV=0,3%), що свідчить про генетично стабільну високу відновлювальну здатність.

Дивергентні генотипи: G20 (П.19.15/18): Кву = 62,6 %; Квв = 85,0 % і S9 (Світана): Кву = 63,3 %; Квв = 90,9 %. Ці генотипи характеризуються відносно високою здатністю до водоутримання, що статистично достовірно перевищує показники підкласстера мінімального водоутримання (S3, S6; Кву = $57,7 \pm 3,3$ %; ANOVA: $F=4,92$; $p<0,05$). Водночас вони демонструють найнижчі серед усіх представників Кластера II значення коефіцієнта водовідновлення (Квв = 85,0–90,9 %), що підтверджено результатами дисперсійного аналізу ($F=6,21$; $p<0,05$). Отже, генотипи G20 і S9 поєднують ефективну систему збереження води з одночасним обмеженням відновлювальної здатності за умов дефіциту вологості.

Висновки

1. 2024–2025 років за умов гострого водного дефіциту в період обліків у всіх групах стиглості зафіксовано закономірне зниження коефіцієнтів водоутримання (Кву) на 16–20 % та водовідновлення (Квв) на 15–30 % від бутонізації до фази накопичення бульб.

2. Реакція генотипів на водний стрес була диференційованою: у ранній групі сорти втрачали Кву на 19 % і Квв на 28 %, тоді як гібриди цієї групи проявили менше зниження (Кву $\approx$ 16 %, Квв $\approx$ 17 %), що вказує на кращу адаптивність гібридного матеріалу.

3. Середньоранні гібриди демонстрували більш стабільний водний режим порівняно із сортами: зниження Квв становило $\sim$ 20 % проти $\sim$ 23 % у сортів.

4. Середньостиглі гібриди вирізнялися найвищою загальною стійкістю – навіть у фазу інтенсивного накопичення продуктивності вони зберігали відносно високі показники (Кву $\approx$ 59 %, Квв $\approx$ 86 %), що свідчить про здатність підтримувати водний гомеостаз в умовах сильного стресу.

5. Кореляційний аналіз із гідротермічним коефіцієнтом (ГТК) показав позитивні залежності з варіацією по групах: у ранніх гібридів 2024 р. процеси водовідновлення тісно корелювали з ГТК ($r \approx 0,90$), середньоранні проявили помірні стабільні зв'язки, а середньостиглі сорти – найнижчі коефіцієнти, що відображає їхню відносну автономність від коливань зволоження.

6. У ранньостиглих генотипів гібридний матеріал переважав сортовий за абсолютними та стабільними

значеннями Кву і Квв; серед найперспективніших ранніх форм зазначені П.14.3/5, 3.16.50-16, П.17.44-1, П.19.15-16, П.17.24-26 і сорт Тирас.

7. Середньоранні гібриди П.15.56-10, П.17.29/21, П.17.38/16, П.15.5/27 та гібриди П.17.20-13, П.13.52-11 (поєднання високих початкових і кінцевих значень) відзначені як перспективні; серед сортів виділено Межирічка 11 і Опілля.

8. Середньостиглі форми загалом перевершували інші групи за показниками водного режиму; серед перспективних джерел адаптивних ознак виділено гібриди П.13.42/3, П.17.34/8, П.17.30-3, П.17.39/22, а також сорти Житниця, Мирослава та Летана.

9. Ієрархічна кластеризація 45 генотипів за Кву і Квв виявила дві основні групи (Кластер I: Кву = $69,7 \pm 1,9$ %, Квв = $98,2 \pm 2,4$ %; Кластер II: Кву = $64,2 \pm 3,1$ %, Квв = $91,3 \pm 2,8$ %) із внутрішньою структурою (10 підкласстерів, CV 0,3–5,7 %). Наявність генотипів із Квв > 100 % (G1 – 3.16.50-16; G23 – П.13.52-11; G29 – П.17.30-3; G8 – П.19.15-13; G10 – 3.16.40/2) та дивергентних форм (G20 – П.19.15/18, S9 – Світана) підкреслює різноманіття стратегій водного гомеостазу і їхню селекційну цінність.

10. Отримані результати підтверджують ефективність використання коефіцієнтів водоутримання та водовідновлення як надійних маркерів для класифікації генотипів картоплі за рівнем адаптації до водного стресу та можуть слугувати основою для подальших генетико-селекційних досліджень.

Конфлікт інтересів

Автори стверджують про відсутність конфлікту інтересів щодо їхнього викладу та результатів досліджень.

References

1. Nedostrelova, L., & Muzyka, T. (2024). Rating of changes in the temperature and humidity regimes of Zhytomyr under conditions of climate warming. *Ecological Sciences*, 2 (1 (52)), 105–113. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.2.20>
2. Shevchenko, O., & Balabukh, V. (2024). The impact of climate change on the natural and agricultural zoning of Ukraine. *Ecological Sciences*, 5 (56), 222–231. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.5-56.34>
3. Savchuk, O. I., Prymachuk, T. Ju., Shtan'ko, T. A., Mesh, K. V., Drebot, O. V., Kudryk, A. P., & Tsuman, N. V. (2025). Agroecological condition of soil cover of Zhytomyr region in the conditions of changes in climatic factors. *Visnyk Agrarnoi Nauky*, 103 (4), 65–74. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202504-07>
4. Yatsenko, V. V., & Yatsenko, N. V. (2025). Varietal characteristics of potato yield formation in different maturity groups in the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine. *Plant Varieties Studying and Protection*, 21 (2), 100–109. <https://doi.org/10.21498/2518-1017.21.2.2025.333457>
5. Obidiegwu, J. E. (2015). Coping with drought: stress and adaptive responses in potato and perspectives for improvement. *Frontiers in Plant Science*, 6, 542. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00542>
6. Gervais, T., Creelman, A., Li, X.-Q., Bizimungu, B., De Koeijer, D., & Dahal, K. (2021). Potato response to drought stress: Physiological and growth basis. *Frontiers in Plant Science*, 12, 698060. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.698060>
7. Li, S., Kupriyanovich, Y., Wagg, C., Zheng, F., & Hann, S. (2023). Water deficit duration affects potato plant growth, yield and tuber quality. *Agriculture*, 13 (10), 2007. <https://doi.org/10.3390/agriculture13102007>
8. Li, Q., Li, H., Zhang, L., Zhang, S., & Chen, Y. (2018). Mulching improves yield and water-use efficiency of potato cropping in China: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 221, 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.02.017>

9. Wagg, C., Hann, S., Kupriyanovich, Y., & Li, S. (2021). Timing of short period water stress determines potato plant growth, yield and tuber quality. *Agricultural Water Management*, 247, 106731. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106731>
10. Li, Y., Tang, J., Wang, J., Zhao, G., Yu, Q., Wang, Y., Hu, Q., Zhang, J., Pan, Z., Pan, X., & Xiao, D. (2022). Diverging water-saving potential across China's potato planting regions. *European Journal of Agronomy*, 134, 126450. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126450>
11. Jacques, M. M., Gumiere, S. J., Gallichand, J., Celicourt, P., & Gumiere, T. (2020). Impacts of water stress severity and duration on potato photosynthetic activity and yields. *Frontiers in Agronomy*, 2, 590312. <https://doi.org/10.3389/fagro.2020.590312>
12. Zhang, L. L., Shi, Y., Qi, X., Wang, Q. X., & Cui, L. (2015). Effects of drought stress on the ultrastructure and physiological indexes of leaf cells in three potato varieties. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 33, 75–80.
13. Martínez-Romero, A., Domínguez, A., & Landeras, G. (2019). Regulated deficit irrigation strategies for different potato cultivars under continental Mediterranean-Atlantic conditions. *Agricultural Water Management*, 216, 164–176. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.030>
14. Greenwood, D. J., Zhang, K., Hilton, H. W., & Thompson, A. J. (2009). Opportunities for improving irrigation efficiency with quantitative models, soil water sensors and wireless technology. *The Journal of Agricultural Science*, 148 (1), 1–16. <https://doi.org/10.1017/S0021859609990487>
15. Nasir, M. W., & Toth, Z. (2022). Effect of drought stress on potato production: A review. *Agronomy*, 12 (3), 635. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030635>
16. Verbeke, S., Padilla-Díaz, C. M., Haesaert, G., & Steppe, K. (2022). Osmotic adjustment in wheat (*Triticum aestivum* L.) during pre- and post-anthesis drought. *Frontiers in Plant Science*, 13, 775652. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.775652>
17. Elsayed, S., El-Hendawy, S., Dewir, Y. H., Schmidhalter, U., Ibrahim, H. H., Ibrahim, M. M., Elsherbiny, O., & Farouk, M. (2021). Estimating the leaf water status and grain yield of wheat under different irrigation regimes using optimized two- and three-band hyperspectral indices and multivariate regression models. *Water*, 13 (19), 2666. <https://doi.org/10.3390/w13192666>
18. Soltys-Kalina, D., Plich, J., Strzelczyk-Żyta, D., Śliwka, J., & Marczewski, W. (2016). The effect of drought stress on the leaf relative water content and tuber yield of a half-sib family of 'Katahdin'-derived potato cultivars. *Breeding Science*, 66 (2), 328–331. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.66.328>
19. Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. In *Sustainable Agriculture*. (pp. 153–188). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_12
20. Saravia, D., Farfán-Vignolo, E. R., Gutiérrez, R., De Mendiburu, F., Schafleitner, R., Bonierbale, M., & Khan, M. A. (2016). Yield and physiological response of potatoes indicate different strategies to cope with drought stress and nitrogen fertilization. *American Journal of Potato Research*, 93 (3), 288–295. <https://doi.org/10.1007/s12230-016-9505-9>
21. Hill, D., Nelson, D., Hammond, J., & Bell, L. (2021). Morphophysiology of potato (*Solanum tuberosum*) in response to drought stress: Paving the way forward. *Frontiers in Plant Science*, 11, 597554. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.597554>
22. Zhang, P., Yang, X., Manevski, K., Li, S., Wei, Z., Andersen, M. N., & Liu, F. (2022). Physiological and growth responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) to air temperature and relative humidity under soil water deficits. *Plants*, 11 (9), 1126. <https://doi.org/10.3390/plants11091126>
23. Fang, G., Yang, S., Ruan, B., Ye, G., He, M., Su, W., Zhou, Y., Wang, J., & Yang, S. (2024). Research progress on physiological, biochemical, and molecular mechanisms of potato in response to drought and high temperature. *Horticulturae*, 10 (8), 827. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10080827>
24. Cabello, R., Monneveux, P., De Mendiburu, F., & Bonierbale, M. (2013). Comparison of yield based drought tolerance indices in improved varieties, genetic stocks and landraces of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Euphytica*, 193 (2), 147–156. <https://doi.org/10.1007/s10681-013-0887-1>
25. Martínez, I., Muñoz, M., Acuña, I., & Uribe, M. (2021). Evaluating the drought tolerance of seven potato varieties on volcanic ash soils in a medium-term trial. *Frontiers in Plant Science*, 12, 693060. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.693060>
26. Pysarenko, N. V., Sydorchuk, V. I., Zakharchuk, N. V., & Oliinyk, T. M. (2023). Evaluation of potato varieties for drought resistance in the conditions of the Central Polissya of Ukraine. *Ahrarni Innovatsii*, 17, 186–196. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.17.27>
27. Rosytska, N. V. (2015). Adaptivna reaktsiia roslyn riznykh zhyttievych form za umovy posukhy / *Extended abstract of candidate's thesis*. Instytut ahroekolohii i pryrodokorystuvannia, Kyiv [in Ukrainian]
28. Oliinyk, T. M., Sidakova, O. V., Zakharchuk, N. A., & Symonenko, N. V. (2017). Studying the potential of the initial potato material with the aim of breeding for drought resistance. *Plant Varieties Studying and Protection*, 13 (4), 361–366. <https://doi.org/10.21498/2518-1017.13.4.2017.117733>
29. Sydorchuk, V. I., & Pysarenko, N. V. (2021). Vyvchennia sortiv ta perspektyvnykh hibrydiv kartopli na posukhostiikist. «Honcharivski chytannia»: Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, prysviachenoi 92-richchiu z dnia narodzhennia doktora silskohospodarskykh nauk, profesora Honcharova Mykola Dem'ianovycha (25-travnia 2021 r.). (pp. 62–65). Sumy: Sumskiy natsionalnyi ahraryni universytet [in Ukrainian]
30. Pysarenko, N. V., Sydorchuk, V. I., & Zakharchuk, N. A. (2021). Study of resistance of potato varieties to drought in the conditions of the Central Polissya of Ukraine. *Agriculture and Plant Sciences: Theory and Practice*, 2, 91–97. <https://doi.org/10.54651/agri.2021.02.12>
31. Pysarenko, N. V., Sydorchuk, V. I., & Zakharchuk, N. A. (2024). Evaluation of potato varieties for drought tolerance, ecological plasticity, adaptability, and consumer qualities at early stages of cultivation. *Vegetable and Melon Growing*, 74, 19–32. <https://doi.org/10.32717/0131-0062-2023-74-19-32>
32. Hryhoriuk, I. P., Tkachov, V. I., Nyzhnyk, T. P., Mytsko, V. M., & Voitseshyna, N. I. (2002). Patent na vynakhid No 45055 A. Sposib otsinky stiikosti sortiv kartopli do posukhy. Retrieved from: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/354825/> [in Ukrainian]
33. Polevoy, A., Barsukova, O., Husieva, K., Zhygailo, O., Volvach, O., Kyrnasivska, N., Tolmachova, A., Zhygailo, T., Danilova, N., & Kostukievych, T. (2024). The climate change impact on the development of droughts in Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*, 25 (6), 194–205. <https://doi.org/10.12911/22998993/187276>
34. Blum, A. (2011). Plant breeding for water-limited environments. New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7491-4>
35. Romero, A. P., Alarcón, A., Valbuena, R. I., & Galeano, C. H. (2017). Physiological assessment of water stress in potato using spectral information. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1608. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01608>
36. Shi, S., Fan, M., Iwama, K., Li, F., Zhang, Z., & Jia, L. (2015). Physiological basis of drought tolerance in potato grown under long-term water deficiency. *International Journal of Plant Production*, 9 (2), 305–320.
37. Monneveux, P., Ramírez, D. A., & Pino, M.-T. (2013). Drought tolerance in potato (*S. tuberosum* L.). *Plant Science*, 205–206, 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2013.01.011>
38. Lal, M. K., Tiwari, R. K., Kumar, A., Dey, A., Kumar, R., Kumar, D., Jaiswal, A., Changan, S. S., Raigond, P., Dutt, S., Luthra, S. K., Mandal, S., Singh, M. P., Paul, V., & Singh, B. (2022). Mechanistic Concept of physiological, biochemical, and molecular responses of the potato crop to heat and drought stress. *Plants*, 11 (21), 2857. <https://doi.org/10.3390/plants11212857>
39. Alvarez-Morezuelas, A., Barandalla, L., Ritter, E., Lacuesta, M., & Ruiz de Galarreta, J. I. (2022). Physiological response and yield components under greenhouse drought stress conditions in potato. *Journal of Plant Physiology*, 278, 153790. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2022.153790>
40. Aliche, E. B., Gengler, T., Hoendervangers, I., Oortwijn, M., Bachem, C. W. B., Borm, T., Visser, R. G. F., & van der Linden, C. G. (2021). Transcriptomic responses of potato to drought stress. *Potato Research*, 65 (2), 289–305. <https://doi.org/10.1007/s11540-021-09527-8>

41. Cabello, R., De Mendiburu, F., Bonierbale, M., Monneveux, P., Roca, W., & Chujoy, E. (2012). Large-scale evaluation of potato improved varieties, genetic stocks and landraces for drought tolerance. *American Journal of Potato Research*, 89 (5), 400–410. <https://doi.org/10.1007/s12230-012-9260-5>
42. Schafleitner, R., Gutierrez Rosales, R. O., Gaudin, A., Alvarado Aliaga, C. A., Martinez, G. N., Tincopa Marca, L. R., Bolivar, L. A., Delgado, F. M., Simon, R., & Bonierbale, M. (2007). Capturing candidate drought tolerance traits in two native Andean potato clones by transcription profiling of field grown plants under water stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 45 (9), 673–690. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2007.06.003>

ORCID

N. Pysarenko 
 M. Furdyha 
 N. Zakharchuk 
 V. Hordienko 

<https://orcid.org/0000-0001-6299-2170>
<https://orcid.org/0000-0002-9398-0487>
<https://orcid.org/0000-0002-8194-2491>
<https://orcid.org/0000-0003-0407-1474>



2025 by the author(s). This is an open-access article distributed under the Creative Commons Attribution License <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.