

СІЧКАР В. І.

Селекційно-генетичний інститут – Національний центр насіннєзнавства та сортотивчення,
Україна, 65036, м. Одеса, Овідіопольська дорога, 3, ORCID: 0000-0003-0581-5068, bobovi.sgi@ukr.net

СЕЛЕКЦІЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ДЛЯ ПОСУШЛИВИХ УМОВ

Мета. На основі власних експериментальних результатів і аналізу публікацій провідних наукових установ світу обґрунтувати необхідність посилення селекційної роботи для підвищення адаптивного потенціалу та посухостійкості нових сортів. Висвітлити механізм дії посухи, методи створення вихідного матеріалу, основні морфологічні, фізіологічні та біохімічні ознаки, які впливають на рівень стійкості до стресу. **Методи.** Польові досліді проводили у степовій зоні України, яка характеризується незначною кількістю опадів, високою температурою повітря та тривалими міждощовими періодами впродовж вегетації сільськогосподарських культур. **Результати.** Для успішної селекційної роботи необхідно враховувати вплив взаємодії генотипу з факторами середовища. На основі багатозональних випробувань є можливість виявити нові генотипи, які демонструватимуть широку або специфічну адаптивність до певного типу середовища та побудувати моделі з різним рівнем факторів довкілля. За посушливих умов отримано унікальний селекційний матеріал сої та нуту з високим рівнем посухостійкості, що може слугувати генетичною базою для подальшого покращення цієї ознаки. **Висновки.** На основі таких морфологічних показників як площа листової поверхні та її стан, надземна маса, висота рослин, інтенсивність росту можливо об'єктивно оцінити толерантні до водного стресу генотипи. Створення ультраскоростиглих сортів дає можливість уникнення посухи.

Ключові слова: посухостійкість, водний стрес, уникнення посухи, толерантність.

Суттєві зміни погодних факторів, які ми спостерігаємо в останні десятиріччя, потребують ретельного аналізу та удосконалення методів створення нових сортів сільськогосподарських культур. Глобальне потепління, яке проявляється у результаті постійного росту денних і нічних температур та різкого коливання кількості опадів у період вегетації рослин, викликає різної тривалості посухи, що приводить до зна-

чних втрат урожайності. Уже у наші дні багато аграріїв і біологів зазначають про необхідність більш детального підходу до продовольчої безпеки планети у найближчій перспективі. Дослідження в Африці показали, що в середньому кожний день з температурою вище 30°C впродовж вегетації знижує урожай кукурудзи на 1 % [1]. Великі проблеми в останні роки виникають за вирощування рису в суходільних умовах у таких країнах як Китай, Індія, Бангладеш, Непал, де існує суттєва різниця у реальній та потенціальній урожайності. Як зазначають вітчизняні вчені, генетичний потенціал українських сортів м'якої пшениці досягає 11–14 т/га, хоча у виробничих умовах він реалізується лише на 45 % [2]. На жаль, негативний вплив умов довкілля на урожайність сільськогосподарських культур у перспективі буде посилюватись. Підвищення температури на 3–4°C приводить до падіння урожайності на 15–35 % у зоні Африки та на 25–35 % у країнах Середньої Азії [3]. Подібні зрушення спостерігаються і в степовій зоні України. Коли ми розпочинали нашу селекційну програму зі зернобобовими культурами у 1980-х роках, урожайність сої за суходільних умов знаходилась на рівні 1,7–2,0 т/га. У наші дні вона зменшилась до 0,5–0,7 т/га, а у дуже посушливому 2024 р. взагалі опустилась до нуля.

На даний час актуальною стає реалізація підвищення продуктивності рослин на одиницю використаної води: «more crop per drop». Відсутність вологи у ґрунті та високі температури повітря викликають суттєві морфологічні, фізіологічні, біохімічні та молекулярно-генетичні зміни, які характеризуються негативним впливом на ріст і розвиток рослин, що приводить до значної втрати врожайності. Така негативна тенденція загрожує продовольчій безпеці планети, оскільки кількість населення постійно зростає і у 2050 році перевищить 9 млрд. Щоб забезпечити його продовольством, необхідно кількість продукції збільшити не менше, ніж на 70 % [4]. Результати досліджень свідчать про те, що за дефіциту вологи втрати урожайності переважають суму решти стресових факторів.

© СІЧКАР В. І.

Аналіз публікацій за 1980–2015 рр. стверджує про зниження урожайності від посушливих умов на 21 % і 40 % відповідно для пшениці та кукурудзи [5].

Забезпечити потреби людства у продовольстві можливо лише чітко спланованим розвитком аграрного сектора, основу якого складають створення та впровадження високоадаптивних сортів, добре пристосованих до зональних технологій вирощування, здатних переносити абіотичні стреси з мінімальними втратами урожайності.

Матеріали і методи

У польових дослідженнях проаналізували господарсько цінні та фенологічні ознаки значного об'єму колекційних зразків сої, гороху, нуту та сочевиці із різних країн світу. Так, кількість вивчених генотипів сої перевищила 5 тисяч, нуту – 2500, сочевиці – 500, гороху – 100. Крім того, випробували практично всі сорти цих культур, які занесені до державного реєстру сортів рослин України. Колекційний розсадник висівали однорядковими ділянками довжиною 2,5 м з частими стандартами. Виділені на основі комплексу ознак або за одним досить цінним показником генотипи використовували як батьківські форми в гібридизації. Створені рекомбінантні лінії випробовували в контрольному, попередньому і конкурсному розсадниках ділянками 10 м² з повтореннями. У колекційних та селекційних зразків оцінювали основні елементи продуктивності, стійкість до вилягання, толерантність до високих температур повітря і недостатньої кількості вологи у ґрунті, висоту рослин, гіллястість, тривалість вегетаційного періоду та окремих його фаз, стійкість проти збудників хвороб. У процесі цієї селекційної роботи було створено понад 30 сортів сої, 12 і 7 нуту і гороху відповідно. На основі одержаних результатів вираховували показники мінливості вивчених ознак, рівень успадковування та кореляцій елементів продуктивності, тривалості періоду вегетації та окремих його фаз, параметри взаємодії генотип та фактори довкілля.

Результати та обговорення

Підвищені температури та тривалі бездощові періоди приводять до уповільнення росту рослин, зменшення площі листової поверхні, пожовтіння та скручування листків, передчасного дозрівання. Крім того, за таких умов спостерігаються глибокі фізіологічні та біохімічні змі-

ни у процесі засвоєння CO₂ та води, розподілення продуктів фотосинтезу, транспірації, засвоєння мінеральних елементів, азотфіксації. Існують різні механізми стійкості до посухи: уникнення, перенесення та толерантність. Уникнення зустрічається досить часто у зонах, де недостатка вологи трапляється у кінці вегетаційного періоду певної культури. В англійській літературі такий вид посухи позначають як «terminal drought». Особливо чітко такі погодні умови проявились у минулому 2024 році в зоні Степу, коли весною випало достатньо дощів і вологи вистачило для зернових, а також культур з коротким вегетаційним періодом, як горох, а репродуктивний розвиток кукурудзи, сої, соняшника проходив за надзвичайно сухої погоди, у зв'язку з чим вони майже не сформували врожаю.

Головною метою для ухилення від цього виду посухи є створення сортів з коротким вегетаційним періодом, які б розпочинали формування урожайності до настання високих температур влітку. Сорти нуту такого типу створені в Індії та низці африканських країн [6]. Впровадження їх у виробництво дозволило різко підвищити урожайність нуту в фермерських господарствах. Схожі сорти рису були одержані в Пакистані. Дослідження в Китаї не виявили зв'язку врожайності з раннім цвітінням і скоростиглістю за посушливих умов у рису, що свідчить про необхідність подальших досліджень даної проблеми. У Чилі виведений сорт пшениці, урожайність якого переважає стандарт на 20 % за нестресових умов і, який виділяється високим рівнем посухостійкості [7]. Проведені у пшеничному поясі Австралії дослідження також стверджують, що за глобального потепління у майбутніх сортів пшениці цвітіння повинне розпочинатись на 29 і 11 днів раніше за посушливих і вологих умов відповідно, порівняно зі сучасними сортами [8].

Наші селекційні дослідження з нутом і соєю направлені на створення сортів з коротшою тривалістю періоду від появи сходів до цвітіння, що дозволяє підвищити кількість сформованих бобів за рахунок помірнішої температури на початку літа й наявності запасів весняної вологи. Необхідно зазначити, що в сої на настання генеративної фази чітко діє генетична система фотоперіодичної реакції, яка налічує 8 генів. Причому їх рецесивні алелі прискорюють цвітіння, а домінантні – відтягують. Таким чином, шляхом комбінування генів фотоперіодичної

реакції можливо суттєво впливати на тривалість вегетаційного періоду в цілому, а також окремих його фаз.

Селекційна стратегія перенесення посухи полягає в зменшенні використання води після початку дії стресу. За дефіциту вологи у рослин проходять фізіологічні та біохімічні перетворення, вони продовжують ріст і підтримують водний потенціал клітин. Цей тип стійкості забезпечується двома механізмами: ефективнішим надходженням води в рослину і меншими її втратами надземною частиною рослини. Такий вид стійкості має суттєве значення лише за помірної або короткочасної посухи. За тривалого водного стресу настає вуглецеве голодування, оскільки у результаті закриття продихів падає фотосинтетична активність, у клітинах нагромаджується значна кількість активних форм кисню (АФК) і настає дегідратація клітин. Результатом перенесення цього виду посухи є сповільнення росту рослини, як кінцевий результат, зменшення надземної маси рослин і врожайності.

Під толерантністю розуміють комплекс морфологічних, фізіологічних і біохімічних адаптацій, які сприяють послабленню деструктивних процесів, викликаних недостатньою кількістю вологи. У реалізації цього захисту залучені тисячі генів та метаболічних реакцій, дія яких направлена на підтримання нормального функціонування клітинних мембран й інактивації АФК. За настання посухи у рослин відбувається регуляція експресії генів, що приводить до перерозподілу біосинтезу білків і підтримання певних рівнів тургору та фотосинтезу за рахунок розчинних компонентів клітин [9].

З метою протистояння несприятливим змінам необхідно досконало вивчити морфологічні ознаки, особливості їх успадкування, виявити такі, які виділяються максимальним впливом на рівень стійкості до водного стресу. Досить переконливим прикладом такого твердження є дослідження з колекційними зразками сої, які виділяються повільним в'яненням листків. У США за сівби на піщаному ґрунті виявили дві колекційні форми, PI 416937 і PI 471938, у яких ознаки зав'ядання за дефіциту вологи наступали на кілька днів пізніше порівняно з існуючими сортами [10]. PI 416937 походила із Японії, PI 471938 – із Непалу, обидва генотипи були пізньостиглими, VI і V групи стиглості відповідно. Подальше їх вивчення показало, що повільне в'янення (slow-wilting) форми

PI 461937 обумовлене стабілізацією швидкості транспірації, тобто за водного стресу цей показник досягає певного рівня і надалі не зростає. Таке обмеження пояснили відсутністю специфічного виду аквапорину.

У південній зоні штату Міссурі (США) виявили два колекційних зразки, PI 567690 і PI 567731, з ознакою «повільного в'янення», які належать до групи стиглості III, тобто є середньостиглими [11]. Пролонговане в'янення у них пов'язане з більш тривалим періодом фотосинтезу та росту, що привело до меншої втрати врожайності за посушливих умов порівняно зі звичайними сортами.

Генетичні дослідження генотипів сої з ознакою «повільного в'янення» установили, що вона успадковується за полігенною схемою з формуванням декількох локусів QTL. За схрещування сорту Benning з PI 416937 ідентифікували 7 QTL, які знаходились на різних хромосомах і контролювали 75 % мінливості цієї ознаки [12]. У подальших дослідженнях виявили нові QTL, деякі із них були пов'язані з транспортом води із кореневої системи та транспірацією. Описані приклади дії посухи на реакцію рослин сої чітко підкреслюють роль фенотипових ознак при визначенні рівня впливу цього несприятливого фактора на морфологічні показники. Найбільш інформативними ознаками за посушливих умов є низькорослість, зменшення площі листової поверхні, пожовтіння та опадання листя, архітектура куща, наявність опушення та воскового нальоту.

Взаємодія генотип-фактори довкілля-технологія вирощування (ГФТВ) на сьогодні слугує найбільш інформативним та об'єктивним показником визначення пластичності селекційного матеріалу. На основі масштабних випробувань за різних комбінацій природних чинників існує можливість точно оцінити також рівень невідповідності потенціальної урожайності реальній та знайти шляхи її скорочення. Виявлені кращі комбінації ГФТВ рекомендуються для оперативного застосування в агрономічній практиці. Яскравим прикладом цього є вирощування гібридів кукурудзи за різної густоти. В Австралії подібні дослідження ведуться з пшеницею і сорго. Крім того, результати таких досліджень використовують для прогнозування змін урожайності в перспективі, виходячи зі змін кліматичних факторів та антропогенної діяльності. Ці передбачення моделюють, враховуючи вплив на статус і врожайність рослин за

підвищення кількості CO₂ у повітрі, зниження продишової провідності та підвищення транспірації у результаті глобального потепління.

Важливим вкладом у теорію сучасних селекційних програм є розробка концепції природного комплексу факторів довкілля (target population of environments (TPE)) [13]. Її основу складає чітке розуміння, що ГФТВ лежить в основі стратегії селекції як у сьогодишній час, так і в далекій перспективі, оскільки цей показник пов'язаний з головними природними чинниками, які хоч і змінюються, але щорічно повторюються. Таким чином, поліпшення господарсько цінних ознак базується на виявленні генетичної мінливості на фоні певної взаємодії природних факторів.

Водний стрес індукує нагромадження АФК у клітинах, у результаті чого порушується їх поділ, нормальний ріст і функціональна діяльність. За значної посухи у рослин закриваються продихи, що зменшує засвоєння CO₂ і дихання, функціональний стан цих процесів знаходиться під контролем хімічних сигналів, які залежать від надходження води із кореневої системи в надземні органи рослини. Головну роль у них відіграє абсцизова кислота, за інтенсивного синтезу якої експресується низка генів, які кодують утворення захисних білків та фітогормонів, які здатні стабілізувати мембрани клітин та їх диференціацію, впливати на стан продихів, формування генеративних органів. У відповідь на стрес рослина накопичує значну кількість первинних і вторинних метаболітів, які діють як осмопротектанти, що підтримують осмотичний потенціал клітин і зв'язують воду з метою забезпечення певного рівня тургору. Вони складаються із поліамінів, гліцинбетаїну, амінокислот, розчинних цукрів. Серед названих вище сполук високою активністю виділяється пролін, який за стресових умов стимулює дію мітохондрій, змінює швидкість поділу клітин і активує гени, які забезпечують відновлення одержаних пошкоджень, у тому числі й від дії АФК. Експериментальні дані свідчать про те, що генотипи, які нагромадили більшу кількість цієї амінокислоти за посушливих умов, виділяються підвищеним рівнем надземної маси й урожайністю. У наших дослідженнях, проведених у камерах штучного клімату, було виявлено, що після посухи у деяких сортів сої нагромадження вільного проліну зросло у 5,6–7,8 разів [14].

Досить важливим показником толерантності слугує розвиток кореневої системи як у глибину, так і в поверхневому шарі ґрунту. Генотипи такого роду виділені у рису, кукурудзи, пшениці, сої. Міжнародною групою учених було обґрунтоване відношення кількості корінців на стеблі пшениці, як важливий критерій посухостійкості [15]. Архітектура кореневої системи, яка включає кількість корінців, їх діаметр і кут відгалуження, глибину проникнення в ґрунт суттєво впливає на використання води рослинами.

Необхідно зазначити важливість для селекції на посухостійкість різноманітного генетичного матеріалу, який вивчається та зберігається в установах різних країн світу. Глобальна колекція сільськогосподарських рослин нашої планети знаходиться під егідою Продовольчої та сільськогосподарської організації (Food and Agriculture Organization (FAO)), яка постійно контролює стан генетичних ресурсів планети, що включає 760 тисяч зразків, які походять із 207 країн. Загальну координацію виконує Консультативна група міжнародних сільськогосподарських досліджень (Consultative Group for International Agricultural Research (CGIAR)), яка об'єднує 11 міжнародних центрів, де вирощується і зберігається насіння всіх сільськогосподарських культур. Щорічно ці установи розповсюджують у середньому 115 тисяч зразків у різні країни світу. Крім вищезазначених наукових центрів об'ємні колекції вивчаються у багатьох регіональних науково-дослідних установах. Найбільшою серед них є національна колекція США (National Plant Germplasm System (NPGS)), куди входить 575 тисяч зразків. Щорічно звідти відправляють близько 250 тисяч замовлень. Об'ємні колекції підтримуються також у Leibniz Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research (Німеччина), The John Innes Centre (Англія), Genetic Resources Center (Японія). Національний центр генетичних ресурсів рослин України (м. Харків) підтримує колекцію у кількості 151,3 тисячі зразків 544 культур.

В Європі випускається каталог (European Search Catalogue for Plant Genetic Resources (EURISCO)), де наведена інформація про більше ніж 2 млн генотипів сільськогосподарських рослин і їх диких предків, які підтримуються у 400 інститутах. Таким чином, наведені дані свідчать про наявність об'ємної інформації про світову генетичну мінливість господарсько цінних оз-

нак рослинного світу, в тому числі й адаптивного характеру.

Висновки

Головною умовою успішної селекційної роботи є врахування впливу взаємодії генотипу з факторами середовища на господарсько цінні ознаки та врожайність. Така стратегія дозволить виявити нові генотипи, які демонструватимуть широку або специфічну адаптивність до певного типу середовища. Шляхом гібридизації та доборів за посушливих умов отримано унікальний селекційний матеріал сої та нуту, який ви-

діляється високим рівнем посухостійкості й може слугувати генетичною базою для подальшого покращення цієї ознаки. На основі таких морфологічних показників як площа листової поверхні та її стан, значення надземної маси, висота рослин, інтенсивність росту можливо об'єктивно оцінити толерантні до водного стресу генотипи. Їх легко відібрати й розмножити в подальшій селекційній роботі. Головними фізіологічними чинниками є кількість абсцизової кислоти, проліну, АФК та низки гормонів у надземній масі. Створення ультраскоростиглих сортів дає можливість уникнути посуху.

References

1. Bankole F., Menkir A., Olaoye G., Crossa J., Hearha S., Unachukwu N., Cedit M. Genetic gains in yield and yield related traits under drought stress and favorable environments in a maize population improved using marker assisted recurrent selection. *Front. Plant Sci.* 2017. Vol. 8. P. 808. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00808>.
2. Vasilkivskiy S. P., Gudzenko V. M., Kochmarskyi V. S., Kyrylenko V. V. Realization of cereals varieties potential as a way of solving the food problem. *Factors in experimental evolution of organisms.* 2017. Vol. 21. P. 47–51. <https://doi.org/10.7124/FEEO.v.21805>. [in Ukrainian]
3. Ortiz R., Braun H. J., Crossa J., Crouch J. H., Davenport G., Dixon J., Iwanaga M. Wheat genetic resources enhancement by the International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT). *Genet. Resour. Crop Evol.* 2008. Vol. 55. P. 1095–1140. <https://doi.org/10.1007/s10722-008-9372-4>.
4. Hunter M. C., Smith R. G., Schipanski M. E., Arwood L. W., Mortensen D. A. Agriculture in 2050: Recalibrating targets for sustainable intensification. *Bioscience.* 2017. Vol. 67. P. 386–391. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix010>.
5. Daryanto S., Wang L., Jacinta P. A. Global synthesis of drought effects on maize and wheat production. *PLOS ONE.* 2016. Vol. 11. e0156362. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156362>.
6. Kumar A., Kumar H., Kumar S., Gupta V., Panwar G. S. Phenological, Morphological and Yield based Characterization of Chickpea (*Cicer arietinum* L.) Germplasm Lines. *Legume Res.* 2024. Vol. 47 (6). P. 884–890. <https://doi.org/10.18805/LR-4582>.
7. Fornazzari C. J., Matus I., Madariaga R., Campillo R., Zuniga J., Mejias J., Garcia J. C. Konde INIA: first doubled haploid winter wheat cultivar for southern Chile. *Chil. J. Agric. Anim. Sci.* 2015. Vol. 31. P. 234–238.
8. Chen C., Wang B., Feng P., Xing H., Fletcher A. L., Lawes R. A. The shifting influence of future water and temperature stress on the optimal flowering period for wheat in Western Australia. *Sci. total Environ.* 2020. Vol. 737. P. 139707. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139707>.
9. Tardieu F., Simonneau T., Muller B. The physiological basis of drought tolerance in crop plants: A scenario-dependent probabilistic approach. *Annu. Rev. Plant Biol.* 2018. Vol. 69. P. 733–739. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040218>.
10. Sloane R. J., Patterson R. P., Carter T. E. Field drought tolerance of a soybean plant introduction. *Crop Sci.* 1990. Vol. 30. P. 118–123. <https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183x003000010027x>.
11. Pathan M., Lee J. D., Sleper D. A., Fritsch F. B., Sharp R. E., Carter T. E., Nelson R. L., King C. A., Schapaugh W. T., Ellersieck M. R., Nguyen H. T., Shannon J. C. Two soybean plant introductions display slow leaf wilting and reduced yield loss under drought. *J. Agron. Crop Sci.* 2014. Vol. 200. P. 231–236. <https://doi.org/10.1111/jac.12053>.
12. Abdal-Haleem H., Carter T. E. J., Purcell L. G., King C. A., Ries L. L., Chen P., Schapaugh W. J., Sinclair T. R., Boerma H. R. Mapping of quantitative trait loci for canopy-wilting trait in soybean (*Glycine max* L. Merr.). *Theor. Appl. Gen.* 2012. Vol. 125. P. 837–846. <https://doi.org/10.1007/s00122-012-1876-9>.
13. Cooper M., Voss-Fels K. P., Messina C. D., Tang T., Hammer G. L. Tackling G x E x M interactions to close on-farm yield-gaps: creating novel pathways for crop improvement by predicting contributions of genetics and management to crop productivity. *Theor. Appl. Gen.* 2021. Vol. 134. P. 1625–1644. <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03812-3>.
14. Sichkar V. I., Pasichnyk S. M. Genetic-physiological basis of legume crops resistance to drought stress. *The Bulletin of Vavilov Society of geneticists and Breeders of Ukraine.* 2018. Vol. 16 (1). P. 35–51. <https://doi.org/10.7124/visnyk.utgis.16.1.901>. [in Ukrainian]
15. Nehe A. S., Foulkes M. J., Ozturk I., Rasheed A., York L., Kefauver S. C., Ozdenir F., Morgunov A. Root and canopy traits and adaptability genes explain drought tolerance responses in winter wheat. *PLOS ONE.* 2021. Vol. 16. e0242472. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242472>.

SICHKAR V. I.

Plant Breeding and Genetics Institute – National Center of Seed and Cultivar Investigation, Ukraine, 65036, Odesa, Ovidiopolska Road, 3

CROP BREEDING TO DROUGHT TOLERANCE

Aim. Based on our own experimental results and analysis of publications of the world's leading scientific institutions, to substantiate the need to strengthen breeding work to increase the adaptive potential and drought resistance of new varieties. To highlight the mechanism of action of drought, methods of creating the starting material, the main morphological, physiological and biochemical signs that affect the level of resistance to stress. **Methods.** Field experiments were carried out in the steppe zone of Ukraine, which is characterized by a small amount of precipitation, high air temperature and long inter-rainy periods during the growing season of crops. **Results.** For successful breeding work, it is necessary to take into account the influence of the interaction of the genotype with environmental factors. Based on multi-zone tests, it is possible to identify new genotypes that will demonstrate broad or specific adaptability to a particular type of environment and build models with different levels of environmental factors. Under dry conditions, a unique breeding material of soybeans and chickpeas with a high level of drought resistance was obtained, which can serve as a genetic basis for further improvement of this trait. **Conclusions.** Based on such morphological traits as the area of the leaf surface and its condition, aboveground mass, plant height, growth intensity, it is possible to objectively assess genotypes tolerant to water stress. The creation of ultra-early ripening varieties makes it possible to avoid drought.

Keywords: drought resistance, water stress, drought avoidance, tolerance.