

<https://doi.org/10.15407/frg2023.06.463>

УДК 575.113.2:577.112.82

ГОЛОЗЕРНИЙ ХАРЧОВИЙ ЯЧМІНЬ (*HORDEUM VULGARE* L. VAR. *NUDUM*) — ГЕНЕТИЧНІ ТА СЕЛЕКЦІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

О.І. РИБАЛКА^{1,2}, С.С. ПОЛІЩУК¹, М.В. ЧЕРВОНІС¹, Б.В. МОРГУН^{2,3},
В.В. МОРГУН²

¹Селекційно-генетичний інститут—Національний центр насіннєзнавства та сортовивчення Національної академії аграрних наук України

65036 Одеса, Овідіопольська дорога, 3

²Інститут фізіології рослин і генетики Національної академії наук України
03022 Київ, вул. Васильківська, 31/17

³Інститут клітинної біології та генетичної інженерії Національної академії наук України

03143 Київ, вул. Академіка Заболотного, 148

e-mail: molgen@icbge.org.ua

У багаторічних (2002—2023 рр.) селекційно орієнтованих генетичних дослідженнях отримано докорінно новий агрономічно досконалий селекційний матеріал харчового озимого і ярого голозерного ячменю з високою зерною продуктивністю, відмінною стійкістю до посухи, якісним вимолотом і високою харчовою цінністю зерна. Також отримано цінний селекційний матеріал озимого голозерного ячменю з надвисокою (незрівнянно вищою, ніж у озимої пшениці) толерантністю до посухи як у період формування і наливання зерна, так і період сходи—кущення. На основі цього матеріалу створено високопродуктивний сорт 2-рядного озимого голозерного ячменю Імператор, який поєднує надвисоку толерантність до посухи з високою стійкістю до вилягання рослин, масою 1000 насінин до 60 г. Отримано перспективний селекційний матеріал озимого голозерного ячменю з пролонгованим (середньопізнім) періодом вегетації, який не поступається або переважає за урожаєм зерна і посухостійкістю сорти озимого ячменю традиційного для Півдня України ранньо- і середньотривалого вегетаційного періоду. Багаторічний практичний досвід поліпшення якості вимолоту зерна голозерного ячменю свідчить про те, що 2-рядний морфотип голозерного ячменю істотно переважає 6-рядний за якістю вимолоту зерна, а у генотипів з геном *wax* (ваксі) вимолот зерна як у 2-рядного, так і навіть 6-рядного морфотипу наближається до 100 %. Безостий морфотип колоса голозерного ячменю (2- і 6-рядний) поступається остистому за урожаєм зерна, якістю вимолоту зерна, рівномірністю зерна за фізичними параметрами, проявляє апікальну стерильність колоса та пустозерність і не є перспективним для створення сортів безостого голозерного ячменю. Цільовим морфотипом при створенні селекційного матеріалу голозерного ячменю у наших програмах є 2-рядний морфотип, який, не поступаючись за урожаєм зерна 6-рядному морфотипу, переважає останній за низкою важливих агрономічних і технологічних характеристик зерна, таких як вища якість вимолоту зерна, підвищена маса 1000 насінин, однорідність зерна у колосі за фізичними параметрами, кра-

Цитування: Рибалка О.І., Поліщук С.С., Червоніс М.В., Моргун Б.В., Моргун В.В. Голозерний харчовий ячмінь (*Hordeum vulgare* L. var. *nudum*) — генетичні та селекційні дослідження. *Фізіологія рослин і генетика*. 2023. 55, № 6. С. 463—492. <https://doi.org/10.15407/frg2023.06.463>

щий товарний вигляд кінцевого продукту із цілого зерна. Вперше в Україні ініційовані та здійснюються селекційно орієнтовані генетичні програми біофортифікації, спрямовані на поліпшення харчової цінності зерна голозерного ячменю шляхом використання у схрещуваннях генетичної плазми ячменю з кольоровим (фіолетовим, синім, чорним) зерном і підвищеною антиоксидантною активністю зерна, зумовленою кольоровими поліфенольними пігментами антоціанінами і фітомеланінами. Реалізуються програми щодо покращення складу в зерні ключових мінералів, вітамінів, дієтичної клітковини бета-глюканів, біоактивних складових, як підвищення, так і зниження вмісту у крохмалі амілози, створення ліній з ультранизьким рівнем глютену (gluten-free). Впровадження досліджень у практичній площині має кінцевою метою створення сортів харчового та кормового голозерного ячменю як зернової сировини для розроблення нових продуктів функціонального харчування на основі голозерного ячменю, а також популяризацію в Україні харчового голозерного ячменю — унікально цінного зерна з високими харчовими і поживними характеристиками.

Ключові слова: *Hordeum vulgare* L. var. *nudum*, зерно, мутація, пігментація, білок, глютен, фосфор, функціональне харчування, харчова безпека.

Ячмінь представлений переважно двома морфотипами — плівчастий (*hulled, covered*) і голозерний (*naked, hull-less*) — залежно від того, чи зернова плівка тісно прикріплена до зернівки ліпідним шаром (плівчастий), чи вона вільно відокремлюється від зернівки за обмолоту (голозерний). Ознака «голе/плівчасте зерно» кодується локусом *nud*. Домінантний *Nud*-алель (плівчастий морфотип) кодує AP2/ERS (apetala 2/ethylene-response factor), що належить до родини факторів транскрипції, який регулює шляхи ліпідного обміну. На молекулярному рівні *nud*-алель містить делецію у 17 тисяч пар нуклеотидів, яка призводить до втрати його функціональності, чим, власне, *nud*-алель і відрізняється від функціонального *Nud*-алеля. Відповідно, нефункціональний *nud*-генотип не містить ліпідного шару, що зумовлює адгезію між зерною оболонкою і зерною плівкою, тому остання легко механічно відокремлюється від зернівки [1].

Голозерний ячмінь не можна назвати достеменно новою культурою для України. Швидше це добре забута культура, яка в Україні довго була і продовжує бути «в тіні» донині популярного плівчастого ячменю [2]. Те саме можна сказати і про обмежене, до певного часу, поширення голозерного ячменю у світі [3].

Голозерний ячмінь розповсюджений переважно у країнах Східної Азії (загалом до 95 % світових площ посіву), на гірських плато Японії, Кореї, Непалу, Тибету і Бутану. Відносно незначні площі посівів голозерного ячменю в Ефіопії й ще менше в Австралії та країнах Західного світу [4].

Мабуть, найкращим прикладом активного використання голозерного ячменю як продукту харчування є Тибетський автономний район, де голозерний ячмінь займає частку 65 % (!) всіх продуктів харчування у регіоні. Загальна площа під голозерним ячменем у Тибеті становить близько 118 000 га або 69,7 % (!) загальної площі посіву всіх зернових Тибету. Самі ж тибетці цілком аргументовано

вважають, що ячмінь, як основний продукт харчування, забезпечує виживання населення в суворих умовах гірського клімату [5, 6].

Популярність голозерного ячменю, причому не просто як продукту харчування, а продукту з функціональним статусом, почала стрімко зростати головню за останні два десятиріччя з огляду на дані фундаментальних біохімічних і клінічних досліджень зерна ячменю і продуктів його переробки, виконаних в авторитетних лабораторіях світу [3, 6—12]. В одному із останніх фундаментальних досліджень продемонстровано молекулярні механізми дії різних функціональних інгредієнтів зерна і зелених проростків ячменю як потужних чинників протидії щонайменше 20 (!) хронічним захворюванням організму людини [13].

Харчова функціональність зерна голозерного ячменю полягає у його широкому спектрі не лише вітамінів і мінералів, а й вмісту унікальної дієтичної клітковини бета-глюканів та наявності важливих для здоров'я біоактивних компонентів зерна, таких як поліфеноли і похідні фенольних сполук — флавоноїди. Клінічні дослідження доводять, що регулярне вживання продуктів із зерна голозерного ячменю сприяє підтримці у кров'яному руслі нормального вмісту ліпопротеїдів низької щільності, забезпечує антиоксидантний захист від виникнення певних типів раку шлунково-кишкового тракту, оптимізує глікемічний та інсулінемічний баланс і особливо позитивно впливає на здоров'я й функціональність кишечника, що є критично важливим для здоров'я всього організму та його систем [7, 8].

Під час перероблення зерна голозерний ячмінь, на відміну від плівчастого, не потребує технологічної операції видалення зернової плівки шляхом шліфування зерна, яка призводить не лише до зниження ефективного використання урожаю зерна, а й до втрати левової частки цінних харчових компонентів зернової оболонки і зародка. Зерно голозерного ячменю можна переробляти без втрат елементів харчової цінності у різноманітні продукти, такі як борошно, крупи, пластівці, хлібопродукти, ферментовані продукти і навіть у якісний ячмінний солод [8, 9].

В Україні ми одні з перших у 2002—2003 рр. ініціювали селекційно-генетичні дослідження, спрямовані на створення сортів голозерного ячменю харчового (кормового) напряму використання. Накопичений багаторічний досвід і отримані результати досліджень подано у цій підсумковій статті. Тож метою дослідження було радикальне поліпшення харчової (кормової) цінності зерна ячменю за антиоксидантними характеристиками, вмістом вітамінів і мінералів, підвищення вмісту у зерні розчинної дієтичної клітковини та створення безглютенового голозерного харчового ячменю.

Методика

Результати нашої роботи отримано на основі багаторічних як польових, так і лабораторних досліджень. Польові досліді виконували з використанням у схрещуваннях колекційних сортів і селекційних зразків, генних мутацій, численних популяцій і селекційних ліній ячменю *Hordeum vulgare* L. як плівчастого, так і голозерного морфо-

типів, ярого, озимого і альтернативного типу розвитку. У схрещуваннях активно використовували зразки ячменю з кольоровим (синім, фіолетовим, чорним) зерном, остисті, фуркатні, безості, 6-рядні й 2-рядні морфотипи (табл. 1).

Задля досягнення максимальної ефективності та генетичної чистоти гібридизації ячменю, особливо ярого, під час кастрації обов'язково використовували налобну біноклярну лупу зі збільшенням 2×—2,5×. Це давало змогу об'єктивно визначати стан зрілості пиляків, максимально повно їх видаляти, не допускати самозапилення та визначати тривалість періоду між датами кастрації й запилення. Запилення кастрованих колосів як озимого, так і ярого ячменю здійснювали методом *twirl* колос на колос. Для ярого ячменю метод *twirl* має особливості у зв'язку з ніжнішими частинами стебла і колоса порівняно з ячменем озимим. За гібридизації типу голозерний × плівчастий важливо використовувати в якості материнського компонента голозерний морфотип *nud*. Це дає змогу завчасно ідентифікувати і видаляти F_1 рослини, що виникли як результат самозапилення, та контролювати стан гібридності й цільову генетичну гетерогенність наступних популяцій. Такий важливий контроль в F_1 неможливо зробити за використання материнського компонента плівчастого морфотипу *Nud* замість голозерного *nud*.

Найважливіші лабораторні оцінки селекційного матеріалу голозерного ячменю на вміст у зерні протеїну, жиру, некрохмалистих полісахаридів бета-глюканів виконували на інфрачервоному експрес-аналізаторі SpectraAlyzer виробництва німецької компанії Zeutec.

На культурі голозерного ячменю ми виконували кілька програм, спрямованих на поліпшення харчової (біологічної) цінності зерна. У цих програмах задіяні лабораторні процедури аналізу цільових ознак харчової цінності зерна. Тестування доборів голозерного ячменю на вміст у зерні органічного і мінерального фосфору здійснювали відповідно до лабораторного протоколу [14, 15] з власними модифікаціями, налаштованими на масовий аналіз селекційних зразків [16]. Вміст у зерні пігментів антоціанінів визначали за прискореною методикою [17]. Електрофоретичний аналіз білків гордеїнів індивідуальних насінин ячменю виконували із застосуванням лабораторних процедур, розроблених у відділі генетичних основ селекції СГІ—НЦНС НААН України [18]. Електрофорез гордеїнів кожної зернівки здійснювали у двох варіантах: у ПААГ з кислим буфером рН 3,1 та ДСН-ПААГ у класичній буферній системі Laemmli [19] з рН 6,8/8,8 у концентрувальному та розподільчому (укороченому за довжиною до 80 мм) гелях відповідно. Вміст амілози у зерні голозерного ячменю визначали згідно з лабораторною процедурою [20].

Детекцію цільових гордеїндефіцитних мутацій мутантів Risø 1508, Risø 56, R118 виконували згідно з ПЛР протоколом, описаним раніше [21]. Для ідентифікації в популяціях мутації *ssIIa* у локусі *sex6* застосовували лабораторну процедуру, подану в попередній публікації [22].

ГОЛОЗЕРНИЙ ХАРЧОВИЙ ЯЧМІНЬ

ТАБЛИЦЯ 1. Селекційний і генетичний матеріал, використаний у дослідженнях

Сорт, мутант	Країна походження	Рядність
Сорти з високим вмістом амілози		
Himalaya 292	Австралія	2
Hilose	Канада	2
Гордеїндефіцитні мутанти		
R-118	Ефіопія	6
Risø 56	США	2
Risø 1508	США	2
Низькофітатні мутанти з <i>Lpa</i> -генами		
CDC Lophy-1	Канада	2
LP1-2581	США	2
LP1-2163H	США	6
LP3-1159	США	6
LP640-1304	США	6
Лінії ячменю з <i>Glu-D1</i> алелями пшениці		
Golden Promise	США	2
Golden Promise (Glu-D1x5)	США	2
Golden Promise (Glu-D1y10)	США	2
Golden Promise (Glu-D1x5+y10)	США	2
Сорти ячменю <i>waxy</i> зі зміненим співвідношенням амілоза/амілопектин		
CDC Alamo (wx)	Канада	2
CDC Candle (wx)	Канада	2
Fibar (wx)	Канада	2
Rattan (wx)	Канада	2
Безості сорти		
Модерн б/о	Україна	2
120706в б/о	Україна	2
120708в б/о	Україна	2
Колекційні зразки ячменю з кольоровим зерном		
Arabische (помаранчевий, плівч.)	Україна	2
Ocimana 6. Avamaï (світло-синій, голий)	Аргентина	6
var. <i>dagesthanicum</i> (синій, голий)	Німеччина	2
var. <i>viride</i> (синій, голий)	Ефіопія	2
Orki SZ (фіолетовий, голий)	Польща	2
BM – МГФ (фіолетовий, голий)	Болгарія	2
Abyssinian 1105 (чорний, плівч.)	Ефіопія	2
H 3334 Sulto 1 (чорний, плівч.)	Ефіопія	2
Negra Manfredi (чорний, плівч.)	Аргентина	6
Jet (чорний, голий)	Ефіопія	2
Arabische (чорний, голий)	Німеччина	6
1065-119 (чорний, голий)	Чехія	2

Результати та обговорення

Візуально різницю між голозерним і плівчастим ячменем показано на рис. 1. Голозерний ячмінь, як згадано вище, є вільним від зернової плівки, яка у плівчастого ячменю тісно прикріплена до зерна ліпідним шаром. За біохімічним складом зернова плівка плівчастого ячменю майже не відрізняється від звичайної ячмінної соломи. А отже, на відміну від полігастричних жуйних тварин із чотирикамерним шлунком (корови, вівці, кози), які легко перетравлюють солому, для моногастричних тварин з однокамерним шлунком (свині, коні, кролі), так само як і для людей, ячмінна плівка є антипоживною і може спричинити патології системи травлення.

Відокремити зернову плівку в плівчастого ячменю від зерна можна лише механічним шліфуванням (перлуванням) з втратою до 30 % урожаю одночасно з найціннішими у харчовому і кормовому відношенні оболонкою зерна і зародком. *Отже, зерно голозерного ячменю (як і продукти його переробки) однозначно біологічно цінніше за зерно плівчасте, як у кормовому, так і харчовому вимірах.*

Голозерний ячмінь це, подібно до пшениці, чисте зерно, вільне від плівки, і особливо цінний корм у свинарстві та може без жодних втрат цінних кормових компонентів майже еквівалентно (за винятком пігментів каротиноїдів, на які багате кукурудзяне зерно) замінити кукурудзу також у скотарстві [23].

Створенню перших наших сортів голозерного ячменю передувала складна селекційна робота, яка була започаткована нами ще 20 років тому. Голозерний ячмінь має всі селекційні проблеми і вади, які притаманні звичайному плівчастому ячменю, плюс ціла низка специфічних проблем, найголовніші серед яких — зернова продуктивність, якість вимолоту зерна і травмування зародка за механічного обмолоту.

Зернова плівка (майже те саме, що й солома) плівчастого ячменю становить масову частку 10—15 % загального урожаю зерна. Теоретично голозерний ячмінь без плівки мав би поступатися за урожаєм зерна плівчастому ячменю саме на таку частку. Однак селекціонер не



Рис. 1. Зразки ячменю: ліворуч — плівчастий, праворуч — голозерний

був би успішним, якби був нездатний на практиці коригувати теоретичні поняття.

Селекція самозапилюючих культур сьогодні базується головним чином на схрещуваннях, де батьківськими компонентами для гібридизації є сучасні високопродуктивні сорти з відмінними агрономічними і технологічними характеристиками. Однак ситуація з голозерним ячменем на початку здійснення нашої програми була далеко не сприятливою для успішного старту. Конкурентних, високопродуктивних, зареєстрованих в Україні сортів голозерного ячменю на той час не було жодного (!). А отже, не було й вихідної для схрещувань високоврожайної генетичної плазми, необхідної для успішного здійснення програми створення високопродуктивних сортів голозерного ячменю.

За відсутності необхідних компонентів схрещування на початковому етапі ми використовували у схрещуваннях з плівчастими сортами примітивні колекційні зразки голозерного ячменю переважно з колекції Інституту рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН України.

Основний вид схрещувань, який ми використовували на початку і продовжуємо використовувати донині, це гібридизація типу (голозерний × плівчастий високопродуктивний) з наступним жорстким доббором у популяціях за такими головними ознаками, як «зернова продуктивність», «голе зерно», «якісний вимолот зерна» та іншими важливими агрономічними характеристиками, серед яких у пріоритеті стійкість рослин до вилягання, продуктивність колоса, посухостійкість, стійкість до захворювань. І на перспективу нашим стратегічним завданням залишається максимально ефективно використання у схрещуваннях типу голозерний × плівчастий високопродуктивної генетичної плазми кращих сортів ярого і озимого плівчастого ячменю, насамперед іноземного походження (Канада, Франція, Німеччина, Чехія, Австралія). Особливо цінними донорами важливих селекційних ознак виявилися сорти голозерного ячменю Канади (CDC, University of Saskatchewan, проф. Brian Rossnagel). Далі акцентуємо увагу на ключових позиціях, тісно пов'язаних саме зі створенням сортів ячменю голозерного морфотипу.

Досить важливими і вельми специфічними для голозерного ячменю ознаками є форма зерна та конфігурація зародка зернівки. Останні параметри особливо важливі у сенсі можливого травмування зародка зернівки під час обмолоту, адже, на відміну від пшениці, у ячменю зародок виступає за овал зернівки (рис. 2). У плівчастого ячменю зародок зерна захищений каркасом зернової плівки, а у голозерного ячменю такого захисту немає, тому зародок має бути максимально утоплений в тіло зернівки, що захищає його від травмування. Найкраща можлива конфігурація зернівки і положення зародка подібні до пшеничної зернівки, що наближається до 95–100 %, гарантують високу стійкість зародка голозерного ячменю до травмування. Головним критерієм оцінки генотипів голозерного ячменю із зародком, стійким до травмування, є польова схожість насіння, яку ми ретельно контролюємо за індивідуального добору. На чутливість голозерного ячменю до травмування під час обмолоту важливо зважати



Рис. 2. Конфігурація зародка зерна голозерного ячменю (знизу) і пшениці (зверху)

за вирощування його на насіння, максимально знижуючи травмоспроможність молотильного барабана комбайна. Зважаючи на ці особливості обмолоту жодних проблем зі схожістю під час вирощування голозерного ячменю на насіння не виникає.

Тривалий час нам складно було вирішити практично досить важливу проблему якісного вимолоту голозерного ячменю. Мова йде про те, що у голозерного ячменю у 100 % зернин зернова плівка відокремлюється від зернівки. Але при обмолоті певна частина зернин все ж залишається у плівці, яку можна видалити, наприклад, лушенням зерна. Однак це додаткова й витратна технологічна операція, тому не бажана. Звичайно, пересічний аграрій віддаватиме перевагу тому сорту голозерного ячменю, який вимолочується на 100 % або наближено до того, подібно до пшениці, не потребуючи лушення.

Щоби досягти якісного вимолоту зерна голозерного ячменю ми використовували у схрещуваннях з голозерним ячменем широке різноманіття різних сортів і зразків плівчастого ячменю. В результаті численних багаторічних досліджень, спроб і помилок ми таки отримали очікуваний позитивний результат (вимолот майже 100 %) і дійшли кількох важливих висновків:

1) загалом 2-рядний колос голозерного ячменю має кращий вимолот, ніж 6-рядний;

2) впровадження безостого голозерного ячменю (як 2-рядного, так і 6-рядного) не вирішує, а швидше загострює проблему вимолоту зерна. Більше того, безостий колос виявляє апікальну (вершинну) стерильність і формує дрібне зерно у верхній частині колоса, що знижує його озерненість, підвищує морфологічну неоднорідність зерна за розмірами, а також негативно впливає на урожай зерна (рис. 3);

3) ості у ячменю, як продуктивний фотосинтетичний компонент, відіграють істотно вагомішу роль, ніж у пшениці, оскільки частка власне остюка у морфологічній структурі зовнішньої колосової плівки плюс ость становить до 75 %, тоді як у пшениці — лише 35—40 %. І це неодмінно впливає на урожай зерна. Ось чому у пшениці безості сорти успішно конкурують з остистими, а у ячменю безостих сортів майже немає;



Рис. 3. Колосся безостого 2-рядного голозерного ячменю

4) серед селекційного матеріалу ячменю з 2-рядним колосом за підбору певних комбінацій схрещування цілком досяжний практично 100 %-й вимолот зерна голозерного ячменю;

5) радикальне вирішення питання високого вимолоту зерна голозерного ячменю можливе впровадженням у селекційний процес матеріалу з геном *wax* (ваксі). Рецесивний алель *wax* впливає не лише на якість крохмалю зернівки, підвищуючи вміст у зерні цінних для здоров'я некрохмалистих полісахаридів бета-глюканів, а й сприяє пом'якшенню анатомічних структур колоса, що істотно позитивно позначається на якості вимолоту зерна голозерного ячменю (рис. 4). Впровадження у селекційний процес гена *wax* дало змогу отримати лінії не лише 2-рядного, а й голозерного 6-рядного ячменю з практично 100 %-м вимолотом зерна та урожаєм на рівні 100 ц/га (дані 2023 р.). Без впровадження гена *wax* отримати 6-рядний голозерний ячмінь з високим вимолотом зерна практично неможливо;

6) використання у схрещуваннях сортів голозерного ячменю Канади (CDC) також дало змогу істотно поліпшити якість вимолоту зерна голозерного ячменю.

За результатами наших досліджень сформульована концепція створення сортів голозерного ячменю з якісним вимолотом зерна, яка передбачає домінування в популяціях добору переважно 2-рядного



Рис. 4. 6-рядний колос рослини з геном *wax* (зверху) і без гена (знизу)

морфотипу, а 6-рядний морфотип має безальтернативно включати ген *wax*.

Критично важливою господарською ознакою для голозерного ячменю є зернова продуктивність, яка має бути не нижчою, ніж у кращих сортів півчастого ячменю. Складовими зернової продуктивності голозерного ячменю є високі продуктивність колоса, кущистість і стійкість рослин до вилягання, а також тип розвитку рослин (ярий, озимий чи альтернативний). Надважливою господарською ознакою, що безпосередньо впливає на урожай зерна, є стійкість рослин до посухи. Для поліпшення цих ознак після багатьох років досліджень ми зосередилися на залученні у схрещування з голозерним ячменем переважно кращих високопродуктивних сортів 2-рядного і 6-рядного ячменю іноземного походження (Канада, країни ЄС). Серед них нами обрано лише кілька сортів, які мають найвищу комбінаційну здатність. З міркувань конфіденційності селекційної програми ми не наводимо конкретні назви півчастих сортів-донорів, які ми здебільшого використовуємо у схрещуваннях.

Слід особливо наголосити, що згідно з нашими багаторічними спостереженнями, достовірної різниці за урожаєм зерна між кращими лініями голозерного 2-рядного і голозерного 6-рядного ячменю ми не спостерігали, хоча, здавалося б, вища рядність колоса 6-рядного ячменю мала би бути пов'язаною і з вищою урожайністю. Однак це не так. Більше того, 6-рядний морфотип поступається 2-рядному не лише гіршою якістю вимолоту зерна, а й однорідністю зерна за розмірами і масою 1000 насінин. Ці відмінності особливо важливі під час переробки зерна голозерного ячменю на харчові продукти. Тому цілком обґрунтовано ми вважаємо, що харчовий голозерний ячмінь має бути переважно 2-рядним, а кормовий як 2-рядним, так і 6-рядним.

У результаті доборів з різних популяцій ми накопичили значний ресурс селекційного матеріалу 2-рядного голозерного ячменю з доволі продуктивним колосом, який за кількістю зернин наближається до 40, а маса 1000 насінин — не нижче 50 г (рис. 5). Цей матеріал нами активно залучений у схрещування.

Продуктивна кущистість також є однією з критичних ознак як складова урожаю зерна. Для доборів рослин з високою кущистістю ми використовуємо розріджені посіви з нормою висіву не вище 1 млн



Рис. 5. Гігантські продуктивні колосся 2-рядного голозерного ячменю

схожих насінин на 1 га. В результаті майже весь створений нами перспективний селекційний матеріал голозерного ячменю відрізняється високою кущистістю.

Задля досягнення високої зернової продуктивності важливе значення має тип розвитку рослин ячменю (ярий, озимий чи альтернативний). На жаль, на Півдні України за останні роки системно складаються погодно-кліматичні умови, несприятливі для ярого ячменю, як півчастого, так і голозерного. Тому головну увагу у нашій програмі ми зосередили на створенні сортів голозерного ячменю озимого і альтернативного типів розвитку. Ми маємо нині потужний генетичний ресурс ярого ячменю, який за спеціальною програмою поступово і планомірно переводимо на озиму і альтернативну основу. Для виконання цієї доволі масштабної роботи ми використовуємо спеціально дібрані лінії голозерного ячменю альтернативного типу розвитку, які висіваємо навесні у ярому посіві та використовуємо як компоненти схрещування з матеріалом ярого типу розвитку. Отримане покоління F_1 висіваємо восени з подальшим формуванням популяцій для доборів генотипів голозерного ячменю з цільовими ознаками на основі альтернативного і озимого типу розвитку.

Перевагу віддаємо альтернативному типу розвитку як більш функціональному і краще адаптованому до умов вирощування. М'які зими останніх років не становлять особливої загрози для озимого й альтернативного голозерного ячменю з огляду на ризики можливого вимерзання рослин.

Стійкість рослин до вилягання завжди була і залишається також критично важливою ознакою для ячменю взагалі, й для голозерного ячменю особливо. Для поліпшення цієї ознаки ми використовуємо переважно сорти іноземного походження, які істотно переважають вітчизняні за стійкістю до вилягання. Оцінку схильності до вилягання рослин селекційного матеріалу виконуємо задовго після повного дозрівання зерна, обов'язково порівняно зі стандартом озимого півчастого ячменю (лінія сорту Cinderella), який не поступається за стійкістю до вилягання рослин навіть кращим сортам озимої пшениці. Така методика дає змогу отримувати селекційний матеріал голозерного ячменю зі стабільно високою стійкістю до вилягання.

Ячмінь загалом, як відомо, є досить посухостійкою культурою і культивується в регіонах з надзвичайно жорсткими посухами. Упродовж особливо посушливих років ми порівнювали стійкість до посухи матеріалу півчастого і голозерного ячменю за ознаками виповненості зерна та натури зерна. За показниками такої важливої характеристики посухостійкості, як «натура зерна» (г/л), півчастий ячмінь істотно і стабільно поступається голозерному. У голозерного ячменю «натура зерна» в середньому становила 800 г/л, у півчастого — 650 г/л, а максимальна різниця натури зерна на користь голозерного ячменю була понад 200 г/л.

Голозерний ячмінь порівняно з півчастим має також стабільно за роками краще виповнене зерно і вищу масу 1000 насінин. Навіть у найжорсткіші за посухою роки ми жодного разу не спостерігали у

сортів і перспективних ліній голозерного ячменю ознаки зморшкуватості зерна, зернівки голозерного ячменю завжди ідеально виповнені.

Тривалість вегетаційного періоду ячменю, як відомо, тісно позитивно корелює з урожайністю зерна: що довший період вегетації, то вищий урожай. В умовах посушливого Півдня селекція ячменю була і залишається орієнтованою переважно на сорти раннього і середньораннього дозрівання, а сорти пізні практично не зустрічалися, бо вважалося, що рослини середньопізнього і пізнього дозрівання ризикують потрапити під запал, і втратити урожай зерна внаслідок формування в колосах вторинних стебел запаленого (зморшкуватого) зерна.

Однак наші багаторічні спостереження за формуванням урожаю у ліній голозерного ячменю середньопізніх і пізніх термінів дозрівання не підтверджують цю поширену серед селекціонерів згадану вище концепцію. Навпаки, за останні кілька років ми спостерігали чітко виражену тенденцію підвищення урожаю перспективних ліній озимого голозерного ячменю паралельно з продовженням вегетаційного періоду від середньостиглого до середньопізнього і пізнього термінів дозрівання. Наочним підтвердженням цієї тенденції є створення нового сорту озимого 2-рядного голозерного ячменю середньопізнього терміну дозрівання. Сорт отримав назву «Імператор». За результатами наших випробувань у 2023 р. в Одеському регіоні, сорт показав урожай 85—90 ц/га і в 2024 р. буде переданий до Держсортвипробування.

І нарешті, головна мета, заради якої вирощують ячмінь — вихід чистого продукту переробленого зерна і його технологічна характеристика. У найпростішому варіанті — це вихід крупи під час переробки зерна ячменю. Тут голозерний ячмінь має найвагомішу перевагу перед ячменем плівчастим. Щоби отримати якісну крупу зерно плівчастого ячменю шліфують на спеціальних машинах голendraх з абразивними робочими поверхнями. Внаслідок цього видаляється зернова плівка разом зі значною часткою зернової оболонки і зародком. А в оболонці зерна та зародку містяться найважливіші для організму людини і тварин компоненти (вітаміни, мінерали, фітохімічні й біоактивні сполуки), які потрапляють у висівки й втрачаються як відходи, через що біологічна (кормова і харчова) цінність зерна ячменю знижується. Частка відходів за шліфування зерна плівчастого ячменю сягає до 25—30 % урожаю, а вихід переробленого продукту (крупи) становить лише 60—65 % первинної маси переробленого зерна.

Докорінно інша картина спостерігається для ячменю голозерного. По-перше, **вміст усіх без винятку цінних харчових компонентів зерна у голозерного ячменю порівняно з плівчастим підвищений** щонайменше на масову частку антипоживної зернової плівки (10—15 %), яка у голозерного ячменю відсутня і її немає потреби видаляти шліфуванням. По-друге, зерно голозерного ячменю **можна безпосередньо переробляти в крупу, пластівці чи борошно практично без втрат, зберігаючи всі цінні харчові (кормові) компоненти зерна**. Вихід крупи за

переробки зерна голозерного ячменю становить 90—95 %, що на 30 % (!) вище, ніж у плівчастого ячменю.

З огляду на це очевидно, що зерно голозерного ячменю, порівняно з плівчастим, має підвищений вміст цінних кормових (харчових) компонентів зерна, які майже не втрачаються внаслідок переробки. Вихід кінцевого продукту під час переробки зерна голозерного ячменю щонайменше на 30 % вищий, а біологічна (кормова і харчова) цінність кінцевого продукту переробки зерна голозерного ячменю також істотно вища, ніж у ячменю плівчастого.

Таким чином, голозерний ячмінь має цілу низку біологічних, кормових (харчових), технологічних, агрономічних, і найголовніше, економічних переваг над ячменем плівчастим, який широко відомий аграріям України. В результаті залишається лише одне питання: чому тоді за всіх переваг над ячменем плівчастим, голозерний ячмінь досі мало відомий аграріям і майже не вирощується в Україні?

Натепер ми створили кілька сортів голозерного ячменю. Це ярий голозерний 2-рядний ячмінь сорт Ахіллес, занесений до Держреєстру у 2014 р., і озимий голозерний 6-рядний ячмінь сорт Крикс, занесений до Держреєстру у 2020 р. Ці сорти не поступалися за урожаєм зерна плівчастому стандарту, а сорт Ахіллес, за даними Держсортвипробування, взагалі перевищував усі сорти плівчастого ячменю за вмістом у зерні протеїну на 2—2,5 %. Однак немає сенсу описувати характеристики цих сортів, оскільки за відсутності попиту вони обидва були, на жаль, зняті у 2023 р. з Держреєстру.

Як результат обґрунтованої вище зміни орієнтації нашої селекційної програми голозерного ячменю переважно на озимий (альтернативний) 2-рядного морфотипу з високою якістю вимолоту зерна ми створили новий сорт озимого 2-рядного голозерного ячменю Імператор (рис. 6). Сорт середньопізній за тривалістю вегетаційного періоду, урожайний і посухостійкий, має високу стійкість до вилягання, високу кустистість, стійкий до основних фітозахворювань, поширених у Південному регіоні. Рекомендована норма висіву не більше 2 млн схожих насінин на 1 га. В умовах виробничого випробування у господарстві компанії «Агрокрай», що на Хмельниччині, маса 1000 насінин сорту Імператор становила майже 60 г.

У 2023 р. ми мали надзвичайно приємну можливість переконатися у надвисокій посухостійкості голозерного ячменю загалом і сорту Імператор зокрема, і не лише в період від формування зерна до його дозрівання, у чому ми переконувалися у гостро посушливі роки неодноразово. У поточному сезоні ми висівали озиму пшеницю і озимий ячмінь за умов небувалої посухи (два місяці перед посівом без опадів), практично у сухий ґрунт. Після посіву і появи вкрай не-



Рис. 6. Новий сорт озимого 2-рядного голозерного ячменю Імператор

рівномірних «рваних» сходів знову минув місяць без опадів. За цих умов на сходах (2 листки) озимої пшениці вже почали з'являтися ознаки зневоднення, усихання і загибелі рослин. А на сходах озимого голозерного ячменю, і особливо на рослинах сорту Імператор, ми **не спостерігали жодної негативної реакції (!) на неймовірно жорстку посуху**. Понад те, рослини сорту Імператор вже увійшли у фазу кущіння. Різниця між реакцією сходів на жорстку посуху озимої пшениці і озимого голозерного ячменю була просто вражаючою на користь озимого голозерного ячменю.

На підставі наших польових спостережень можна зробити цілком обґрунтований висновок про те, що голозерний ячмінь є надзвичайно посухостійкою культурою як у період формування—налив—дозрівання зерна, так і у фазу сходів. Ця властивість голозерного ячменю особливо важлива за умов глобальної зміни клімату у бік потепління і орієнтації аграрного виробництва на вибір зернових культур з високою посухостійкістю. Маємо усі підстави стверджувати, що голозерний ячмінь у цьому виборі буде займати одне з перших місць.

Вище наголошувалося, що зерно ячменю як харчовий продукт, і особливо зерно голозерного ячменю, є продуктом з високою харчовою (біологічною) цінністю зерна. Світові дослідження останніх років на культурі ячменю свідчать, що харчову цінність його зерна можна також істотно поліпшити. Ї нами вперше в Україні започаткована досить масштабна програма селекційно-генетичного поліпшення харчової цінності зерна голозерного ячменю, яка включає кілька окремих напрямів.

Метою цієї унікальної програми є радикальне поліпшення харчової (кормової) цінності зерна ячменю за антиоксидантними характеристиками, вмістом вітамінів і мінералів, підвищення вмісту в зерні розчинної дієтичної клітковини та створення безглютенового (*gluten-free*) голозерного харчового ячменю.

Проте перш ніж перейти до характеристики напрямів поліпшення біологічної цінності зерна, зупинимося на феномені, який ми щорічно спостерігаємо на голозерному ячмені. Це феномен ушкодження зерна голозерного ячменю зерновою комірною міллю. Біологічний метод оцінювання харчової цінності зерна з використанням шкідливих комах серед усіх відомих методів є одним із найоб'єктивніших [27].

На рис. 7 представлено неушкоджені зернівки голозерного ячменю і зернівки, ушкоджені зерновою комірною міллю. Личинка молі вибірково і цілеспрямовано виїдає спочатку щиток зернівки, а згодом з'їдає і власне сам зародок. Ендосперм зерна голозерного ячменю личинка молі, як правило, не ушкоджує. Покрокове ушкодження зародка зерна проілюстровано на зернівках нижнього ряду зліва направо. В кінці ряду 6 зернівок з повністю виїденим зародком. Такий феномен ми спостерігаємо щорічно. Після збирання урожаю міль ушкоджує зерно голозерного ячменю в першу чергу. У той самий час зерно плівчастого ячменю і пшениці залишається не займаним і ушкоджується міллю пізніше. Характер ушкодження зерна пшениці відмінний від голозерного ячменю. Личинка молі відроджується з яйця і проникає в середину зерна пшениці та живиться ендоспермом.



Рис. 7. Зернівки голозерного ячменю не ушкоджені (верхній ряд) і ушкоджені (нижній ряд) зерновою комірною мілью (*Sitotroga cerealella*)

У разі несвоєчасного застосування фумігації зерна голозерного ячменю від збирання урожаю до посіву його насіння може повністю втратити схожість. Таким чином, личинка зернової молі є індикатором того, що біологічно найцінніша частина зерна голозерного ячменю саме зародок зернівки.

Один із перших і найважливіших наших інноваційних напрямів поліпшення харчової цінності зерна голозерного ячменю є створення селекційного матеріалу голозерного ячменю з кольоровим (синім, фіолетовим і чорним) зерном (рис. 8).

Пігменти з групи поліфенолів (флавоноїдів), що забарвлюють зерно ячменю — антоціаніни, такі як і в кольорових ягодах і фруктах (пеларгонідин, ціанідин, дельфінідин, пеонідин, петунідин, мальвідин), характеризуються надвисокою антиоксидантною активністю (вище за відомі антиоксиданти ресвератрол, кверцетин, тролокс) і надають зерну ячменю і продуктам його переробки радикально поліпшений функціональний харчовий і кормовий статус. Особливою групою поліфенольних пігментів зерна ячменю є фітомеланіни, які надають зерну ячменю чорного і коричневого забарвлення. Фітомеланіни, як і антоціаніни, характеризуються високою антиоксидантною активністю.

Синій колір зерна ячменю зумовлений пігментами антоціанінами, які, як і в кольоровій пшениці, локалізовані у алеїроновому шарі. Фіолетовий колір зерна ячменю визначається антоціанінами, що зосереджені структурно в оболонці зерна (перикарпі). Комбінування синього і фіолетового кольорів дає чорний колір різної інтенсивності.

Слід зазначити, що успадкування синього забарвлення зерна ячменю має доволі складний генетичний контроль, який пов'язаний з комплементарною взаємодією генів *Ant1* та *Ant2*, що контролюють синє забарвлення, а також з триплоїдним станом алеїронового шару, в якому локалізований синій колір, та проявом ксенійності.

Зразок інтенсивного синього кольору, наведений на рис. 8, отриманий нами у спеціальних схрещуваннях шляхом комбінації генів *Ant1* та *Ant2* з комплементарним типом взаємодії. Цільовим кольором зерна голозерного ячменю у наших програмах є інтенсивний чорний, який має комбінувати в одному генотипі фіолетовий, синій кольори,



Рис. 8. Зразки зерна голозерного ячменю звичайного жовтого, чорного і синього кольорів. Внизу збільшено зразки різної величини зерна голозерного ячменю інтенсивно чорного кольору

плюс забарвлення, зумовлене фітомеланінами (кодує ген *Blp1*), та інтегрувати максимальну антиоксидантну активність зерна як харчового продукту.

Комбінування кольорів зерна голозерного ячменю процес набагато складніший, ніж у пшениці, оскільки у ячменю на забарвлення, зумовлене антоціанінами, накладається забарвлення, що пов'язане з чорними і темно-коричневими пігментами фітомеланінами. Тому, наприклад, визначений у зерні вміст лише антоціанінів часто не корелює з інтенсивністю забарвлення зерна.

На рис. 9 можна бачити, що визначений у зерні вміст антоціанінів не збігається з інтенсивністю забарвлення зерна, оскільки колір зерна значною мірою маскується вмістом фітомеланінових пігментів. Тому у випадку з голозерним ячменем важливо визначати окремо вміст антоціанінів і фітомеланінів. Інтегровальним показником наявності у зерні голозерного ячменю зазначених пігментів може бути антиоксидантна активність, хоча вона також пов'язана з наявністю у зерні не лише антоціанінів і фітомеланінів, а й інших поліфенольних сполук з антиоксидантною активністю.

На рис. 10 представлено зразки ячної крупи ТМ «Жменька» з півчастого ячменю, крупи з голозерного ячменю із жовтим зерном і з голозерного ячменю з чорним зерном. Зразок крупи ТМ «Жменька» має світліший відтінок порівняно з крупою з голозерного ячменю, оскільки вона отримана зі шліфованого зерна. Вихід крупи зі шліфованого півчастого ячменю становить 60—65 %, і вона втрачає під час шліфування зерна разом з півкою також найцінніші у харчовому відношенні зернову оболонку і зародок.

Крупа з голозерного ячменю темніша за попередню, має вихід до 90 % і зберігає всі цінні харчові компоненти зернової оболонки і за-



Рис. 9. Вміст пігментів антоціанінів у зерні зразків голозерного ячменю з різним забарвленням зерна: зліва направо — 239, 7 і 6 ppm



Рис. 10. Ячна крупа з різних зразків ячменю: крупа з плівчастого ячменю ТМ «Жменька» (*ліворуч*); крупа з голозерного ячменю (*посередині*); крупа з чорного голозерного ячменю (*праворуч*)

родка. Крупа з чорного ячменю (також вихід до 90 %) оригінального чорного кольору без втрат жодного із харчових компонентів зерна.

Високий вміст унікальної розчинної дієтичної клітковини у вигляді некрохмалистих полісахаридів бета-глюканів є найважливішою харчовою характеристикою зерна ячменю. Зазвичай вміст бета-глюканів у зерні ячменю становить у середньому 4,2—5,0 % (у пшениці 0,2—0,4 %). Однак він може бути істотно підвищений за використання спеціального генетичного матеріалу. У якості такого ми використовуємо головні сорти голозерного ячменю Канади з крохмалем типу *wax*, такі як CDC Alamo, CDC Fibar, CDC Candle, CDC Rattan. Останні несуть ген *wax* (хромосома 1S = 7HS) і, як наслідок експресії цього гена, підвищений (7—8 %) вміст у зерні бета-глюканів. Такий генетичний матеріал широко використовується нами у схрещуваннях упродовж 10 років, і від цих схрещувань накопичено значну кількість перспективних ваксі-ліній переважно озимого типу розвитку з високим вмістом у зерні бета-глюканів.

Генетичний матеріал з геном *wax* цікавий не лише через високий вміст бета-глюканів. Він цінний також тим, що ген *wax* має сильний плейотропний ефект на анатомічні структури рослин-носіїв, який проявляється у пом'якшенні насамперед структурних елементів колоса. Як результат, критична для голозерного ячменю ознака «якість вимолоту зерна» у рослин з геном *wax* істотно поліпшується. Наразі ми маємо достатньо великий об'єм перспективного селекційного ма-

теріалу з геном *wax*, високим вмістом у зерні бета-глюканів і вимолотом зерна на рівні майже 100 %. Ми отримали також високопродуктивні лінії ваксі озимого голозерного ячменю із 6-рядним колосом (який у нормі вимолочується значно гірше 2-рядного) і вимолотом зерна близько 100 %. Нами помічено, що ген *wax* негативно не впливає на агрономічні характеристики рослин ячменю, тому вважаємо, що він має бути обов'язково у селекційних програмах голозерного ячменю.

Вміст бета-глюканів у зерні ячменю може бути також істотно підвищений внаслідок використання специфічної генної мутації, яка блокує активність ферменту синтази крохмалю *ssIIa* (ЕС 2.4.1.21) [24–26]. У результаті блокування ферменту різко знижується вміст у зерні крохмалю (з 60 % до 18–20 %), водночас підвищується вміст бета-глюканів (до >10 %) та амілози у крохмалі (з 25 до 70 %).

Мутація *ssIIa* активно використовується нами у схрещуваннях з метою створення унікального за харчовими характеристиками голозерного ячменю з чорним зерном. Такі перші селекційні лінії ярого голозерного ячменю зі звичайним жовтим і чорним зерном ми вже створили й ретельно досліджуємо як за агрономічними, так і харчовими характеристиками.

Як зазначалось, мутація *ssIIa* більш ніж утричі (18–20 %) порівняно з нормою (60–65 %) знижує вміст крохмалю у зерні ячменю. В результаті зерно набуває сплющеної форми, а на борізді зерна утворюється специфічне заглиблення, яке особливо добре помітно на жовтому зерні. Пропорційно зі зниженням частки крохмалю у зерні ячменю підвищується вміст усіх без винятку цінних харчових компонентів зерна, локалізованих переважно в його оболонці: вітамінів, мінералів, жирів, біоактивних сполук тощо.

Однак разом зі зниженням вмісту крохмалю падає до 30 % також урожай зерна селекційних ліній з мутацією *ssIIa*. При створенні сортів харчового голозерного ячменю з мутацією *ssIIa* уникнути зниження урожаю буде практично неможливо, тому нашим пріоритетним завданням роботи з мутацією *ssIIa* є пошук ознак і варіантів селекції, здатних компенсувати зумовлене мутацією зниження урожаю зерна. Саме це питання наразі досліджується нами у зв'язку з використанням *ssIIa* мутації. Найкращим варіантом підвищення урожаю зерна генотипів з мутацією *ssIIa* є переведення мутації з генотипів ярого типу розвитку на озимий і альтернативний типи. Такі лінії озимого голозерного ячменю з мутацією *ssIIa* і чорним зерном вже отримано (рис. 11), а їх урожайність буде підвищена подальшим схрещуванням і доборами.

Крім підвищення вмісту дієтичної клітковини бета-глюканів, для харчового голозерного ячменю важливим також є збільшення вмісту амілози як складової частини крохмалю. Амілоза у нормі становить 20–25 % складу крохмалю. Як лінійний полімер глюкози, амілоза більш, ніж амілопектин (розгалужений полімер глюкози), є резистентною до амілолітичного гідролізу та здатна формувати резистентний (RS) до травних ферментів крохмаль, який імітує властивості дієтичної клітковини. Тому підвищений вміст амілози у крохмалі є додатковим чинником поліпшення харчової цінності зерна.



Рис. 11. Селекційні лінії озимого голозерного ячменю з мутацією *ssIIa* та унікальними харчовими характеристиками: *ліворуч* — з жовтим зерном, *праворуч* — з чорним зерном

Як джерело високого вмісту амілози у крохмалі крім мутації *ssIIa* ми використовуємо у схрещуваннях також сорт канадського голозерного ячменю CDC Nilose, який має високий вміст амілози у крохмалі, а також високий вміст у зерні бета-глюканів. Згідно з класифікацією сортів ячменю Канади, високим вмістом амілози у крохмалі вважають $\geq 40\%$, а високим вмістом бета-глюканів є значення $\geq 6,5\%$. Сорт Nilose містить понад 40–45 % амілози у крохмалі. На основі мутації *ssIIa*, а також з використанням у схрещуваннях сорту CDC Nilose виділено кілька десятків перспективних селекційних ліній озимого голозерного ячменю з високим вмістом амілози у крохмалі, які комбінують як звичайне жовте, так і чорне зерно.

Наступною нашою важливою програмою поліпшення харчової цінності зерна ячменю є створення голозерного ячменю з чорним (інтенсивним синім) зерном і підвищеним вмістом у зерні біодоступного ключового мінералу — фосфору. Ця програма є першою і єдиною в Україні й поставила за мету не лише поліпшення харчової цінності зерна ячменю за мінеральним профілем, а й спрямування зусиль на захист навколишнього середовища від засмічення органічними фосфатами.

Серед п'яти найважливіших мінеральних елементів (Ca, P, K, Na, Mg) фосфор є другим за функціональним значенням, відіграючи стратегічну роль у клітинному метаболізмі, у структурі фосфоліпідів як складових клітинних мембран [28].

Зерно ячменю містить фосфору в середньому 470 мг/100 г сухої речовини і переважає за вмістом цього мінералу зерно інших злаків, таких як, наприклад, пшениця (410), жито (380), овес (340), рис (285), кукурудза (310). Однак ~65–85 % загального вмісту фосфору в зернових і бобових культурах зв'язано у структурі фітинової кислоти (міоїнозитол-1,2,3,4,5,6-гексакісфосфат, аббревіатура Ins P₆), як основного депонента фосфору зерна, що в органічній формі фітатів недоступний для засвоєння організмом з однокамерним шлунком і птиці [29]. Незасвоєний організмом людини, нежуйними тваринами

з однокамерним шлунком (свині) і птицею фосфор у формі фітатів, як органічних фосфатів, виводиться з фекаліями у навколишнє середовище, спричиняючи масштабну екологічну проблему («цвітіння» річок і озер як джерел питної води), що отримала назву евтрофікація. За підрахунками американських фахівців, лише у США з екскрементами птиці викиди в навколишнє середовище органічного фосфору від індустріального птахівництва оцінюються у понад 250 000 т щорічно з тенденцією до зростання [30].

Задля вирішення проблеми біодоступності фосфору зерна ячменю в США було отримано серію мутацій ячменю з низьким вмістом органічних фітатів і відповідно підвищеним вмістом засвоюваного мінерального фосфору. Генетичні лінії з *lpa*-мутаціями (low phytic acid) були люб'язно надані нам для досліджень проф. Phil Bregitzer (USDA-ARS, National Small Grains Germplasm Research Facility, Aberdeen, South Dakota, USA). *LP1-2581* — ярий, плівчастий, 2-рядний; *LP1-2163H* — ярий, голозерний, 6-рядний; *LP3-1159* — ярий, плівчастий, 6-рядний; *LP640-1304* — ярий, плівчастий, 6-рядний. Крім цього матеріалу ми використовували у програмі також зареєстрований сорт канадського ярого голозерного ячменю CDC Lophy-1 (*lpa-3-1*), наданий нам проф. Brian Rossnagel (University of Saskatchewan, Crop Development Centre, Saskatoon, Canada).

У результаті реалізації програми схрещувань і доборів із залученням згаданих мутантів, нашого сорту голозерного ячменю Ахіллес, джерела чорного забарвлення зерна Abyssinian 1105 і оригінальної лабораторної процедури ідентифікації *lpa*-мутацій нами вже створена серія перспективних селекційних ліній голозерного ячменю з чорним зерном і підвищеним майже на 80 % вмістом у зерні біодоступного мінерального фосфору (рис. 12) [16].

З огляду на важливе значення програми біофортифікації голозерного ячменю за вмістом у зерні мінерального фосфору вона спрямована на залучення у дослідження всіх названих *lpa*-мутацій і поетапне переміщення створеного генетичного і селекційного матеріалу з ярого типу розвитку на озимий і альтернативний, як шлях підвищення зернової продуктивності сортів голозерного ячменю з *lpa*-мутаціями.

Найрезультативнішим джерелом поліпшення голозерного ячменю за максимальним вмістом у зерні мінерального фосфору виявився сорт CDC Lophy-1 (рис. 13). Один із напрямів подальших досліджень матеріалу голозерного ячменю з *lpa*-мутаціями буде комбінування в одному генотипі різних *lpa*-мутацій з метою отримання голозерного ячменю з кумулятивним ефектом на вміст у зерні мінерального фосфору різних *lpa*-мутацій, які розміщені у хромосомах 1Н, 2Н, 4Н і 7Н та незалежно спадкуються.

Ячмінь, як пшениця й жито, належить до культур, що містять у зерні білки клейковини (глютен), а тому не є бажаною їжею для осіб, чутливих до клейковини, особливо тих, хто має патологічну аутоімунну ентеропатію [31]. Щонайменше три важливі патології пов'язані з вживанням харчових продуктів, що містять клейковину. Перша — це алергічна реакція на клейковину, яка охоплює лише



Рис. 12. Зразки ячменю з різним забарвленням зерна: голозерний Ахіллес — жовте зерно; плівчастий Abyssinian 1105 — чорне зерно; голозерна селекційна лінія з *lpa-3-1* мутацією похідна від схрещування з Abyssinian 1105 — чорне зерно

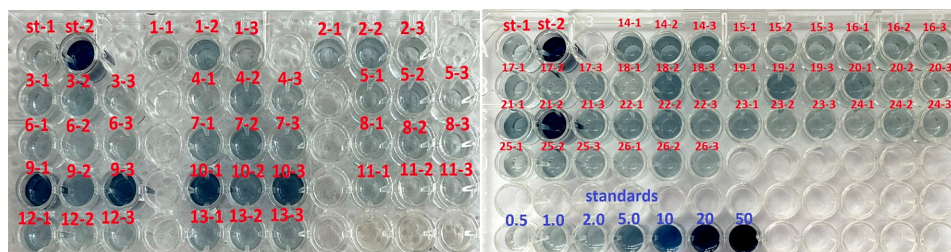


Рис. 13. Приклад ідентифікації *lpa*-доборів у популяції генотипів ячменю F_5 , Lophy $\times$ Abyssinian 1105 (чорне зерно). Зразки з інтенсивним синім забарвленням містять у зерні максимум мінерального фосфору

0,2—0,5 % людства, однак має різко виражений клінічний прояв [31]. Другою є аутоімунна патологія, що має назву целиакія (coeliac disease — CD) і охоплює >1,6 % населення світу [32]. І третя, нещодавно ідентифікована патологічна нецелиакійна чутливість до клейковини, відома в англomовній літературі під абревіатурою NCGS (non celiac gluten sensitivity), яка виявлена у 6 % дослідженого населення, наприклад, США [33], а в деяких країнах до 10 % [34]. На додаток, більш як 90 % целиакійно чутливих осіб залишаються у світі не діагностованими, створюючи феномен «целиакійного айсберга» [35].

З огляду на ці патології, що тісно пов'язані з білками клейковини, у світі розгорнуто масштабну програму у харчовій індустрії, спрямовану на створення продуктів із зерна злаків, що не містять клейковини (безглютенові або gluten-free products). Світова ринкова вартість gluten-free харчових продуктів оцінювалася в 2018 р. у \$4,35 млрд, і згідно з прогнозом, зросте (7,7 % щорічний приріст за CAGR формулою) за оптимістичними даними до \$7,91 млрд у 2026 р. [36]. Отже, створення сортів зернових культур харчового призначення, включно з ячменем, що не містять клейковини, безсумнівно, є економічно привабливою темою для наукових досліджень.

Методом традиційної селекції, комбінуючи три гордеїндефіцитні мутанти, безглютеновий (точніше ультранизкоглютеновий)

ячмінь був створений співробітниками інноваційного центру в харчовій індустрії CSIRO (Австралія) [37]. На базі цих розробок вперше у світовій практиці створені сорти ультранизькоглютенowego (~5 ppm) півчастого ячменю Ohalo та Ohalo2 з вмістом клейковинних білків гордеїнів у зерні в 10 000 разів нижчим, ніж у звичайних сортів ячменю. Ці сорти ячменю повністю відповідають вимогам WHO до безглютенових (gluten-free) продуктів і під торговою маркою Kebab® вийшли на світовий ринок безглютенових харчів та безалкогольних напоїв (www.csiro.au). На створення ультранизькоглютенових сортів ячменю Ohalo та Ohalo2 витрачено понад 10 років, вони захищені патентами Австралії і торговою маркою Kebab®, становлять важливу комерційну складову Австралії. Вільно придбати їх для комерційного використання неможливо.

Грунтуючись на дослідженнях австралійських авторів, ми поставили перед собою завдання створити шляхом традиційної селекції власний ультранизькоглютеновий матеріал, але не півчастого, як у Австралії, а голозерного ячменю з чорним зерном, комбінуючи в одному генотипі три гордеїндефіцитні мутації ячменю: півчасті ярі 2-рядні мутанти Risø 1508, Risø 56 та спонтанний D-гордеїндефіцитний мутант R118 походженням з Ефіопії. Донором ознаки «чорне зерно» є 6-рядний ярий голозерний мутант R118. Мутанти Risø 1508 та Risø 56 отримані нами з колекції USDA (the National Plant Germplasm System USA), а мутант R118 отриманий з John Innes Centre Public Collections, Norwich (UK).

Теоретичне підґрунтя цього дослідження наступне. Клейковинні білки ячменю гордеїни містять 35–55 % загальної кількості азоту зерна. Вони складаються з 4 груп поліпептидів (табл. 2). Основну частку клейковинних білків ячменю становлять гордеїни В і С. Гордеїни D та γ-гордеїни наявні в зерні у мінорній кількості [38].

Біосинтез основної фракції гордеїнів, а саме родини гордеїнів В і С, кодується 13 і 20–30 генами, відповідно. Біосинтез В-гордеїнів кодує локус *Hor-2* у короткому плечі хромосоми 1Н (рис. 14). Високолізинний мутант ячменю Risø 56 містить геномну делецію розміром 85 тисяч пар нуклеотидів ДНК, яка несе В-гордеїновий локус. Внаслідок делеції у мутанта Risø 56 відсутні В-гордеїни [39].

С-гордеїни кодує локус *Hor-1* у короткому плечі хромосоми 1Н. Мутант ячменю Risø 1508 містить локус *lys3a* на хромосомі 5Н. У локусі *lys3a* міститься ген ферменту деметилази, необхідної для експресії С-гордеїнів. Унаслідок мутації *lys3a* у мутанта Risø 1508 не син-

ТАБЛИЦЯ 2. Біохімічна характеристика та генетичний контроль біосинтезу гордеїнів ячменю [38]

Гордеїни	% загального гордеїну	Молекулярна маса, кД	Кількість копій	Формування полімеру	Локуси
В	70–80	30–46	13–50	Так	<i>Hor-2</i>
С	10–20	48–72	20–30	Ні	<i>Hor-1</i>
D	>5	>100	2–4	Так	<i>Hor-3</i>
γ	>5	38–45	>5	Так/Ні	<i>Hor-5</i>



Рис. 14. Розміщення цільових гордеїнокодуювальних локусів на генетичній карті хромосоми 1Н ячменю [40]

тезуються С-гордеїни і депресований синтез В- і D-гордеїнів. Локуси для В- і С-гордеїнів тісно зчеплені на відстані 12,6 сМ рекомбінації і репрезентують ділянку ДНК розміром 10 мільйонів пар нуклеотидів. Гордеїн D представляє пептид розміром 105 кД, який кодує локус *Hor-3* [37]. Спонтанний мутант R118 несе мутацію, яка блокує біосинтез D-гордеїнів [41].

Родина γ -гордеїнів (γ -1 і γ -3) ячменю кодується двома генами в локусі *Hor-5* в короткому плечі хромосоми 1Н: три γ -гордеїни 1, 2 і 3 розміром приблизно 45, 40 і 38 кД відповідно, і γ -2 протеїн, що походить від γ -1 гена шляхом посттрансляційної модифікації з втратою 30 амінокислот (див. табл. 2). γ -Гордеїнові локуси тісно зчеплені з локусом *Hor-2* для В-гордеїнів на відстані всього лише 0,2 сМ [38].

Отже, для отримання генотипів ультранизькоглютенового голозерного ячменю з чорним зерном, який практично не міститиме гордеїнів, потрібно поєднати всі три незалежні гордеїндефіцитні мутації в одному генотипі та додати ген *nud* (голе зерно), що міститься в хромосомі 7HL, і ген чорної пігментації перикарпу *Blp*, який локалізований у довгому плечі хромосоми 1HL.

З огляду на кількість генетичних факторів, які потрібно поєднати шляхом схрещувань і доборів в одному генотипі, робота зі створення майже безглютенового генотипу, а тим паче сорту, виглядає доволі складною. Більше того, мутантні зразки Risø 1508 та Risø 56 за агрономічними характеристиками є вельми примітивними генотипами і формують зерно з редукованим ендоспермом, та не толерантні до посухи (рис. 15).

Тому практична реалізація комбінування цільових генів в одному генотипі здійснюється у кілька послідовних кроків: 1) отримання подвійномутантних генотипів від схрещування плівчастих мутантів Risø 1508 $\times$ Risø 56 та добір кращих з них за агрономічними характеристиками; 2) добір агрономічно кращих D-гордеїндефіцитних генотипів з чорним зерном у популяції від схрещування Ахіллес $\times$ R118;

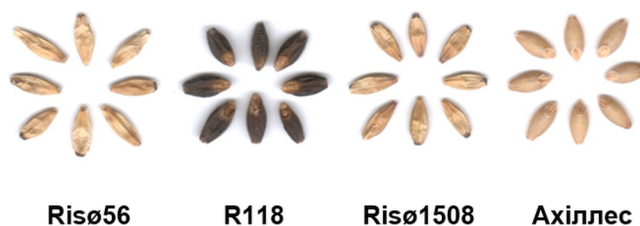


Рис. 15. Зразки зерна генотипів, що використовуються у програмі: Risø 56 — плівчастий; Risø 1508 — плівчастий; R118 — голозерний чорнозерний

3) добір агрономічно задовільних потрійномутантних (Risø 1508+ Risø 56+R118) генотипів з чорним зерном.

На всіх трьох етапах добір здійснюється з паралельним контролем цільових гордеїндефіцитних мутацій за допомогою електрофоре-зу гордеїнів.

На рис. 16 подано електрофореграму SDS-PAGE електрофоре-тичного розподілу В-, С- і D-гордеїнів вихідних зразків ячменю: го-лозерного сорту Ахіллес і мутантів Risø 1508 і Risø 56 та генотипів по-пуляції $F_{3/4}$ від схрещування Risø 1508 $\times$ Risø 56 (Risø 56 $\times$ Risø 1508). Видно, що у мутанта Risø 1508 практично відсутні В- і D-гордеїни та редуковані С-гордеїни, тоді як у мутанта Risø 56 майже повністю бло-кований біосинтез В-гордеїнів.

На рис. 17 наведено А-PAGE електрофореграму розподілу В- і С-гордеїнів ячменю. D-гордеїни у системі А-PAGE не візуалізують-ся. Як і SDS-PAGE, система А-PAGE чітко детектує практично по-

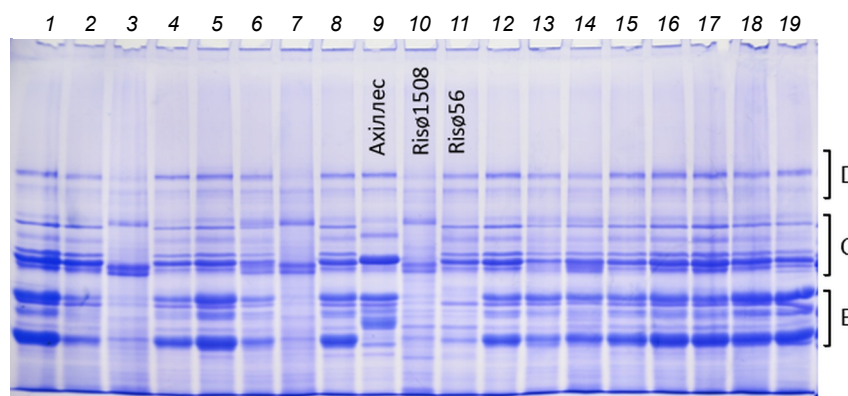


Рис. 16. SDS-PAGE електрофореграма розподілу гордеїнів ячменю:

9 — сорт Ахіллес; 10 — мутант Risø 1508; 11 — мутант Risø 56; 1—8, 12—19 — генотипи популяції $F_{3/4}$ (рослини F_3 , зерно F_4) від схрещування Risø 1508 $\times$ Risø 56 (Risø 56 $\times$ Risø 1508); 3 і 7 — генотипи популяції з геном *lys3a*

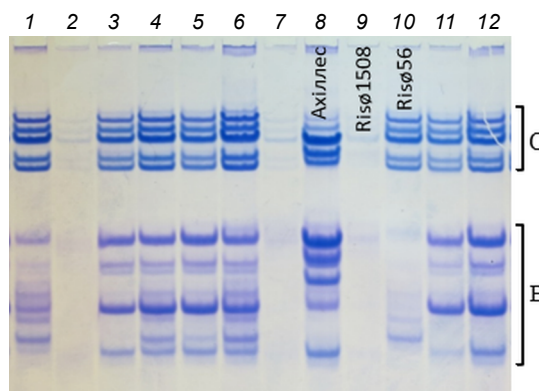


Рис. 17. А-PAGE електрофореграма розподілу В- і С-гордеїнів ячменю:

8 — сорт Ахіллес; 9 — мутант Risø 1508; 10 — мутант Risø 56; 1—7, 11, 12 — генотипи популяції $F_{3/4}$ (рослини F_3 , зерно F_4) від схрещування Risø 1508 $\times$ Risø 56 (Risø 56 $\times$ Risø 1508); 2 і 7 — ге-нотипи популяції з геном *lys3a*

вну відсутність у Risø 1508 В- і С-гордеїнів, а у мутанта Risø 56 майже повну депресію біосинтезу В-гордеїнів.

Генотипи популяції $F_{2/3}$ і $F_{3/4}$ також чітко ідентифікуються обома системами SDS-PAGE і A-PAGE за ознакою наявності/відсутності В- і С-гордеїнів та можливістю виділення з популяції генотипів з подвійною мутацією від Risø 1508 та Risø 56 (рис. 16, зразки 3, 7; рис. 17, зразки 2, 7). Однак для гарантованої ідентифікації подвійної мутації Risø 1508 та Risø 56 необхідно мати надійний ПЛР-тест на кожну мутацію, над чим ми зараз і працюємо.

Програма створення голозерного чорнозерного ячменю з ультранизьким вмістом у зерні глютену ускладнюється також тим, що наявний на сьогодні у нас генетичний матеріал за цією програмою весь на ярій основі, що лімітує можливість істотного підвищення урожаю зерна цільового потрійного мутанту ярого типу. Тому наразі ми виконуємо паралельну програму переведу усіх трьох мутацій на озиму і голозерну основи, що дасть змогу підвищити зернову продуктивність цільового генотипу з потрійною мутацією.

Висновки

1. Упродовж багаторічних (2002—2023 рр.) селекційно орієнтованих генетичних досліджень отримано докорінно новий агрономічно досконалий селекційний матеріал харчового озимого і ярого голозерного ячменю з високими зерновою продуктивністю та харчовою цінністю зерна, відмінною стійкістю до посухи й якісним вимолотом.

2. З метою підвищення урожайності та у зв'язку з критичним впливом посухи на зернову продуктивність весь наявний у нас генетичний ресурс ярого ячменю системно і поетапно переводиться на основу озимого і альтернативного типів розвитку з використанням в цьому разі для створення озимого голозерного ячменю потужного генетичного потенціалу ячменю ярого.

3. Отримано цінний селекційний матеріал озимого голозерного ячменю з надвисокою (незрівнянно вищою, ніж у озимій пшениці) толерантністю до посухи як у фазі формування і наливання зерна, так і у фазі сходи—кущіння. На основі цього матеріалу створено високопродуктивний сорт 2-рядного озимого голозерного ячменю Імператор, який поєднує надвисоку толерантність до посухи з високою стійкістю до вилягання рослин та масою 1000 насінин до 60 г.

4. Основним типом міжсорткових схрещувань у селекційних програмах, спрямованих на підвищення зернової продуктивності голозерного ячменю, залишається голозерний морфотип × продуктивний плівчастий морфотип.

5. Голозерний ячмінь за продуктивністю та всіма характеристиками харчової цінності зерна переважає плівчастий, а зерно голозерного ячменю без попередньої технологічної підготовки, на відміну від плівчастого ячменю, може безпосередньо бути переробленим у борошно, крупи, пластівці та інші кінцеві харчові продукти з високою біологічною цінністю.

6. Перспективний селекційний матеріал озимого голозерного ячменю з пролонгованим (середньопізнім) періодом вегетації не поступається або переважає за урожаєм зерна і посухостійкістю сорти озимого ячменю традиційного для Півдня України раннього і середньотривалого вегетаційного періоду.

7. Якість вимолоту зерна є критичною агрономічною характеристикою голозерного ячменю. Наш багаторічний практичний досвід поліпшення цієї важливої ознаки свідчить, що 2-рядний остистий морфотип голозерного ячменю істотно переважає 6-рядний за якістю вимолоту зерна, а у генотипів з геном *wax* (ваксі) вимолот зерна як у 2-рядного, так і навіть 6-рядного морфотипу наближається до 100 %.

8. Безостий морфотип колоса голозерного ячменю (2-рядний і 6-рядний) поступається остистому за урожаєм зерна, якістю вимолоту зерна, рівномірністю зерна за фізичними параметрами, проявляє апікальну стерильність колоса та пустозерність і не є перспективним для створення сортів безостого голозерного ячменю.

9. Цільовим морфотипом при створенні селекційного матеріалу голозерного ячменю у наших програмах є 2-рядний морфотип, який не поступаючись за урожаєм зерна 6-рядному морфотипу, переважає останній за низкою важливих агрономічних і технологічних характеристик зерна, таких як краща якість вимолоту зерна, підвищена маса 1000 насінин, однорідність зерна у колосі за фізичними параметрами, кращий товарний вигляд кінцевого продукту із цілого зерна.

10. Вперше в Україні нами ініційовані та здійснюються селекційно орієнтовані генетичні програми біофортificaції, спрямовані на поліпшення харчової цінності зерна голозерного ячменю шляхом використання у схрещуваннях генетичної плазми ячменю з кольоровим (фіолетовим, синім, чорним) зерном та підвищеною антиоксидантною активністю зерна, зумовленою кольоровими поліфенольними пігментами антоціанінами і фітомеланінами.

11. Нами вперше в Україні ініційовані й здійснюються селекційно орієнтовані генетичні програми біофортificaції зерна голозерного ячменю за вмістом у зерні ключових мінеральних елементів, вітамінів, дієтичної клітковини бета-глюканів, біоактивних складових зерна, підвищення (зниження) вмісту у крохмалі амілози та створення голозерного ячменю з ультранизьким вмістом у зерні глютену (gluten-free).

12. Реалізація у практичній площині наших досліджень ставить за кінцеву мету створення сортів харчового та кормового голозерного ячменю як зернової сировини для розробки нових продуктів функціонального харчування на основі голозерного ячменю, а також популяризацію в Україні харчового голозерного ячменю — унікально цінного у харчовому відношенні зерна з високими харчовими і поживними характеристиками.

REFERENCES

1. Gerasimova, S., Hertig, Ch., Korotkova, A., Kolosovskaya, E., Otto, I., Heikel, S., Kochetov, A., Khlestkina, E. & Kumlehn, J. (2020). Conversion of hulled into naked

- barley by Cas endonuclease-mediated knockout of the NUD gene. *BMC Plant Biol.*, 20, suppl. 1, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02454-9>
2. Rybalka, O.I., Morgun, B.V. & Polyshchuk, S.S. (2016). Barley as functional food product. Kyiv: Logos (in Ukrainian).
 3. Bhatti, R.S. (1999). The potential of hull-less barley. *Cereal Chem.*, 76, pp. 589-599. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1999.76.5.589>
 4. Meints, B. & Hayes, P.M. (2019). Breeding naked barley for food, feed, and malt. In: Goldman, I. (Ed.). *Plant Breeding Reviews*. Wiley, pp. 95-119. <https://doi.org/10.1002/9781119616801.ch4>
 5. Yulin, Wang, Zha, Sang, Shaohang, Xu, Qijun, Xu, Xingquan, Zeng, Dunzhu, Jabu & Hongjun, Yuan (2020). Comparative proteomics analysis of Tibetan hull-less barley under osmotic stress via data-independent acquisition mass spectrometry. *Giga Sci.*, 9, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1093/gigascience/giaa019>
 6. La, Geng, Mengdi, Li, Guoping, Zhang & Lingzhen, Ye (2022). Barley: a potential cereal for producing healthy and functional foods. *Food Quality and Safety*, 6, pp. 1-13. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyac012>
 7. Shaveta, Harinderjeet, Kaur & Simarjit, Kaur (2019). Hullless barley: A new era of research for food purposes. *J. Cereal Res.*, 11 (2), pp. 114-124. <https://doi.org/10.25174/2249-4065/2019/83719>
 8. Brigid, Meints, B., Vallejos, C. & Hayes, P. (2021). Multi-use naked barley: A new frontier. *J. Cereal Sci.*, 102, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103370>
 9. Agu, R.C., Bringham, T.A., Brosnan, J.M. & Pearson, S. (2009). Potential of hull-less barley malt for use in malt and grain whisky production. *J. Inst. Brew. (JIB)*, 115, pp. 128-133. <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2009.tb00357.x>
 10. Kinner, M., Nitschko, S., Sommeregger, J., Petrasch, A., Linsberger-Martin, G., Grausgruber, H., Berghofer, E. & Siebenhandl-Ehn, S. (2011). Naked barley—optimized recipe for pure barley bread with sufficient beta-glucan according to the EFSA health claims. *J. Cereal Sci.*, 53, pp. 225-230. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.01.001>
 11. Meints, B. & Hayes, P.M. (2019). Breeding naked barley for food, feed, and malt. In: Goldman, I. (Ed.). *Plant Breeding Reviews*. Wiley, pp. 95-119. <https://doi.org/10.1002/9781119616801.ch4>
 12. Newman, R.K. & Newman, C.W. (2008). *Barley for Food and Health*. John Wiley & Sons, Inc., Publication, Hoboken, NJ, USA. <https://doi.org/10.1002/9780470369333>
 13. Yawen, Zeng, Xiaoying, Pu, Juan, Du, Xiaomeng, Yang, Xia, Li, Md. Siddikun Nabi, Mandal, Tao, Yang & Jiazhen, Yang (2020). Molecular Mechanism of Functional Ingredients in Barley to Combat Human Chronic Diseases. *Hindawi Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, pp. 1-26. <https://doi.org/10.1155/2020/3836172>
 14. Raboy, V. (2002). Progress in breeding low phytate crops. *J. Nutr.*, 132, No. 3, pp. 503-505. <https://doi.org/10.1093/jn/132.3.503S>
 15. Chen, P., Toribara, T. & Warner, H. (1956). Microdetermination of phosphorus. *Anal. Biochem.*, 28, No. 11, pp. 1756-1758. <https://doi.org/10.1021/ac60119a033>
 16. Rybalka, O.I., Morgun, B.V., Chervonis, M.V., Polyshchuk, S.S., Morgun, B.V., Toporash, I.G. & Trojanivska, A.V. (2022). *LPA*-mutations and naked barley (*Hordeum vulgare* L.) biofortification for grain mineral phosphorus. *Fiziol. rast. genet.*, 54, No. 6, pp. 484-495. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/frg2022.06.484>
 17. Abdel-Aal, E.-S. & Hucl, P. (1999). A rapid method for quantifying total anthocyanins in blue aleurone and purple pericarp wheats. *Cereal Chem.*, 76, pp. 350-354.
 18. Rybalka, O.I. (2010). Laboratory protocols of wheat gluten protein separation by electrophoresis. *Proc. Res. SGI-NCNS*, 16, No. 56, pp. 171-179 [in Ukrainian].
 19. Laemmli, U. (1970). Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. *Nature*, 227, pp. 680-685.
 20. Mohammadkhani, A. (2005). Survey of starch amylose content in naked barley (*H. vulgare* L. nudum). *Pakistan J. Nutr.*, 4, pp. 183-186. <https://doi.org/10.3923/pjn.2005.183.186>
 21. Rybalka, O.I., Katrii, V.B., Polyshchuk, S.S. & Morgun, B.V. (2021). Development of hull-less barley with ultra-low gluten content via target gene combination. I. Isolation of triple mutants and black grained genotypes. *Agric. Sci. Pract.*, 8 (1), pp. 14-24. <https://doi.org/10.15407/agrisp8.01.040>

22. Rybalka, O.I., Katrii, V.B., Morgun, B.V. & Polyshchuk, S.S. (2020). Mutation in the locus *Sex6* that substantially improves nutritional barley grain quality. *Fiziol. rast. genet.*, 52, No. 3, pp. 238-247 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/frg2020.03.238>
23. Rossmagel, B.G. (2000). Hulless barley — Western Canada corn. *Proc. 8th Int. Barley Genet. Symp.*, 1, pp. 135-142. Adelaide.
24. Bird, A., Flory, C., Davies, D., Usher, S. & Topping, D. (2004). A novel barley cultivar (Himalaya 292) with a specific gene mutation in starch synthase IIa raises large bowel starch and short-chain fatty acids in rats. *J. Nutr.*, 134 (4), pp. 831-835. <https://doi.org/10.1093/jn/134.4.831>
25. Bird, A., Jackson, M., King, R., Davies, D., Usher, S. & Topping, D. (2004). A novel high-amylose barley cultivar (*Hordeum vulgare* var. Himalaya 292) lowers plasma cholesterol and alters indices of large-bowel fermentation in pigs. *British J. Nutr.*, 92, pp. 607-615. <https://doi.org/10.1079/BJN20041248>
26. Clarke, B., Liang, R., Morell, M., Bird, A., Jenkins, C. & Li, Z. (2008). Gene expression in a starch synthase IIa mutant of barley: changes in the level of gene transcription and grain composition. *Funct. Integr. Genomics*, 8, pp. 211-221. <https://doi.org/10.1007/s10142-007-0070-7>
27. Stathas, I., Sakellaridis, A., Papadelli, M., Kapos, J., Papadimitrou, K. & Stathas, G. (2023). The effect of insect infestation on storage agricultural products and the quality of food. *Foods*, 12 (10), p. 2046. <https://doi.org/10.3390/foods12102046>
28. Key, M.N., Zwilling, Ch.E., Barbey, A.K. & Talukdar, T.M. (2019). Essential amino acids, vitamins, and minerals moderate the relationship between the right frontal pole and measures of memory. *Mol. Nutr. Food Res.*, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201801048>
29. Berdanier, C., Dwyer, J. & Herber, D. (2013). *Handbook of nutrition and food* (3rd ed.). CRC Press, 1136 p. Retried 3 July 2016. <https://doi.org/10.1201/b15294>
30. Li, Y.C., Raboy, V., Ledoux, D.R. & Veum, T.L. (2001). Bioavailability of phosphorus in low phytic acid barley. *J. Appl. Poultry Res.*, 10 (1), pp. 86-91. <https://doi.org/10.1093/japr/10.1.86>
31. Rosell, C., Barro, F., Sousa, C. & Mena, C. (2014). Cereals for developing gluten-free products and analytical tools for gluten detection. *J. Cereal Sci.*, 59 (3), pp. 354-364. <https://doi.org/10.1016/J.JCS.2013.10.001>
32. Zuidmeer, L., Goldhahn, K., Rona, R., Gislason, D., Madsen, C., Summers, C., Sodergren, E., Dahlstrom, J., Lindner, T., Sigurdardottir, S., McBride, D. & Keil, T. (2008). The prevalence of plant food allergies: a systematic review. *J. Allergy Clin. Immunol.*, 121, pp. 1210-1218. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2008.02.019>
33. Comino, I., Real, A., Moreno, M., Montes, R., Cebolla, A. & Sousa, C. (2013). Immunological determination of gliadin 33-mer equivalent peptides in beers as a specific and practical analytical method to assess safety for celiac patients. *J. Sci. Food Agric.*, 15, pp. 933-943. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5830>
34. Golley, S., Corsini, N., Topping, D., Morell, M. & Mohr, P. (2015). Motivations for avoiding wheat consumption in Australia: results from a population survey. *Public Health Nutr.*, 18, pp. 490-499. <https://doi.org/10.1017/S1368980014000652>
35. Ravikumara, M., Nootigattu, V. & Sandau, B. (2007). Ninety percent of celiac disease is being missed. *J. Pediatr. Gastroenterol. Nutr.*, 45, pp. 497-499. <https://doi.org/10.1097/mpg.0b013e31812e5710>
36. Gluten Free Food Market Statistics 2026. Industry Forecasts. Nov. 2019, 190 p., Report ID GMI226.
37. Tanner, G., Blundell, M., Colgrave, M. & Howitt, C. (2016). Creation of the first ultra-low gluten barley (*Hordeum vulgare* L.) for coeliac and gluten-intolerant populations. *Plant Biotechnol. J.*, 14, pp. 1139-1150. <https://doi.org/10.1111/pbi.12482>
38. Shewry, P.R. (1993). Barley Seed Proteins. In: *Barley: Chemistry and Technology* (Eds. J. MacGregor and R. Bhatt). AACC, St. Paul Minnesota, USA, pp. 131-197.
39. Shewry, P., Bunce, N., Kreis, M. & Forde, B. (1985). Polymorphism at the Hor 1 locus of barley (*Hordeum vulgare* L.). *Biochem. Genet.*, 23, pp. 391-404.
40. Tanner, G., Howitt, C., Colgrave, M. & Blundell, M. (2014). European Patent Office Application EP3008161A1. <https://patents.google.com/patent/RU2518241C2/ru>

41. Brennan, C., Smith, D., Harris, N. & Shewry, P.R. (1998). The production and characterization of Hor 3 null lines of barley provides new information on the relationship of D hordein to malting performance. *J. Cereal Sci.*, 28, p. 291-299. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=1637174>

Отримано 18.01.2024

FOOD END-USE HULL-LESS BARLEY (*HORDEUM VULGARE* L. VAR. *NUDUM*) — RESEARCH AND DEVELOPMENT RELATED TO BREEDING

O.I. Rybalka^{1,2}, S.S. Polyshchuk¹, M.V. Chervonys¹, B.V. Morgun^{2,3}, V.V. Morgun²

¹Plant Breeding and Genetics Institute — National Center of Seed and Cultivars Investigation, National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine

3 Ovidiopolska Rd., Odesa, 65036, Ukraine

²Institute of Plant Physiology and Genetics, National Academy of Sciences of Ukraine
31/17 Vasylkivska St., Kyiv, 03022, Ukraine

³Institute of Cell Biology and Genetic Engineering, National Academy of Sciences of Ukraine

148 Akademika Zabolotnoho St., Kyiv, 03143, Ukraine

e-mail: molgen@icbge.org.ua

Two decades-long (2002—2023) breeding related genetic R&D resulted in development of the advanced breeding material of the spring and winter food end-use hull-less barley combining advanced agronomic performance, high grain yield, outstanding drought tolerance, excellent threshing ability, technological and nutritional grain quality. Highly valuable breeding material of winter hull-less barley possessing the highest drought tolerance (incomparably over than winter wheat) at the grain development-grain filling stages also equally tolerant at the seedling appearance-plant tillering stages has been developed. On the base of this advanced breeding material a new high yielding variety of 2-rowed winter hull-less barley ‘Imperator’ was released. This cultivar combines extra-tolerance to drought with high plant resistance to lodging and 1000 perfectly filled seed’s weight nearly 60 g. The winter hull-less barley breeding material with prolonged (middle-late) vegetation time that is not inferior (equal or superior) in yield performance and drought tolerance to traditional for South Region cultivars with early- or middle-long vegetation period was also developed. Spike threshing ability is a critical characteristic for hull-less barley. On the base of our long-term breeding experience we came to the conclusion that the 2-rowed morphotype of hull-less barley is superior to the 6-rowed morphotype in threshing performance. However, the threshing rate of hull-less barley’s advanced breeding material possessing gene *wax* (waxy) is nearing to 100 %. Awn-less hull-less barley’s morphotypes (2- and 6-rowed) are inferior to awned one in grain yield, spike’s threshing quality and grain size uniformity. It also showed the top spike sterility with empty apical grain flowers. The awn-less spike morphotype is not perspective in use for hull-less barley cultivars development in South Region. In our breeding programs the target hull-less barley morphotype is 2-rowed that is equal with 6-rowed morphotype in grain yield performance, however, is superior to the last one in several important agronomic and technological characters such as spike threshing performance, 1000 grains weight, grain size uniformity, better appearance of the end-use food products made from whole grains. The breeding related genetic program aimed on the hull-less food barley biofortification in grain antioxidant activity using genetic resources with colored (purple, blue and black) grain enriched with powerful antioxidant pigments anthocyanins and phytochemicals was first initiated in Ukraine. The breeding related programs of the food hull-less barley grain biofortification by the key minerals content, vitamins, soluble dietary fiber beta-glucans, bioactive compounds, enhancement-lowering of starch amylose, development of hull-less barley with black grain and ultra-low gluten content were also pioneered in Ukraine. Our breeding related research programs are aimed on the development in Ukraine of the new food end-use hull-less barley, predominantly winter and alternative cultivars, as a raw material for development and production on the Ukrainian food market of the new hull-less bar-

ley based functional food products. The research is also aimed on popularization in Ukraine of the hull-less barley as the unique healthy food product with highly valuable nutritional properties as well as an enhanced functional food status.

Key words: *Hordeum vulgare* L. var. *nudum*, grain, mutation, pigmentation, protein, gluten, phosphorus, functional nutrition, food safety.

ORCID

О.І. РИБАЛКА — O.I. Rybalka <https://orcid.org/0000-0003-0103-1012>

С.С. ПОЛІЩУК — S.S. Polyshchuk <https://orcid.org/0009-0000-8934-3621>

М.В. ЧЕРВОНІС — M.V. Chervonys <https://orcid.org/0009-0001-9941-2720>

В.В. МОРГУН — V.V. Morhun <https://orcid.org/0000-0001-5842-6328>

Б.В. МОРГУН — B.V. Morgun <https://orcid.org/0000-0001-7041-6894>