
ЗМІНА КЛІМАТУ

УДК 633.11:631.524.85

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.2-29.2.24>

ІНДЕКСНИЙ ПІДХІД ДЛЯ ДОБОРУ ПОСУХОСТІЙКИХ СОРТІВ ПШЕНИЦІ В УМОВАХ НЕСТІЙКОГО КЛІМАТУ

Пикало С.В., Демидов О.А., Юрченко Т.В.,
Хоменко С.О., Гуменюк О.В., Харченко М.В.

Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла
Національної академії аграрних наук України
с. Центральне, 08853, Миронівський р-н, Київська область
pykserg@ukr.net

Пшениця є одним із найцінніших злаків планети та відіграє провідну роль у харчовому забезпеченні людства. Ареал пшениці дуже великий, оскільки культивують її на п'яти континентах світу у 184 країнах. Генетичне вдосконалення пшениці має вирішальне значення через її безпосередній вплив на економічний розвиток, міжнародну торгівлю зерном та продовольчу безпеку країни, тому актуальність досліджень у вирішенні багатьох генетико-селекційних задач стосовно цієї культури зростає і набуває якісно нового характеру. Збільшення урожайності є найбільш важливим критерієм у вирощуванні будь-яких сільськогосподарських культур, зокрема пшениці. Посуха – один із найголовніших обмежуючих чинників довкілля, що знижують продуктивність рослин. Щоб гарантувати сільське господарство від втрат у посушливі роки, необхідно мати стійкі до дефіциту вологи сорти. Саме тому одним із пріоритетних напрямів селекції пшениці є створення сортів, толерантних до дії водного дефіциту. У загальній проблемі дослідження адаптивних можливостей пшениці важливе значення мають питання оцінки її посухостійкості. Проведення досліджень з оцінки генотипів на стійкість до водного стресу є однією з умов підвищення ефективності селекційного процесу даної культури. Найбільш повним та об'єктивним показником стійкості рослини до посухи вважається її урожайність за умов водного дефіциту. З метою вивчення сортів за реакцією на посуху широко використовується індексний підхід, який базується як на стійкості, так і на чутливості генотипів до водного стресу. Індекси посухостійкості, які враховують рівень втрати урожаю під впливом посухи порівняно з оптимальними умовами, на сьогодні широко використовуються багатьма вченими світу. Результати, отримані в ході аналізу літературних даних, свідчать, що визначення селекційної цінності сортів пшениці за індексами посухостійкості в умовах наростання водного дефіциту або підвищення температури дає можливість об'єктивно характеризувати рівень їх адаптивності і прогнозувати їхню поведінку у відповідних екологічних умовах. *Ключові слова:* пшениця, сорти, посухостійкість, індекси, селекційна цінність, добір.

Index method for selection of drought tolerant wheat varieties in unstable climate conditions. Pykalo S., Demydov O., Yurchenko T., Khomenko S., Humeniuk O., Kharchenko M.

Wheat is one of the most valuable cereals on the planet and plays a leading role in the food supply of mankind. The range of wheat is very large, since it is cultivated on five continents in 184 countries. The genetic improvement of wheat is crucial because of its direct impact on the economic development, international grain trade and food security of the country, so the relevance of research in solving many genetic-breeding problems regarding this crop is growing and acquires a qualitatively new character. The increase in productivity is the most important criterion in the cultivation of any crops, in particular wheat. Drought is one of the main limiting environmental factors that reduce plant productivity. In order to guarantee agriculture from losses in dry years, it is necessary to have varieties resistant to moisture deficiency. That is why one of the priority areas of wheat breeding is the creation of varieties tolerant to the action of water deficiency. Questions drought tolerance evaluation are important in the general problem of investigating its adaptive capacity. Conducting research on the assessment of genotypes for resistance to water stress is one of the conditions for increasing the efficiency of the breeding process of this culture. Plant yield in conditions of water deficit is considered the most complete and objective indicator of its drought tolerance. An index approach based on both tolerance and sensitivity of genotypes to water stress is widely used to study varieties for drought response. Drought resistance indices, which take into account the level of crop loss under the drought effect compared to optimal conditions, are now widely used by many scientists in the world. The results obtained in the analysis of literature data, found that determination of breeding value of wheat varieties by drought tolerance indices in conditions of increasing water deficit or temperature increase makes it possible to objectively characterize the level of adaptability of promising genotypes and predict their behavior in appropriate environmental conditions. *Key words:* wheat, varieties, drought tolerance, indices, breeding value, selection.

Постановка проблеми. Пшениця займає чільне місце серед зернових культур у всьому світі і є головним продовольчим продуктом приблизно для 35% населення земної кулі та забезпечує близько 20% потреб людства в енергії [1]. Ця культура також займає перше місце в світі за посівними площами (біля 230 млн га) і валовим збором зерна

(понад 766,4 млн т) [2]. Поширеність цієї культури зумовлена її високою біологічною пластичністю щодо екологічних умов і насамперед високою поживністю зерна, з якого отримують багато харчових продуктів [3; 4].

Генетичний потенціал вітчизняних сортів м'якої пшениці знаходиться в межах 11–14 т/га, проте

у виробничих умовах реалізується лише 45% [5]. За даними науковців України, лише в окремих господарствах сорти пшениці озимої реалізують свою потенційну врожайність до 85 % [4, 6, 7]. Сьогодні сорт у виробництві є біологічним фундаментом, що дає можливість використовувати всі фактори інтенсифікації задля одержання максимально можливого врожаю зерна високої якості. Кожен сорт є унікальним і неповторним за сукупністю генів, тобто за генотипом [5]. Разом з тим є багато чинників, які не дозволяють повною мірою реалізувати їх детермінований спадковий потенціал. Сорт, як відкрита біологічна система, у польових умовах завжди буде піддаватися дії нерегульованих абіотичних і біотичних факторів середовища [5]. Тому на сучасному етапі розвитку аграрного сектора особливо гостро постає проблема забезпечення достатнього сортового різноманіття. Неприятливі фактори щодо вирощування сільськогосподарських культур, зумовлені глобальними змінами клімату, висувають надзвичайно важливе завдання – створення нових сортів із високим генетичним потенціалом продуктивності та адаптивності для одержання стабільних валових зборів зерна [8]. Зважаючи на це, одним із пріоритетних напрямів генетики, селекції та біотехнології є створення сортів пшениці, толерантних до несприятливих екологічних чинників довкілля – посухи, екстремальних температур, засолення, забруднення іонами токсичних металів.

Як відомо, серед різноманітних сортів пшениці озимої лише деякі з них формують відносно стабільні врожаї в розрізі різних років і зон вирощування [9]. Переважна їх частина досить чутлива до екстремальних умов довкілля, тому різко знижується рівень можливого врожаю. Здатність давати високі та сталі врожаї прямо залежить від адаптивного потенціалу рослин [10]. Формування урожаю – складне багатоступінчасте явище, в якому бере участь багато залежних один від одного генетично детермінованих фотофізичних, фотохімічних і фізіолого-біохімічних процесів на всіх етапах органогенезу, що перебувають у тісній взаємодії з комплексом зовнішніх факторів [5]. Однак створений селекційний матеріал, адаптований до різних екологічних умов вирощування, має оцінюватися не лише за потенціалом урожайності, але й за параметрами пластичності та стабільності [11; 12]. Як відзначає П.М. Василюк [13], нині серед новозареєстрованих переважають високоінтенсивні та інтенсивні сорти й обмаль пластичних, що призводить до звуження сортового різноманіття, втрати екологічної пластичності й адаптивності і, як наслідок, до дестабілізації урожайності за роками. G. Wricke [14] вважає, що найбільш адаптовані ті генотипи, які мають мінімальну взаємодію з середовищем або високу стабільну реакцію ознаки, властиву генотипу. K.W. Finley та J.N. Wilkinson вважають оптимальним той сортозразок, який характеризується високою загальною адаптивною здатністю

та дає найбільший врожай у сприятливих умовах середовища, тим самим забезпечуючи максимальну стабільність у несприятливих умовах [15]. Тобто під час створення сортів та гібридів важливо оцінити їх гомеостатичність, що базується на широкій нормі реакції, високому ступеню пластичності, а також на значному рівні адаптивного потенціалу [12; 15]. А.Ф. Звягін та співавтори [16] зазначають, що не існує форм, які поєднували б одночасно високу стійкість до стресових факторів і високу продуктивність. Однак селекційний досвід свідчить, що негативна кореляція між стресостійкістю та врожайністю не абсолютна, а тому дає можливість для оптимального поєднання в одному генотипі цих цінних господарських ознак. Тому створення адаптивних сортів пшениці із принципово новими характеристиками, їх здатність забезпечувати високу і стійку продуктивність за екстремальних умов довкілля – першочергове завдання, яке ставлять перед собою більшість селекціонерів.

Серед усіх природних чинників, які найбільш негативно впливають на фізіологічні процеси росту і розвитку рослин пшениці та призводять до зниження урожаю, є водний дефіцит, спричинений посухою [17; 18]. За даними Н.С. Єрмоленко [19], в останні роки 20-го століття та в останнє десятиліття частка посушливих явищ на території України, як і загалом у Європі, помітно зросла, а тому все більшої актуальності набуває питання боротьби з цим негативним явищем [20]. Відомо, що нестача води в ґрунті завдає значно більшої шкоди рослинництву, ніж всі інші стресові фактори разом [18]. Шкідлива дія посухи полягає передусім у зневодненні та порушенні метаболічних процесів у рослинах, що призводить до розпаду білків, зміни колоїдно-хімічного стану цитоплазми клітини і, як наслідок, до зниження кількості накопиченої рослинами органічної речовини [17; 21]. Посуха може також спровокувати засолення ґрунтів [18]. Стрес, викликаний водним дефіцитом, може бути первинним у разі посухи, а також вторинним у разі сольового стресу [18; 22]. Очікується, що з прогресуючим глобальним потеплінням клімату періодичність повторення посух по роках буде тільки посилюватися [23].

Реакція рослин на водний стрес залежить від кількох факторів, таких як стадія розвитку, ступінь тяжкості та тривалості стресу, а також генетичні особливості сорту [5; 8; 24]. Дослідники із CIMMYT розширили поняття про посухостійкість як відношення урожаю в однакових умовах посухи у різних сортів і запропонували розглядати його на генетичному рівні [25]. У вирішенні проблеми посухостійкості адаптивний сорт є найдешевшим і доступним засобом підвищення врожайності за умов водного дефіциту [5; 26]. Тому для стабільного отримання зернової продукції і для селекції загалом суттєве значення має добір генотипів пшениці, здатних переносити дефіцит вологи в ґрунті. Селекція пшениці на посухостійкість є визначальною передумовою для підви-

щення її пластичності й продуктивності та дає змогу розширити посіви цієї культури у районах із несприятливими кліматичними умовами [22; 27]. Хоча це завдання сьогодні сформувався як самостійний напрям селекції, що володіє широким арсеналом методів і прийомів, лишається багато неясного як в загальнотеоретичних положеннях, так і в окремих питаннях, пов'язаних з біологічними особливостями рослин [20]. Селекція на посухостійкість спирається на результати досліджень щодо закономірностей і механізмів формування адаптивних реакцій, визначення морфо-анатомічних та фізіолого-біохімічних показників, що забезпечують стійкість рослин до посухи [20; 28]. Успіх селекції пшениці на стійкість до водного дефіциту значною мірою залежить від правильної оцінки цієї ознаки у створюваних сортів. Тому методологічне забезпечення всебічного дослідження біологічної та агрономічної посухостійкості рослин цієї культури є пріоритетним завданням багатьох селекційних установ України [29]. Дослідження, спрямовані на розв'язання цієї проблеми, є актуальними і значимими, оскільки орієнтовані на розвиток розуміння реакцій рослин на посуху та широке впровадження нових методів для вирішення прикладних завдань селекції пшениці.

Виклад основного матеріалу. Для прискорення селекційного процесу пшениці та отримання достовірних результатів необхідно застосовувати надійні методики дослідження зразків за конкретними ознаками стійкості. Вивчення змін фізіолого-біохімічного стану рослин в умовах посухи та з'ясування механізмів резистентності дозволило фізіологам запропонувати численні методи оцінки посухостійкості на основі визначення водного статусу рослин, ефективності функціонування фотосинтетичного апарату, транспортної системи, системи перерозподілу асимілятів та неспецифічних адаптивних реакцій при субоптимальних режимах температур і вологозабезпечення [20; 30; 31]. Оскільки безпосередня оцінка рівня агрономічної стійкості рослин до посухи є тривалим та трудомістким завданням, в селекційній та інтродукційній практиці широко використовуються непрямі лабораторні методи оцінки біологічної стійкості за фізіологічними, анатомічними, морфологічними та біохімічними показниками [31; 32]. Ці підходи полягають у використанні не самої стійкості до нестачі вологи, а будь-якої іншої біологічної властивості, що пов'язана з цією ознакою. На цей час існує ціла низка непрямих методів оцінки посухостійкості рослин пшениці [30–35].

Проте достовірність оцінки тим чи іншим методом залежить від того, наскільки сильно корелює з істинною стійкістю рослин фізіологічна ознака, що лежить в основі цього діагностичного способу [34; 35]. Далеко не завжди результати оцінки посухостійкості селекційних зразків лабораторними методами співпадають з польовими. Тому в селекційній практиці зернових культур сьогодні широко

використовують спосіб оцінки стійкості генотипів до посухи, що заснований на проведенні саме польових дослідів [36]. При цьому враховуються і оцінюються особливості росту та розвитку досліджуваних рослин, а також їх продуктивність в умовах водного дефіциту [37; 38]. У разі настання посухи на рівні цілої рослини враховують такі параметри, як швидкість і ступінь втрати тургору, ступінь відмирання листя, глибина залягання коріння, товщина кутикули, зміна контролю змикання продихів тощо [39–41]. В.О. Зикін зі співавторами [39] запропонували методику, згідно з якою рівень посухостійкості пшениці в польових умовах визначають за ростовими процесами рослин, використовуючи цифрову шкалу: 1 – дуже низька (повна загибель); 3 – низька (рослини сильно пригнічені); 5 – середня (рослини пригнічені, тільки верхні два листка зелені); 7 – висока (слабке пошкодження рослини, нижній ярус листя всох); 9 – дуже висока (листя зелене).

Найбільш повним та об'єктивним показником стійкості рослини до посухи вважається її урожайність за умов водного дефіциту. Для виявлення посухостійких форм у польових умовах запропоновано кілька критеріїв відбору, що передбачають визначення врожайності зерна у стресових і нестресових умовах – стійкість і сприйнятливість генотипів до дії водного дефіциту [42; 43]. При цьому кількісною мірою посухостійкості вважається ступінь зниження продуктивності в екстремальних умовах, порівняно з оптимальними умовами росту [44]. Згідно з класифікацією G.C.J. Fernandez [45] генотипи, залежно від їх урожайності за стресових та оптимальних умов, поділяються на чотири групи: 1) генотипи, які демонструють перевагу за обох умов; 2) генотипи, що мають високі показники лише за оптимальних умов; 3) генотипи, які є ліпшими лише за стресових умов; 4) генотипи з негативними властивостями як за стресових, так і за оптимальних умов. Варто зазначити, що посухостійкість рослин є відносною характеристикою, тому для її визначення у селекційній практиці досить часто використовують сорти-класифікатори [26].

З метою вивчення сортів за реакцією на посуху нині вітчизняними та зарубіжними вченими широко використовується індексний підхід, який базується як на стійкості, так і на чутливості зразків до водного стресу. Індеси посухостійкості, які враховують рівень втрати урожаю під впливом посухи порівняно з оптимальними умовами, використовують для відбору посухостійких форм [20, 46–48]. Це показники, що всебічно характеризують ступінь зниження врожайності рослин на фоні посухи порівняно зі звичайним фоном. Визначення селекційної цінності сортів пшениці за індексами посухостійкості в умовах наростання водного дефіциту або підвищення температури дає можливість об'єктивно характеризувати рівень їх адаптивності і прогнозувати їхню поведінку у відповідних екологічних умовах. В літе-

ратурі описана велика кількість індексів посухостійкості, які широко застосовуються на різних культурах [20, 46–50]. Різні дослідники порівнювали ці показники між собою та вивчали їх генетичні параметри [45, 46, 48]. Перелік найбільш використовуваних індексів, а також формули їх визначення наведені у таблиці.

R.A. Fisher і R. Maurer [51] запропонували індекс сприйнятливості до стресу (SSI) у зернових культур, який характеризує рівень чутливості сортозразка до різних стресових факторів, зокрема посухи. Цей показник дає змогу оцінити відносну сприйнятливості кожного генотипу в досліджуваному наборі, тому чим він менший, тим більший рівень посухостійкості зразка.

J.M. Clarke зі співавторами [52], використовуючи SSI, виявили значні відмінності за цим показником по роках та ранжували генотипи пшениці за посухостійкістю. На прикладі ярої пшениці M.J. Guttieri та співавтори [53] встановили, що при $SSI > 1$ сорти мають сприйнятливості до посухи на рівні вище середньої.

G.C.J. Fernandez [45] представив розширений показник під назвою індекс толерантності до стресу (STI), який використовується для ідентифікації генотипів з високим рівнем урожайності як в стресових, так і в оптимальних умовах. Цей показник характеризує здатність зразка утримувати стабільний рівень урожайності незалежно від стресових факторів. Різні автори використовували індекс толерантності до стресу для визначення стійкості до посухи у сортів пшениці з високою врожайністю [43, 47, 48]. E. Farshadfar та J. Sutka [54] запропонували модифі-

кований індекс толерантності до стресу (MSTI), скорегувавши STI як масу.

A.A. Rosielle та J. Hamblin [55] запропонували такі індекси, як толерантність (TOL) – різницю в урожайності між стресовими і нестресовими умовами, і середню продуктивність (MP) – середню урожайність генотипів в стресових і оптимальних умовах. Показник TOL вказує на втрату урожайності під впливом посухи в абсолютних одиницях, а більші його значення демонструють сприйнятливості до водного стресу. Середня продуктивність MP характеризує потенційну урожайність генотипу у посушливі та оптимальні роки [55]. Максимальні значення MP та STI характеризують високу селекційну цінність генотипів, про що свідчать численні дослідження [44; 46; 56; 57].

Індекс стабільності урожаю (YSI) було запропоновано M. Bouslama і W.T. Scharaugh [58] для оцінки посухостійкості зразків сої. Цей показник визначається як відношення урожайності в умовах стресу до урожайності в оптимальних умовах. Застосування індексів TOL та YSI передбачає, що генотипи, відібрані на їх основі, матимуть бажану селекційну цінність як в стресових, так і в оптимальних умовах [59]. P. Gavuzzi та співавтори [37] для аналізу зернових культур запровадили індекс урожайності в стресових умовах (YI), який визначається відношенням урожайності сорту під впливом стресового чинника до середньої урожайності вивчених генотипів в аналогічних умовах.

H. Ullah та співавтори [60] виявили сильну позитивну кореляцію у сортів пшениці між індексами MP, TOL, STI та кількістю колосків в колосі, масою

Таблиця 1

Індекси посухостійкості та формули для їх визначення

Назва індексу	Формула
Індекс сприйнятливості до посухи (SSI) [51]	$SSI = (1 - Y_s/Y_p)/(1 - \bar{Y}_s/\bar{Y}_p)$
Індекс толерантності до стресу (STI) [45]	$STI = (Y_p \times Y_s)/(\bar{Y}_p)^2$
Середня урожайність (MP) [55]	$MP = (Y_p + Y_s)/2$
Індекс стабільності урожаю (YSI) [58]	$YSI = Y_s/Y_p$
Індекс урожайності (YI) [37]	$YI = Y_s/\bar{Y}_s \times 100$
Толерантність (TOL) [55]	$TOL = Y_p - Y_s$
Середнє геометричне урожайності (GMP) [45]	$GMP = \sqrt{(Y_p \times Y_s)}$
Середня гармонійна (HM) [66]	$HM = 2(Y_p \times Y_s)/(Y_p + Y_s)$
Модифікований індекс толерантності до стресу (MSTI) [54]	$MSTI = K_1 \times STI$, $K_1 = Y_p^2/\bar{Y}_p^2$, $K_2 = Y_s^2/\bar{Y}_s^2$
Індекс посухостійкості (DI) [62]	$DI = [Y_s \times (Y_s/Y_p)]/\bar{Y}_s$
Відносний індекс посухи (RDI) [70]	$RDI = (Y_s/Y_p)/(\bar{Y}_s/\bar{Y}_p)$
Процентний індекс сприйнятливості до стресу (SSPI) [64]	$SSPI = [(Y_p - Y_s)/(2\bar{Y}_p)] \times 100$
Індекс продуктивності в стресових і сприятливих умовах (SNPI) [64]	$SNPI = \sqrt[3]{(Y_p + Y_s)/(Y_p - Y_s)} \times \sqrt[3]{(Y_p \times Y_s \times Y_s)}$
Індекс толерантності до абіотичного стресу (ATI) [64]	$ATI = [(Y_p - Y_s)/(\bar{Y}_p/\bar{Y}_s)] \times \sqrt{(Y_p \times Y_s)}$
Індекс зниження урожайності (YRR) [67]	$YRR = 1 - Y_s/Y_p$

Примітка: Y_s – урожайність сорту під впливом посухи; Y_p – урожайність сорту в оптимальних умовах; \bar{Y}_s – середня урожайність всіх сортів під впливом посухи; \bar{Y}_p – середня урожайність всіх сортів в оптимальних умовах; K_1, K_2 – коригуючі коефіцієнти.

1 000 зерен, урожайністю в умовах посухи. Вченими показано, що індекси MP та STI є досить ефективними для відбору цінних сортів та представляють однакове ранжування генотипів за посухостійкістю. Селекція ж на основі індексу TOL виявилася досить ефективною для добору стресостійких сортів, проте з нижчою урожайністю. Автори підсумували, що для пошуку генотипів з максимальною селекційною цінністю найвагоміше значення мають індекси MP, STI, TOL, YI та YSI.

R.A. Fischer та співавтори [61] припустили, що відносний індекс посухи (RDI) є достовірним показником для визначення стресостійкості сортів. J. Lan [62] запропонував індекс посухостійкості (DI), який застосовується для визначення генотипів з високою врожайністю як за стресових умов, так і оптимальних. Середня геометрична продуктивності (GMP) часто використовується селекціонерами, зацікавленими у відносній продуктивності, оскільки стрес, спричинений посухою, може варіювати за ступенем тяжкості протягом багатьох років [45]. У наших дослідженнях за максимальним та мінімальним значенням цього індексу виділились ті ж сорти пшениці, що й за STI [63].

S.S. Moosavi та співавтори [64] для скринінгу посухостійких генотипів у стресових та нестресових умовах запровадили процентний індекс сприйнятливості до стресу (SSPI), індекс продуктивності в стресових і сприятливих умовах (SNPI) та індекс толерантності до абіотичного стресу (ATI). Слід зауважити, що індекси SSPI, SNPI та ATI у селекційній практиці сільськогосподарських культур та, зокрема, пшениці використовуються порівняно нечасто.

A. Mehrahan та співавтори [44] на прикладі сортів м'якої пшениці виявили суттєві позитивні кореляції між урожайністю зерна за стресових умов (Ys) та індексами STI, GMP, MP, HM, а також між урожайністю за оптимальних умов (Yp) та індексами STI, MP, GMP, TOL, HM, SSI. Водночас було виявлено значний зворотний зв'язок між показниками Yp та YSI, DI. Результати дослідження засвідчили, що індекси STI, GMP, MP та HM є найбільш придатними для скринінгу посухостійких сортів. GGE biplot аналіз показав, що продуктивність сортів Kohdasht, Aftab та Gaboss менш стабільна порівняно з сортами Dehdasht, Zagros, Karim, Shirodi, Chmran та Seymareh, які відрізнялися високою стійкістю до водного дефіциту. Автори підсумували, що сорти Chmran та Shirodi мають найвищу селекційну цінність як вихідний матеріал для подальшої селекції пшениці.

B. Mickky та співавтори [65] у своїх дослідженнях на основі значень YSI, RDI, TOL, SSI та YRR методом кластерного аналізу ранжували сорти пшениці на 3 групи залежно від рівня їх посухостійкості: 1) сприйнятливі (Shandaweel 1, Giza 168, Gemmeiza 11); 2) середньостійкі (Misr 2, Sakha 93, Sakha 94); 3) стійкі (Misr 1, Sids 13, Gemmeiza 9, Sids 12).

Показано, що Sids 13 є найбільш посухостійким сортом, а Shandaweel 1 – найбільш сприйнятливим. На основі отриманих результатів було виявлено, що шість індексів із десяти, такі як MP, GMP, TOL, HM, YRR та DI, виявилися більш інформативними. З них індекси GMP та HM оцінені як найбільш практичні для добору генотипів пшениці з максимальним урожаєм як в умовах контролю, так і посухи. Кореляційний аналіз виявив достовірний позитивний зв'язок Yp з показниками TOL, SSI та YRR та суттєву негативну кореляцію цих індексів з величиною Ys. Аналогічні результати були також виявлені у дослідженнях A.S.S. Mardeh зі співавторами [68] та R. Karimizadeh зі співавторами [69], де також встановлено, що добір сортів на основі низьких значень TOL, SSI та YRR може призвести до підвищення урожайності в умовах посухи, але до її зниження в оптимальних умовах.

Використовуючи індекси SSI, TOL, MP, YSI, YI, STI та GMP, нами для встановлення селекційної цінності досліджено 18 сортів пшениці м'якої озимої миронівської селекції за посухостійкістю в умовах Центрального Лісостепу України та виділено джерела стійкості до водного дефіциту [63]. Аналіз зразків в екстремальних природних умовах, спричинених посухою, дав змогу виділити сорти з підвищеною стійкістю до дефіциту вологи, які рекомендовані для вирощування в посушливих регіонах. Виявлено, що серед досліджуваних зразків найвищу селекційну цінність мав сорт Оберіг Миронівський, який за результатами оцінки виділився за всіма сімома індексами. Відносно високою посухостійкістю також характеризувалися сорти Трудівниця миронівська, МП Валенсія, Господиня миронівська, МП Дніпрянка, Естафета миронівська, Балада миронівська, МП Ассоль та МП Вишиванка, які виділилися за чотирма показниками. Виділені генотипи рекомендовано як вихідний селекційний матеріал під час створення нових сортів пшениці з цінними практичними властивостями. Представлені дослідження сприятимуть ефективнішому використанню протестованих сортів пшениці як у рослинництві, так і в селекційній практиці. Отримані результати є певним внеском у вивчення як теоретичних, так і практичних аспектів посухостійкості пшениці та можуть застосовуватися як елементи селекційних програм.

До основних переваг методу оцінки посухостійкості за використання вищезазначених індексів відносять доступність необхідних даних, можливість вивчення значного обсягу набору сортів, простота розрахунків та визначення в одиницях найважливішої агрономічної характеристики – урожайності [20]. Слід зазначити, що під час обчислення усіх індексів використовується не більше чотирьох параметрів – урожайність сорту за умов посухи і за достатнього зволоження та середні урожайності набору сортів у вказаних умовах. Середні урожайності набору сор-

тів також використовують для характеристики умов середовища, рівня інтенсивності посухи, а рівні урожайності характеризують реакцію окремих генотипів на дію посухи [20; 44; 48].

До недоліків відносять те, що індекси посухостійкості не надають інформації про механізми протидії стресу, які можуть відрізнятися залежно від генотипу [20]. Варто також зазначити, що оцінка стійкості рослин в польових умовах часто є досить трудомістким заняттям, займає досить тривалий час, потребує відповідних умов середовища для ефективного фенотипового прояву бажаної ознаки, а тому передбачає застосування значних матеріальних ресурсів. Складність цього методу полягає також у просторовій гетерогенності фізичних і хімічних властивостей ґрунту, а також сезонних коливаннях кількості атмосферних опадів. Для вирішення цієї проблеми застосовують приміщення з контрольованими умовами вирощування, де як основний критерій стійкості рослин слугує рівень їх урожайності за стресових умов порівняно з контролем. Однак, як показує селекційний досвід, інколи буває важко створити два фони вирощування – оптимальний і стресовий. Окрім того, селекція на посухостійкість за величиною урожайності може виявитись досить складною ще й тому, що успадковуваність урожайності в умовах стресу зазвичай низька у зв'язку з не-

лікою генотиповою дисперсією або через значну варіансу взаємодії генотип-середовище [47; 48]. Як наслідок, селекційне поліпшення стає довготривалим і ненадійним. Тому, на наш погляд, з метою прискорення селекційного процесу та більш об'єктивної оцінки посухостійкості генотипів пшениці доцільно застосовувати комплексні методи, які, окрім польових, передбачають проведення також вегетаційних та лабораторних дослідів.

Головні висновки. Таким чином, аналіз даних літератури та власні дослідження дозволили виявити світову тенденцію щодо застосування індексного підходу для добору сортів пшениці з цінними практичними властивостями. Порівняння різних індексів свідчить, що недоцільно використовувати лише один з них, а для більш точної оцінки генотипів за посухостійкістю доречно використовувати їх комплекс. Використання індексного підходу дає змогу виділити цінні джерела посухостійкості пшениці в нестійких кліматичних умовах, які в подальшому можуть бути залучені до селекційних програм для створення конкурентоспроможних сортів цієї культури. Індексний підхід значно спрощує ідентифікацію стійких генотипів та дає можливість ефективно прискорити селекційний процес і вважається важливим доповненням до класичних методів селекції сільськогосподарських рослин, зокрема пшениці.

Література

1. Breiman A., Graur D. Wheat evaluation. *Israel Journal Plant Sciences*. 1995. Vol. 43. № 2. P. 58–95.
2. FAO. Crop Prospects and Food Situation – Quarterly Global Report. № 4. December 2019. Rome. 46 p. <http://www.fao.org/3/ca7236en/ca7236en.pdf>.
3. Черенков А.В., Гасанова І.І., Солодушко М.М. Пшениця озима – розвиток та селекція культури в історичному аспекті. *Бюлетень Інституту сільського господарства степової зони*. 2014. № 6. С. 3–6.
4. Жемела Г.П., Кузнецова О.А. Вплив сортових властивостей на продуктивність та якість зерна пшениці м'якої озимої. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2012. № 3. С. 23–25.
5. Васильківський С.П., Гудзенко В.М., Кочмарський В.С., Кириленко В.В. Реалізація потенціалу сортів зернових культур – шлях вирішення продовольчої проблеми. *Фактори експериментальної еволюції організмів*. 2017. Т. 21. С. 47–51.
6. Литвиненко М.А. Селекція і насінництво: двоєдине ціле. *Насінництво*. 2012. № 7. С. 1–4.
7. Івашенко О.О., Рудник-Івашенко О.І. Напрями адаптації аграрного виробництва до змін клімату. *Вісник аграрної науки*. 2011. № 8. С. 52–56.
8. Васильківський С.П., Паустовський В.М., Худолій О.Л. Проблема реалізації потенціалу продуктивності сучасних сортів озимої пшениці. *Аграрні вісті*. 2002. № 2. С. 6–8.
9. Базалій В.В., Домарацький Є.О., Ларченко О.В. Сучасний сортовий склад пшениці м'якої озимої та параметри його екологічної стійкості за різних умов вирощування (огляд літератури). *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки*. 2018. № 104. С. 9–15.
10. Костромитин В.М. Оценка адаптивного потенциала сортов зерновых культур в опытах факториального и экологического сортоизучения. *Урожай и адаптивный потенциал системы поля*. 1991. С. 44–51.
11. Стариченко В.М., Голик Л.М., Ткачова Н.А., Литус М.В. Оцінка адаптивної здатності та стабільності сортів і ліній в селекції пшениці озимої. *Селекція і насінництво*. 2014. Вип. 105. С. 77–83.
12. Губа І.І., Стариченко В.М. Екологічна пластичність та стабільність колекційних зразків жита озимого за продуктивністю. *Збірник наукових праць ННЦ «Інститут землеробства НААН»*. 2018. Вип. 2. С. 111–119.
13. Василюк П.М. Дослідження морфоагробіологічних властивостей нових сортів пшениці озимої м'якої (*Triticum aestivum* L.). *Сортовивчення та охорона прав на сорти рослин*. 2013. № 1. С. 58–61.
14. Wricke G. Uber eine Methode zur Erfassung der Okologischen Streubreite in Feldversuchen. *Z. Pflanzenzuchtung*. 1962. Vol. 47. P. 92.
15. Finley K.W., Wilkinson G.N. The analysis of adaptation in a plant breeding programme. *Australian Journal of Agricultural Research*. 1963. Vol. 6. P. 742–754.
16. Звягін А.Ф., Рябчун Н.І., Сльніков М.І. Адаптивний потенціал сортів озимої пшениці селекції інституту рослинництва ім. В.Я. Юр'єва УААН. *Селекція і насінництво*. 2008. Вип. 95. С. 223–229.
17. Blum A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential – are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? *Australian Journal of Agricultural Research*. 2005. Vol. 56. № 11. P. 1159–1168.

18. Bartels D., Sunkar R. Drought and salt tolerance in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2005. Vol. 24. № 1. P. 23–58.
19. Єрмоленко Н.С., Хохлов В.М. Порівняння просторово-часових характеристик посух в Україні на початку та наприкінці ХХ сторіччя. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2012. №10 С.65–72.
20. Chernobai L.N., Ponurenko S.G., Sikalova O.V. Evaluation of stability for maize genotype characteristics by drought tolerance indices under different hydrothermal conditions. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*. 2016. Vol. 8. № 6. P. 69–75.
21. Raveena, Bharti R., Chaudhary N. Drought resistance in wheat (*Triticum aestivum* L.): a review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2019. Vol. 8. № 9. P. 1780–1792.
22. Mwadzingeni L., Shimelis H., Dube E., Laing M.D., Tsilo T.J. Breeding wheat for drought tolerance: Progress and technologies. *Journal of Integrative Agriculture*. 2016. Vol. 15. № 5. P. 935–943.
23. Sattar S., Afzal R., Bashir I. Nawaz B., Shahid A. Biochemical, molecular and morpho-physiological attributes of wheat to upgrade grain production and compete with water stress. *International Journal of Innovative Approaches in Agricultural Research*. 2019. Vol. 3. № 3. P. 510–528.
24. Beltrano J., Marta G.R. Improved tolerance of wheat plants (*Triticum aestivum* L.) to drought stress and rewatering by the arbuscularmycorrhizal fungus *Glomus claroideum*: Effect on growth and cell membrane stability. *Brazilian Journal of Plant Physiology*. 2008. Vol. 20. № 1. P. 29–37.
25. Ribaut J.-M., Poland D. Molecular approaches for the genetic improvement of cereals for stable production in water-limited environments. *A Strategic Planning Workshop held at CIMMYT*. 1999. 180 p.
26. Уліч Л.І., Бочкарьова Л.П., Лисікова В.М., Семініхін О.В. Посухостійкість сортів пшениці озимої (*Triticum aestivum* L.), придатних до поширення в Україні. *Сортовивчення та охорона прав на сорти рослин*. 2008. № 1. С. 106–113.
27. Демидов О.А., Хоменко С.О., Федоренко І.В., Федоренко М.В. Оцінка посухостійкості ліній пшениці ярої і умовах Лісостепу України. *Селекція і насінництво*. 2016. Вип. 110. С. 53–60.
28. Гончарова Э.А. Чесноков Ю.В., Ситников М.Н. Ретроспектива исследований водного статуса культурных растений на базе коллекции генетических ресурсов ВИР. *Труды Карельского научного центра РАН*. 2013. № 3. С. 10–17.
29. Россихина Г.С., Попов В.Я. Систематизация та вдосконалення методологічного забезпечення дослідження посухостійкості рослин. *Вісник Дніпропетровського університету. Біологія, екологія*. 2009. Вип. 17. Т. 1. С. 199–204.
30. Молодченкова О.О., Адамовская В.Г., Цисельская Л.И., Левицкий Ю.А., Безкровная Л.Я., Тихонова О.В., Сагайдак Т.В. Возможности использования биохимических показателей в селекции полевых культур на качество и устойчивость к биотическим и абиотическим факторам окружающей среды. *Селекция и насінництво*. 2008. Вип. 96. С. 289–296.
31. Григорюк И.А., Ткачев В.И., Савинская С.В., Мусиенко Н.Н. Современные методы исследования и оценки засухо- и жаростойкости растений. Киев : Науковий світ, 2003. 139 с.
32. Корхова М.М., Уліч Л.І. Вивчення посухостійкості сортів озимої пшениці порівняльним експрес-методом. *Агробіологія*. 2010. Вип. 2 (69). С. 113–115.
33. Россеев В.М., Белан И.А., Россеева Л.П. Тестирование *in vitro* яровой мягкой пшеницы на засухоустойчивость. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2011. Т. 76. № 2. С. 32–34.
34. Бычкова О.В., Хлебова Л.П. Физиологическая оценка засухоустойчивости яровой твердой пшеницы. *Acta Biologica Sibirica*. 2015. Т. 1. № 1-2. С. 107–116.
35. Варавкин В.А., Таран Н.Ю. Диагностика засухоустойчивости сортов пшеницы разной селекции по осморегуляторным свойствам семян. *ScienceRise*. 2014. Т. 3. № 1(3). С. 18–22.
36. Методика державного сортовипробування сільськогосподарських культур / за ред. В. В. Волкодава. 2000. Київ : АЛЕФА, С. 10–50.
37. Gavuzzi P., Rizza F., Palumbo M., Campanile R. G., Ricciardi G. L., Borgh B. Evaluation of field and laboratory predictors of drought and heat tolerance in winter cereals. *Canadian Journals of Plant Science*. 1997. Vol. 77. № 4. P. 523–531.
38. Makar O.O., Patsula O.I., Kavulych Y.Z., Batrashkina T.I., Bunio L.V., Kozlovskyy V.I., Vatamaniuk O., Terek O.O., Romanyuk N.D. Excised leaf water status as a measure of drought resistance of Ukrainian spring wheat. *Studia Biologica*. 2019. Vol. 13. № 2. P. 41–54.
39. Зыкин В.А., Россеева Л.П., Белан И.А., Кадиков Р.К. Методика оценки селекционных форм и сортов мягкой пшеницы при испытании на отличимость, однородность и устойчивость к факторам среды: методические рекомендации. СО РАСХН, СибНИИСХ, ФГОУ ВПО БГАУ. Уфа, 2004. 39 с.
40. Haley S.D., Quick J.S., Morgan J.A. Excised-leaf water stress evolution and association in field-grown winter wheat. *Canadian Journal of Plant Science*. 1993. Vol. 73. № 1. P. 55–63.
41. Rane J.M., Maheshwari S.N. Effect of pre-anthesis water stress on growth, photosynthesis and yield of six wheat cultivars differing in drought tolerance. *Indian Journal of Plant Physiology*. 2001. Vol. 6. № 1. P. 53–60.
42. Talebi R., Fayaz F., Naji A. M. Effective selection criteria for assessing drought stress tolerance in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *General and Applied Plant Physiology*. 2009. Vol. 35. № ½. P. 64–74.
43. Geravandi M., Farshadfar E., Kahrizi D. Evaluation of some physiological traits as indicators of drought tolerance in bread wheat genotypes. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2011. Vol. 58. № 1. P. 69–75.
44. Mehraban A., Tobe A., Gholipouri A., Amiri E., Ghafari A., Rostaii M. Evaluation of drought tolerance indices and yield stability of wheat cultivars to drought stress in different growth stage. *World Journal of Environmental Biosciences*. 2018. Vol. 7. № 1. P. 8–14.
45. Fernandez G.C.J. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. *Proceeding of the International Symposium on Adaptation of Vegetables and other Food Crops in Temperature and Water Stress*. Aug. 13–16, Shanhua, Taiwan, 1992. P. 257–270.
46. Вус Н.О., Кобизева Л.Н., Безугла О.М. Селекційна цінність зразків нуту за посухостійкістю в умовах східного Лісостепу України. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2017. № 4 (68). <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Dopovidi/article/view/9108>.
47. Farshadfar E., Jamshidi B., Cheghamirza K., da Silva J. A. T.. Evaluation of drought tolerance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) using *in vivo* and *in vitro* techniques. *Annals of Biological Research*. 2012. Vol. 3. № 1. P. 465–476.

48. Dodig D., Zoric M., Knezevic D., King S.R., Surlan-Momirovic G. Genotype×environment interaction for wheat yield in different drought stress conditions and agronomic traits suitable for selection. *Australian Journal of Agricultural Research*. 2008. Vol. 59. № 6. 536–545.
49. Ержебаева Р. С., Дидоренко С. В., Кудайбергенов М. С., Даниярова А. К., Амангелдиева А. А. Поиск источников засухоустойчивости среди новой коллекции сои (Glucine max) в условиях юго-востока Казахстана. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2019. Т. 3. № 31. С. 63–73.
50. Силенко С. Оцінка генофонду чини посівної за посухостійкістю в умовах південного лісостепу України. *Аграрна наука та освіта в умовах Євроінтеграції*. 2018. С. 140–143.
51. Fisher R. A., Maurer R. Drought resistance in spring wheat cultivars. 1. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research*. 1978. Vol. 29. № 5. P. 897–912.
52. Clarke J.M., DePauw R.M., Townley-Smith T.F. Evaluation of methods for quantification of drought tolerance in wheat. *Crop Science*. 1992. Vol. 32. № 3. P. 723–728.
53. Guttieri M.J., Stark J.C., Brien K., Souza E. Relative sensitivity of spring wheat grain yield and quality parameters to moisture deficit. *Crop Science*. 2001. Vol. 41. № 2. P. 327–335.
54. Farshadfar E., Sutka J. Multivariate analysis of drought tolerance in wheat substitution lines. *Cereal Research Communication*. 2003. Vol. 31. № ½. P. 33–40.
55. Rosielle A.A., Hamblin J. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environments. *Crop Science*. 1981. Vol. 21. № 6. P. 943–946.
56. Mardeh A.S.S., Ahmadi A., Poustini K., Mohammadi V. Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditions. *Field Crops Research*. 2006. Vol. 98. № 2-3. P. 222–229.
57. Dadbakhsh A., YazdanSepas A. Evaluation of drought tolerance indices for screening bread wheat genotypes in end-season drought stress conditions. *Advances in Environmental Biology*. 2011. Vol. 5. № 6. P. 1040–1045.
58. Bouslama M., Schapaugh W.T. Stress tolerance in soybean. Part 1: evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. *Crop Science*. 1984. Vol. 24. № 5. C. 933–937.
59. Sanjar P.E.A., Yazdan S.A. Evaluation of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under pre- and post-anthesis drought stress conditions. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2008. Vol. 10. № 2. P. 109–121.
60. Ullah H., Subthain H., Khalil I.H., Khan W.U., Jamal Y., Alam M. Stress selection indices an acceptable tool to screen superior wheat genotypes under irrigated and rain-fed conditions. *Pakistan Journal of Botany*. 2014. Vol. 46. № 2. P. 627–638.
61. Fischer R.A., Rees D., Sayre K.D., Lu Z.M., Condon A.G., Saavedra A.L. Wheat yield progress associated with higher stomatal conductance and photosynthetic rate, and cooler canopies. *Crop Science*. 1998. Vol. 38. № 6. P. 1467–1475.
62. Lan J. Comparison of evaluating methods for agronomic drought resistance in crops. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*. 1998. Vol. 7. P. 85–87.
63. Юрченко Т., Пикало С., Гуменюк О., Пірич А. Оцінка посухостійкості сортів пшениці м'якої озимої миронівської селекції у Центральному Лісостепу України. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Серія Агрономія*. 2020. № 24. С. 82–87.
64. Moosavi S.S., Yazdi Samadi B., Naghavi M.R., Zali A.A., Dashti H., Poursahbazi A. Introduction of new indices to identify relative drought tolerance and resistance in wheat genotypes. *Desert (Biaban)*. 2008. Vol. 12. № 2. P. 165–178.
65. Micky B., Aldesuquy H., Elnajar M. Uni- and multi-variate assessment of drought response yield indices in 10 wheat cultivars. *Journal of Crop Science and Biotechnology*. 2019. Vol. 22. № 1. P. 21–29.
66. Kristin A.S., Serna R.R., Perez F.I., Enriquez B.C., Gallegos J.A.A., Vallego P.R., Wassimi N., Kelly J.D. Improving common Bean performance under drought stress. *Crop Science*. 1997. Vol. 37. № 1. P. 43–50.
67. Golestani-Araghi S., Assad M.T. Evaluation of four screening techniques for drought resistance and their relationship to yield reduction ratio in wheat. *Euphytica*. 1998. Vol. 103. № 3. P. 293–299.
68. Mardeh A. S. S., Ahmadi A., Poustini K., Mohammadi V. Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditions. *Field Crop Research*. 2006. Vol. 98. № 2-3. P. 222–229.
69. Karimizadeh R., Mohammadi M., Ghaffaripour S., Karimpour F., Shefazadeh M.K. Evaluation of physiological screening techniques for drought-resistant breeding of durum wheat genotypes in Iran. *African Journal of Biotechnology*. 2011. Vol. 10. № 56. P. 12107–12117.
70. Fischer R.A., Wood T. Drought resistance in spring wheat cultivars III. Yield association with morphological traits. *Australian Journal of Agricultural Research*. 1979. Vol. 30. № 6. P. 1001–1020.