

<https://doi.org/10.15407/frg2019.03.207>

УДК 575.113.2:577.112.82

**ГЕНЕТИЧНІ ОСНОВИ НОВОГО НАПРЯМУ СЕЛЕКЦІЇ
ОРИГІНАЛЬНИХ ЗА ЯКІСТЮ ЗЕРНА КЛАСІВ ПШЕНИЦІ
(*TRITICUM AESTIVUM* L.) І ТРИТИКАЛЕ
(× *TRITICOSECALE WITTMACK*)**

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

¹Селекційно-генетичний інститут—Національний центр насіннезнавства 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

03680 Київ, вул. Академіка Заболотного, 148

e-mail: molgen@icbge.org.ua

В Україні м'яка пшениця *Triticum aestivum* L. представлена одним технологічним класом — твердозерна червонозерна хлібопекарська пшениця (*Hard Red Wheat*), що не відповідає вимогам технологій виробництва та якості борошняних харчових продуктів, кожен з яких потребує сировини певної якості. Культура тритикале в Україні взагалі не має чітко визначеної ніші технологічного використання. Особливо важливим у формуванні якості зерна є його твердість, що слугує класоутворювальною характеристикою. Для створення нових за якістю зерна класів пшениці ми впровадили у селекційну практику широкий генетичний ресурс: матеріал від віддалених схрещувань пшениці з гексаплоїдними амфіплоїдами-синтетиками, генетичні системи що впливають на твердість і колір зерна, вміст білка, його якість, фізичні, хімічні, реологічні властивості крохмалю і тіста, хлібопекарські властивості борошна. В дослідженні селекційного матеріалу пшениці і тритикале з різною твердістю зерна виявлено високу позитивну корелятивну залежність між твердістю зерна і виходом крупи при жорновому помелі. У групі білозерних зразків пшениці виділено селекційні лінії з високою (до +40 одиниць приладу Inframatic 8611) і низькою (до —58) твердістю зерна. Найліпші за якістю пластівці отримано з екстрем'якозерного білозерного матеріалу селекційних ліній пшениці та екстрем'якозерних ліній тритикале. Крупу найвищої якості отримано із зерна ліній пшениці з максимально високою твердістю зерна. Селекційні лінії тритикале мали низьку твердість зерна в негативному діапазоні від 0 до —45 одиниць приладу Inframatic 8611. Серед ліній тритикале спостерігали пряму позитивну залежність між твердістю зерна і виходом крупи при жорновому помелі. Незважаючи на низьку твердість зерна, серед матеріалу тритикале виявлено лінії з доволі високим виходом крупи (до 89 %). Між показниками твердості зерна, характеристиками хлібопекарської якості та індексом седиментації SDS-30K борошна пшениці існує

пряма позитивна залежність. Спостерігали сильний позитивний вплив гена *Gpc-B1* та екстраекспресії субодиниць високомолекулярних глютенінів *Glu-A1x2**, *Glu-D1x5* на твердість зерна, вміст білка в зерні та його якість. У дослідях вивчено круп'яні характеристики зразків пшениці з різним кольором зерна: червоним, білим, чорним і голубим. На основі отриманих даних обґрунтовано новий напрям селекції пшениці і тритикале круп'яного (крупяни, пластівці) використання.

Ключові слова: пшениця, тритикале, селекція, твердість зерна, хлібопекарська якість, вміст білка, колір зерна, крупа.

М'яка пшениця *Triticum aestivum* L. в Україні представлена на сьогодні практично лише одним технологічним класом — твердозерна червонозерна хлібопекарська пшениця. Всі різноманітні за якістю борошняні продукти виробляються з борошна лише цього класу пшениці. Це не відповідає вимогам ні технологій виробництва, ні споживчої якості борошняних харчових продуктів, бо для виготовлення кожного з них потрібна сировина з певними характеристиками. Що стосується тритикале, то зерно цієї культури взагалі не має в Україні чітко визначеного технологічного використання.

Усі ці недоліки віддзеркалюють відставання вітчизняної селекції від світової, де створення сортів зернових культур, різних за якістю зерна й напрямками технологічного використання, є основою сучасної селекції. Наприклад, сорти пшениці Канади поділяються щонайменше на 20 (!) технологічних класів: 6 класів у Західній Канаді, 9 класів — у Східній, кілька класів — у Північній та зоні канадських прерій. І кожен клас пшениці призначений для виготовлення певних видів борошняної чи зернової продукції [1]. Подібна градація сортів пшениці за технологічними класами прийнята також провідними світовими виробниками й експортерами зерна пшениці — США та Австралією [2, 3].

В останнє десятиліття у світі особливо зростає популярність класу білозерних сортів пшениці як твердозерних (hard) хлібопекарських, так і м'якозерних (soft) бісквітного напрямку використання. Так, лише у США білозерної пшениці збирають 7,0—8,5 млн т щорічно, з яких до 5,3 млн т експортується [4]. Білозерні пшениці особливо й доволі давно традиційно популярні в країнах Азії, Індії. В Австралії білозерна твердозерна пшениця з вмістом у зерні білка >10 % належить до преміум-класу (Premium White). Зерно білозерної пшениці не має характерного для червонозерної пшениці гіркуватого присмаку, зумовленого фенольними сполуками у периферійному шарі зернівки. Продукти з борошна білозерної пшениці (в тому числі із цілозмельеного зерна) мають м'який, приємний смак, тому ця пшениця особливо цінна для виготовлення якісної азійської локшини, китайського парового хліба, вишуканих за білизною бісквітів і навіть особливих за якістю вареників [2].

Останнім часом на світовий зерновий ринок приходять сорти пшениці з екзотичним кольором зерна — чорним (фіолетовим) і голубим, які започатковують новий напрям селекції сортів пшениці з поліпшеною харчовою (біологічною) цінністю зерна [5, 6].

Твердість зерна — визначальна характеристика консистенції ендосперму пшениці, яка у провідних країнах-виробниках і експортерах зерна є головним детермінантом, класоутворювальним критерієм якості пшениці як на внутрішньому зерновому ринку, так і в міжнародній торгівлі [7]. В Україні, на жаль, твердість зерна пшениці залишилась поза увагою селекціонерів як у промисловому виробництві, так і в переробці зерна.

Метою нашої роботи було отримання на різній генетичній основі та вивчення перспективного селекційного матеріалу пшениці і тритикале, різноманітного за показниками хлібопекарської якості, характеристикою консистенції ендосперму (твердості), кольором зерна, а також визначення перспективних напрямів створення в Україні сортів пшениці за належністю до нових класів як за технологічними характеристиками, так і харчовою (біологічною) цінністю зерна.

Методика

Рослинний матеріал (стабільні лінії >F6—7 у кількості близько 800 зразків) урожаю 2017—2018 рр., який ми використали у дослідженнях, було висіяно на полі Селекційно-генетичного інституту—Національного центру насіннезнавства та сортовивчення (СГІ—НЦНС) ділянками площею 6 м², 20 м², а також 1 м рядками з міжряддями 0,45 м, і представлений широким діапазоном генетичної варіабельності.

Генотипи з різною консистенцією ендосперму зерна (в тому числі екстрим'якозерні) ми отримали контрольованою інтрогресією в геном культурної пшениці домінантного алеля *Ha* (*hardness*, хромосома 5D) від дикорослого родича культурної пшениці *Aegilops tauschii* (DD, $2n = 2x = 14$), який використаний у схрещуваннях із сортом Куяльник (СГІ—НЦНС) у вигляді оригінальних гексаплоїдних амфіплоїдів-синтетиків з геномною формулою AABBDD ($2n = 6x = 42$), створених у СИММУТ і переданих нам для досліджень.

Джерелом білозерного матеріалу в різних комбінаціях схрещування слугував оригінальний генотип, потрібний рецесив (*R-1a*, *R-1a*, *R-1a*) з білим зерном, який був ізольований у популяції від віддалених схрещувань культурної пшениці з гексаплоїдними амфіплоїдами-синтетиками.

Матеріал озимої пшениці з високим вмістом у зерні білка та великою твердістю зерна є похідним від схрещування з оригінальними генетичними лініями ярої пшениці, отриманими від професора Ann Blechl (USDA, WRRC-ARS, Albany, USA). Матеріал озимої пшениці з підвищеним вмістом у зерні білка та геном *Gpc-B1* походить від схрещування з оригінальною генетичною лінією ярої пшениці, яку нам надав професор Jorge Dubcovsky (UCR, Davis, USA).

Матеріал озимої пшениці з модифікованою 1RSm.1BL транслокацією є похідним від схрещування з оригінальною лінією ярої пшениці MA1, що несе хромосомно-інженерну центричну пшенично-житню транслокацію 1RS.1BL. Оригінальну лінію ярої пшениці MA1 і хромосомно-заміщену лінію озимого тритикале CCT (5B)5D ми отримали від професора Adam Lukaszewski (UCR, Riverside, USA).

Селекційні лінії озимого тритикале, вивчені у досліді, отримані від схрещування озимого тритикале сорту Богдан з лінією CCT

(5В)5D та від схрещування перспективної селекційної лінії озимого тритикале 645/38 з озимою пшеницею ваксі сорту Софійка.

Дослідний матеріал пшениці і тритикале оцінено технологічно відповідно до методичних рекомендацій ВАСГНІЛ, прийнятих як стандартні лабораторні процедури у відділі генетичних основ селекції СГІ—НЦНС [8].

Твердість зерна і вміст у зерні білка визначали за допомогою аналізатора Inframatic 8611 (Pertem, Швеція). Виповненість зерна за 5-бальною шкалою оцінював одноосібно кваліфікований співробітник.

Пластівці виготовляли згідно з розробленою нами лабораторною процедурою, яка включала такі кроки: відволожування зерна до 25 % вологості, обробка зерна парою у побутовій пароварці під тиском 50 кПа, підсушування зерна у термостаті, плющення зерна на побутовому формівнику тіста Brevettata (Італія) в два етапи із зазором між вальцями 2 та 1 мм.

Індекси SDS-30 седиментації борошна визначали за допомогою напівавтоматичного приладу власної конструкції, виготовленого в СГІ—НЦНС (інженер Г.В. Покоєвий) [9, 10].

Електрофоретичний аналіз білків зерна виконували із застосуванням методик, розроблених у відділі генетичних основ селекції СГІ—НЦНС [11].

Молекулярно-генетичні дослідження, всебічне селекційне оцінювання нових за якістю зерна ліній пшениці і тритикале проводили в Інституті фізіології рослин і генетики НАН України й Інституті клітинної біології та генетичної інженерії НАН України.

Характеристики зернової крупи отримували помелом 100 г зразка зерна на лабораторному млинку Туре 30 виробництва компанії Falling Number AB (Швеція), відрегульованому в режимі грубого жорнового помелу. Після помелу крупу провіювали для відокремлення борошенця на вертикальній аспіраційній колонці виробництва компанії Paul Polikeit (Німеччина).

Результати та обговорення

Перш ніж викласти результати наших досліджень варто наголосити на деяких важливих особливостях цієї роботи, що пов'язана з використанням оригінального генетичного ресурсу включно з віддаленими схрещуваннями.

Основою нашої роботи, як і будь-якого іншого генетичного дослідження, є вимога щодо чистоти експерименту, від якої залежать об'єктивність отриманих даних і обґрунтованість висновків. У всіх наших дослідах у схрещуваннях використано лише один сорт пшениці Куяльник селекції СГІ—НЦНС. Цей сорт є шедевром одеської селекції за комплексом агрономічно цінних господарських і біологічних ознак. Оскільки сорти пшениці української селекції часто є популяційними, ми брали лінійний матеріал сорту Куяльник як потомство одного перевіреного на типовість за різними максимально інформативними характеристиками колоса. Щорічно індивідуальні колоси цієї лінії ми використовуємо у схрещуваннях.

Геном D є ключовим геномом гексаплоїдної пшениці *T. aestivum* L. з геномною формулою AABBDD ($2n = 6x = 42$). Тому з метою отримання цінної для селекції генетичної варіабельності у геномі D культурної пшениці ми використовуємо у схрещуваннях з культурою дикорослий донор геному D пшениці егілопс *Ae. tauschii* у формі синтетичних гексаплоїдних амфіплоїдів-синтетиків.

Усі бекроси на сорт Куяльник, особливо у програмах віддалених схрещувань, виконували з використанням сорту як материнського компонента. Це давало можливість: а) отримувати генетичне різноманіття на базі оригінальної цитоплазми сорту Куяльник; б) мінімізувати небажаний «генетичний шум», зумовлений трансмісією по батьківській лінії незбалансованих (не конкурентних) гамет через пул пилюки; в) пришвидшити отримання цінного селекційного матеріалу.

Перелічені заходи давали змогу отримувати досліджуваний матеріал на одній і тій самій генетичній основі реципієнтного сорту пшениці, що полегшує генетичну ідентифікацію інтрогресованого в геном культури чужорідного генетичного матеріалу та його подальше використання.

Урожай зерна. Головне запитання, на яке ми мали дати аргументовану відповідь протягом двох років досліджень — чи можливо при віддалених схрещуваннях культурної пшениці з гексаплоїдними амфіплоїдами-синтетиками отримати інтрогресивні генотипи із зерновою продуктивністю вищою, ніж у рекурентного сорту Куяльник?

Матеріал озимої пшениці і тритикале урожаю 2017 р. був вирощений в умовах екстремально пізнього (із запізненням від оптимального майже на місяць) посіву та жорсткої літньої посухи. Дослідні зразки урожаю 2018 р. були висіяні в оптимальні для регіону терміни, але урожай зерна (починаючи від фаз утворення і наливання) формувався, як і в попередньому році, в умовах жорсткого дефіциту ґрунтової і повітряної вологи. За умов жорсткої посухи досліджувані зразки озимої пшениці й тритикале, здатні реалізувати свій потенціал зернової продуктивності та сформувати задовільно виповнене зерно, можна вважати посухостійкими. Особливо це стосується культури тритикале, яке вважають таким, що не відрізняється високою посухостійкістю.

За критичних умов вирощування 2017 р. сорт Куяльник у ділянкових посівах 6 м² дав середній урожай зерна 58,1 ц/га, а в 2018 р. — 70,4 ц/га. На жаль, незважаючи на відсутність задовільного зволоження для розвитку грибних хвороб, сорт Куяльник був сильно уражений септоріозом. Найвищий урожай зерна (83,2 і 84,8 ц/га) у досліді посушливого 2017 р. дали дві інтрогресивні лінії озимої пшениці, що походять від схрещування з лінією S13 (стійкої проти *Septoria*), яка отримана від віддаленої гібридизації з амфіплоїдом-синтетиком і несе пшенично-житню центричну хромосомну транслокацію 1RS.1BL. Досить високу зернову продуктивність у 2017 р. на рівні від 84,0 ц/га (hard текстура ендосперму) до 73,3 і 75,3 ц/га (extra-soft консистенція ендосперму) показали також білозерні лінії озимої пшениці, які несуть домінуючий *Ha* алель від егілопсу *Ae. tauschii*. У досліді 2018 р. ціла низка ліній білозерної озимої пшениці як твердозерної, так і м'якозерної й екстрем'якозерної дала максимальний урожай зерна на рівні 75—83 ц/га.

У дослідях 2017 р. більшість ліній озимої пшениці, отриманих за програмою комбінування в одному генотипі максимальної кількості *Gli/Glu* алелів (у тому числі алель *Gli-D1cyl* від егілопсу *Ae. cylindrica*) з позитивним впливом на хлібопекарські характеристики дала урожай зерна від 58,8 до 78,2 ц/га з перевищенням за продуктивністю сорту Куяльник. У дослідях 2018 р. лінії цього типу в середньому не поступалися за урожаєм зерна сорту Куяльник, а деякі перевищували його більш як на 10 ц/га.

Отже, за результатами дослідів двох років випробування стабільного перспективного селекційного матеріалу озимої пшениці, отриманого від схрещувань з амфіплоїдами-синтетиками, можна зробити цілком обґрунтований висновок, що в результаті віддалених схрещувань сорту озимої пшениці Куяльник з амфіплоїдами-синтетиками і двох послідовних бекросів на сорт Куяльник можна отримати селекційний матеріал із зерною продуктивністю, що перевищує рекурентний сорт-стандарт. Цей висновок цілком узгоджується з результатами численних досліджень інших авторів і свідчить про перспективність використання генетичної плазми гексаплоїдних амфіплоїдів-синтетиків у поліпшенні пшениці за ознакою зернової продуктивності. У цих роботах також наголошено, що інтрогресії генетичного матеріалу від амфіплоїдів-синтетиків у культурну пшеницю особливо ефективні саме в посушливих умовах вирощування, а самі синтетики розглядають як чи не єдине джерело селекційного поліпшення пшениці за стійкістю до посухи [12–19].

Перспективні лінії озимого тритикале у кількості 30 і 25 зразків досліджували відповідно у 2017 і 2018 рр. Рівень зернової продуктивності тритикале у 2017 р. був від 70,5 до 95,1 ц/га. У 2018 р. ліпші лінії тритикале дали урожай зерна 80–85,6 ц/га. В умовах Київської області (ІФРГ НАН України) їх урожайність становила 90–93,3 ц/га. При цьому слід наголосити, що всі досліджені лінії озимого тритикале характеризувалися високою комплексною стійкістю до всіх листових, стеблових фітозахворювань, поширених в Одеському регіоні. Результати вивчення створених ліній тритикале дали підстави стверджувати, що отриманий нами перспективний селекційний матеріал характеризується високою адаптивною стійкістю до посухи і здатний формувати високий урожай зерна в посушливих умовах вирощування 2017–2018 рр.

Натура і виповненість зерна, посухостійкість. Критичними борошномельними характеристиками зерна та критеріями стійкості зернових злаків до посухи крім урожаю зерна є такі, як об'ємна маса зерна (натура) та його виповненість. Означені технологічні характеристики тісно пов'язані з виходом борошна при помелі зерна, його зольністю, і мають тенденцію до зниження в посушливих умовах вирощування. Ці характеристики для нас важливі ще й тому, що загалом селекційний матеріал пшениці, отриманий від віддалених схрещувань, а також тритикале, згідно з нашими спостереженнями та висновками інших авторів, характеризується зниженою виповненістю зерна, і як наслідок, зниженою натурою. Тому в процесі роботи над цим матеріалом, особливо на ранніх етапах його створення, ми контролювали виповненість зерна особливо ретельно.

Сорт Куяльник у досліді 2017 р. показав натуру зерна 770 г/л і значно вишу (824—830 г/л) у 2018 р. Виповненість зерна сорту Куяльник у 2017 р. оцінена в 4,0 бала, а у 2018 — дещо вище 4,5 бала. Селекційний матеріал, чутливий до посухи, за два роки випробувань знаходився в межах оцінки виповненості зерна 2,5—3,5 бала. Матеріал із низьким урожаєм зерна знаходився також у цьому діапазоні оцінки виповненості зерна. Високоврожайні перспективні селекційні лінії пшениці водночас характеризувалися високим рівнем як природи зерна (> 800 г/л), так і його виповненості (4,5—5,0 бала). Найвищу натуру зерна (800—820 г/л) за обидва роки випробувань мала більшість селекційних ліній, які комбінують в одному генотипі найліпші щодо позитивного впливу на хлібопекарську якість борошна алелі *Gli/Glu*-локусів.

В обидва посушливі роки випробувань оцінка виповненості зерна виявилася відмінним індикатором стійкості досліджуваних генотипів як пшениці, так і тритикале до посухи, і дала можливість чітко дискримінувати експериментальний матеріал та виділити стійкі до посухи селекційні лінії пшениці і тритикале. Слід особливо наголосити, що матеріал білозерної пшениці незалежно від консистенції ендосперму зернівки (*hard* чи *extra-soft*) за обидва роки випробувань був переконливо оцінений за переважною більшістю тестів у 5 балів і не нижче як 4,5 бала. У гостропосушливому при екстремально пізньому посіві 2017 р. білозерний матеріал пшениці було оцінено за натурою зерна не нижче як 770—800 г/л, у 2018 р. білозерні селекційні лінії мали найвищу натуру зерна — 810—848 г/л.

На підставі отриманих даних за два роки досліджень можна зробити цілком обґрунтований висновок, що білозерний селекційний матеріал озимої пшениці характеризується високим потенціалом посухостійкості навіть в умовах комбінування екстремально пізнього посіву і гострого дефіциту вологи, що припадає на критичні фази формування й наливу зерна.

Ще цікавіші приклади щодо стійкості до посухи ми спостерігали на перспективному селекційному матеріалі озимого тритикале. За попередні роки в популяції від схрещувань ліпших селекційних ліній озимого тритикале з озимою пшеницею ваксі сорту Софійка ми вперше виділили оригінальні лінії тритикале з білим колосом (рис. 1). Цей матеріал було доведено періодичними доборами до стабільного стану і в 2018 р. вперше оцінено в ділянкових посівах.

У досліді 2018 р. рекордний урожай зерна 92,7 ц/га дала білоколоса лінія тритикале (СЛ7072/6940), яка відрізнялася також високими посухостійкістю, виповненістю й вимолотом зерна (рис. 2). Привертає увагу унікальна особливість цієї лінії тритикале: вона має дуже м'який колос, колосовий стрижень не руйнується при обмолоті, вилітає з-під комбайна неушкодженим, але в ньому не залишається жодної невимолоченої зернини (рис. 3). Ця особливість характерна й для багатьох інших елітних ліній тритикале з білим колосом.

У жодної елітної лінії тритикале з білим колосом в умовах жорсткої посухи не помічено характерного для непосухостійких ліній тритикале скручування листової пластинки як індикаторної реак-



Рис. 1. Колосся селекційних ліній озимого тритикале з червоним (зліва) і білим колосом

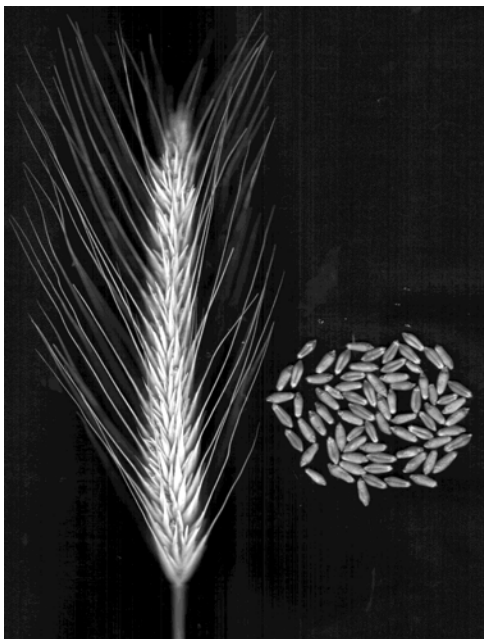


Рис. 2. Посухостійка лінія озимого тритикале (СЛ7072/6940) із білим колосом, високими виповненістю та вимолотом зерна

ції посухостійких генотипів на дефіцит вологи у ґрунті (рис. 4).

У процесі багаторічної роботи з озимим тритикале однією з ключових селекційних ознак, на яку ми звертали особливу увагу, є повнота вимолоту зерна. Річ у тому, що українські селекціонери вийшли на зерновий ринок із сортами тритикале з надзвичайно жорстким колосом і, як наслідок — поганим вимолотом зерна як одним із важливих чинників, що відвернув увагу виробників від культури тритикале. В результаті виконаної системної багаторічної роботи з добору генотипів із максимально високим вимолотом зерна ми отримали практично весь матеріал із високим вимолотом зерна.

Загалом лінії тритикале з білим колосом дали максимальний у досліді врожай зерна (> 90 ц/га) й показали відмінну виповненість зерна як прояв ознаки посухостійкості, що для культури тритикале особливо важливо, оскільки, як уже наголошувалось, культура тритикале не належить до посухостійких, і поява білоколосого посухостійкого матеріалу відкриває нові перспективи для просування цієї культури у виробництво.

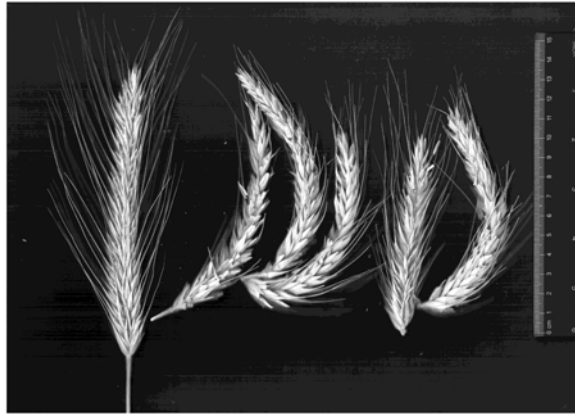


Рис. 3. Вимолочене колосся білоколосого тритикале. Крайній зліва — невимолочений колос

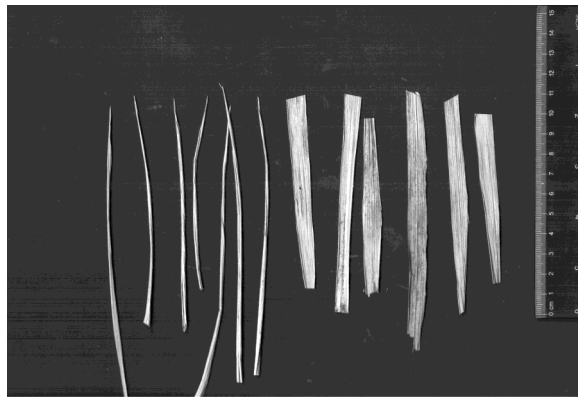


Рис. 4. Листкові пластинки непосухостійкого (зліва) і посухостійкого (справа) білоколосого тритикале

У дослідях 2017 р. перспективні лінії озимого тритикале мали високу виповненість зерна з максимумом 4,5 бала та середню натуру зерна 752 г/л. У 2018 р. більш як 10 ліній тритикале мали виповненість зерна 5,0 бала, і більшість його ліній за натурою зерна була на рівні не нижче як 760 г/л для 1-го класу якості озимої пшениці, згідно з вимогами ДСТУ 3768-2010. Максимальна натура зерна тритикале у дослідях 2018 р. становила 787 г/л. Однак ліпші лінії тритикале за натурою зерна не досягали значень ліпших ліній озимої пшениці.

Твердість зерна і вихід крупи. Твердість зерна пшениці, як уже зазначалося, у провідних країнах-експортерах світу є класоутворювальною характеристикою, яка в Україні залишилася поза увагою як селекціонерів, так і переробників зерна. Продемонструємо важливість показника твердості зерна на дослідному матеріалі як пшениці, так і тритикале. У світовій практиці пшеницю класифікують за ознакою твердості зерна на extra-soft, soft, medium soft, hard, medium hard, extra-hard, або українською: екстрाम'якозерна, м'якозерна, середньом'яко-

зерна, твердозерна, середньотвердозерна, екстратвердозерна. В Україні пшеницю за ознакою твердості зерна не класифікують ніяк.

Для визначення твердості зерна у світі широко використовують інфрачервоний аналізатор Inframatic 8611 або його аналоги типу SpectraAlyzer. Прилад Inframatic 8611 має шкалу додатних значень твердості для твердозерних і екстратвердозерних пшениць і від'ємних — для м'якозерних та екстрам'якозерних.

Ми вперше в Україні ввели у селекційну практику використання м'якозерних і екстрам'якозерних генотипів, отриманих у результаті віддалених схрещувань із матеріалом на основі дикорослих егілопсів *Ae. tauschii* та *Ae. cylindrica*, які є носіями геному D — ключового геному м'якої пшениці. У хромосомі 5DS (короткому плечі) міститься головний локус *Ha* (займає регіон ДНК 82 000 пн і містить три гени *Pin a*, *Pin b*, *Gsp-1*), що детермінує твердість зерна пшениці, з двома алелями: домінантним (алель дикого типу) *Ha* (*Hardness*), що контролює м'який ендосперм, і рецесивним *ha*, що робить ендосперм твердим. Отже, клас м'якозерної пшениці містить алель *Ha* дикого типу, а клас твердозерної пшениці несе альтернативний алель *ha* [20, 21]. Ось чому алель дикого типу *Ha* часто є у геномі дикорослих злаків, переноситься при віддалених схрещуваннях у геном культурної пшениці і спричинює відповідні зміни у структурі крохмальних гранул, які відповідають консистенції ендосперму типу *soft*.

У нашому досліді специфічний алель дикого типу *Ha* був перенесений у геном культурної пшениці від егілопсу *Ae. tauschii* з ефектом *extra-soft* (екстрам'якозерний), донором цього алеля для білозерного матеріалу пшениці був сорт екстрам'якозерної пшениці Білява.

Варіювання за ознакою твердості зерна на матеріалі наших дослідів спостерігали у вельми широкому діапазоні від негативного — 62 (*extra-soft*) до позитивного +69 (*extra-hard*). Генетична система контролю твердості зерна, яку ми використовуємо в дослідженнях, дає можливість отримати генотипи з будь-якими рівнями твердості в межах зазначеного діапазону. Як у позитивному, так і негативному діапазоні ми фіксували генотипи з різними рівнями твердості зерна, які відрізнялися між собою лише у кілька одиниць за шкалою твердості.

За походженням весь матеріал у досліді був поділений на дві групи: селекційні лінії з червоним зерном (твердозерні і м'якозерні), що походять від схрещування з різними амфіплоїдами-синтетиками, та селекційні лінії з білим і червоним зерном (твердозерні і м'якозерні), де донором білого кольору зерна й ознаки твердості зерна (*extra-soft*) був білозерний екстрам'якозерний сорт озимої пшениці Білява. Ознака твердості зерна чітко відтворювалася впродовж двох років випробування селекційного матеріалу: висока, середня чи низька твердість, характерна для кожної дослідженої селекційної лінії, зберігалася протягом двох років випробування практично без істотних змін залежно від умов вирощування, що свідчить про високий рівень генетичної детермінації цієї ознаки. Неочікувано високі позитивні значення твердості (від 50 до 59) зерна показали практично всі селекційні лінії, які походять від схрещування сорту Куяльник з

лінією MA1, що містить модифіковану 1RSm.1BL пшенично-житню транслокацію.

Усі селекційні лінії пшениці з комбінуванням максимальної кількості *Gli/Glu* алелів і позитивного впливу на хлібопекарську якість борошна знаходились у межах позитивних значень ознаки твердості зерна від 1 до 34 одиниць приладу Inframatic 8611, що типово для більшості сортів озимої пшениці української селекції.

Водночас в обох групах різних за походженням спостерігали широкий діапазон варіабельності від негативного -62 (extra-soft) до позитивного $17-20$ одиниць (hard). Найцікавішим за цільовою ознакою твердості зерна був селекційний матеріал, отриманий від схрещування твердозерного сорту Куяльник з екстрем'якозерним білозерним сортом Білява. Через істотну різницю за ознакою твердості й кольором зерна цих двох сортів селекційні лінії, отримані від їх схрещування, характеризувалися широким діапазоном варіювання за твердістю зерна. Серед популяції від цього схрещування були відібрані лінії за зерною продуктивністю білозерні селекційні лінії з високою, низькою і проміжною твердістю зерна й досліджені за комплексом технологічних характеристик.

Практично всі досліджені перспективні селекційні лінії озимого тритикале знаходились у негативному діапазоні за твердістю зерна від максимального -28 до нульових значень, і лише одна лінія показала $+3$ одиниці. Жодна лінія тритикале не отримала статусу екстрем'якозерної чи твердозерної. Слід наголосити, що в досліді ми вивчали гексаплоїдні тритикале (\times *Triticosecale* Wittmack) із геномною конституцією AABBRR, де відсутня хромосома 5D і відповідно рецесивний алель *ha*, що контролює високу твердість зерна. Крім того, хромосома 5R жита несе житні гени *Sin a*, *Sin b*, які є ортологами відповідних генів пшениці *Pin a*, *Pin b*, і кодують біосинтез пуроіндолінових протеїнів жита *secaloindolin a*, *secaloindolin b*. Ці гени визначають м'якозерний статус жита і відповідно гексаплоїдного тритикале [22].

Враховавши відому залежність борошномельних характеристик пшениці від твердості зерна, ми поставили за мету дослідити круп'яні характеристики зерна досліджуваних селекційних ліній пшениці і тритикале залежно від твердості зерна, оскільки круп'яні характеристики зерна пшениці і тритикале маловивчені й зовсім не досліджені на фоні широкого діапазону варіабельності за ознакою твердості зерна.

Отриманий у досліді загальний вихід крупни грубого жорнового помелу зерна селекційних ліній пшениці і тритикале урожаю 2018 р. ми розділяли на дві фракції: крупну з розміром часточок $>1,4$ мм і решту, що проходила через сито з продовгуватими отворами завширшки 1,4 мм. Крупна фракція біологічно цінніша, оскільки містить зародок і оболонку зерна, тоді як дрібна фракція складається переважно з дрібних часточок ендосперму.

Залежність загального виходу крупни від твердості зерна пшениці й тритикале ілюструє рис. 5. Щоб можна було простежити тенденцію залежності загального виходу крупни від твердості зерна, подамо дані стосовно матеріалу пшениці й тритикале як разом, так і окремо. На рис. 5 наведено загальну тенденцію залежності досліджуваних пара-

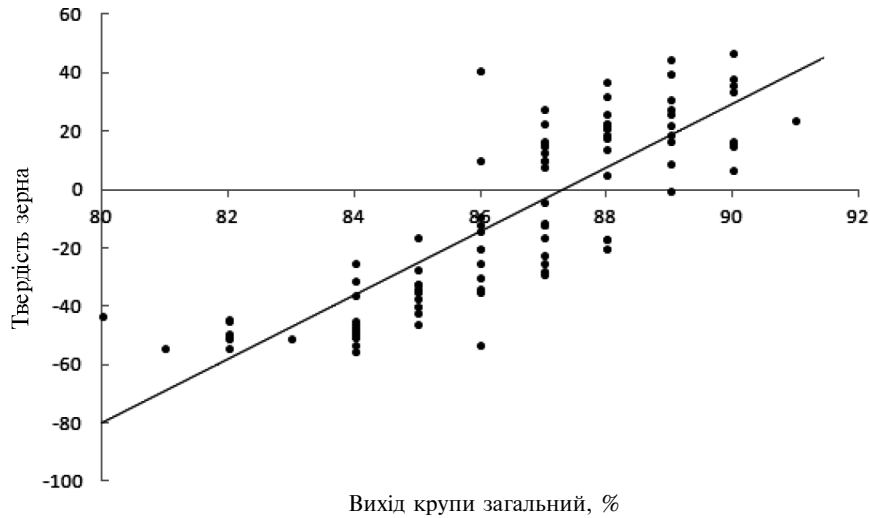


Рис. 5. Загальний вихід крупи жорнового помелу зерна селекційних ліній пшениці і тритикале з різною твердістю зерна ($n = 96$, $r = 0,839$, $P > 0,05—0,001$)

метрів пшениці і тритикале разом. Максимальний загальний вихід крупи до 91 % і мінімальний 80 % зафіксований відповідно для зразків із високою позитивною і високою негативною оцінкою твердості. Загальна кореляційна залежність $r = 0,839$ між твердістю зерна і виходом крупи доволі висока. Це означає, що чим вища твердість зерна, тим більший вихід крупи, і навпаки.

Втім можна бачити, що в межах однієї й тієї ж оцінки загального виходу крупи, наприклад 88 %, знаходяться 2 зразки зерна з негативними значеннями твердості і 8 зразків — з позитивними, в тому числі з максимальним позитивним значенням > 40 одиниць. За загального нижчого виходу крупи 86 % усього два зразки зерна знаходились у позитивному діапазоні твердості (причому один зразок > 40 одиниць), а решта 9 зразків у негативному діапазоні. За загального виходу крупи 89 % усі досліджені зразки мали позитивні значення твердості, а за виходу 85 %, навпаки, негативні. Отже, тут може йтися про певний діапазон загального виходу крупи (89—85 %), за межами якого всі зразки мають негативні або позитивні значення твердості зерна.

Аналіз виходу фракції крупи з розміром часточок $> 1,4$ мм показав закономірне зниження максимального виходу крупи цієї фракції з 91 до 76 %, а мінімального — з 80 до 55 % (рис. 6). За виходу крупи цієї фракції 71 % практично всі зразки потрапили в позитивний діапазон твердості, а за виходу 70 % майже всі в негативний. Кореляційна залежність виходу цієї фракції крупи з твердістю зерна при жорновому помелі залишалась на високому рівні ($r = 0,787$) і практично не змінювалась відносно варіанта із загальним виходом крупи.

Залежність співвідношення виходу фракції крупи з розміром часточок $> 1,4$ мм і загального виходу крупи від твердості зерна наведено на рис. 7. Як бачимо, за співвідношення 0,86 і вище майже всі досліджені зразки (за винятком двох) мали позитивні значення твердості зерна, а за співвідношення 0,85 і нижче майже всі зразки

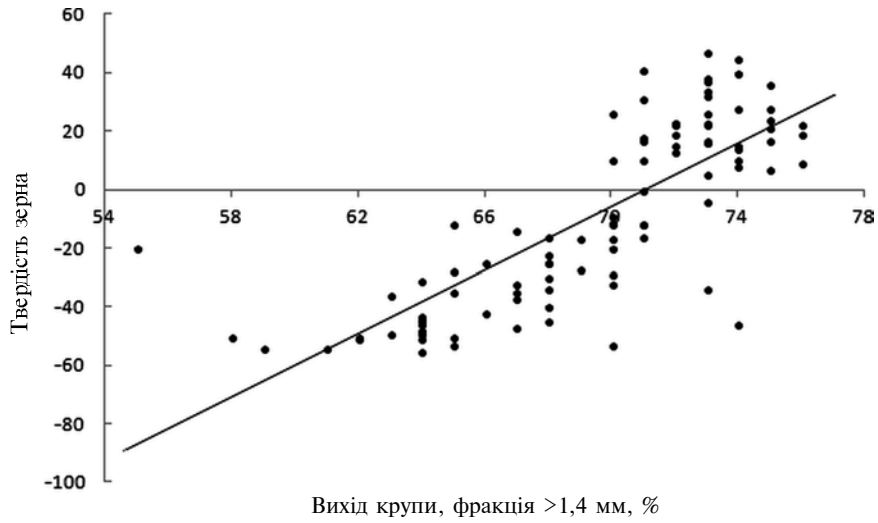


Рис. 6. Вихід крупи з розміром часточок >1,4 мм при жорновому помелі зерна селекційних ліній пшениці й тритикале з різною твердістю зерна ($n = 96$, $r = 0,787$, $P > 0,05-0,001$)

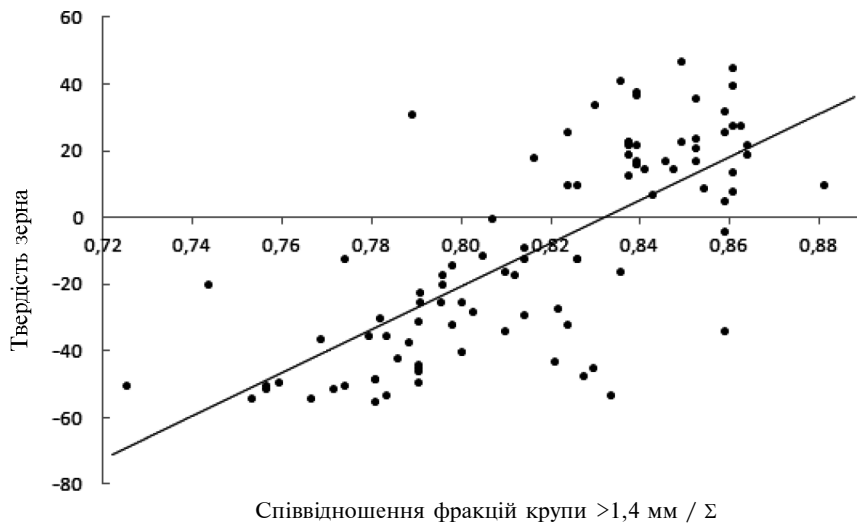


Рис. 7. Співвідношення фракції крупи >1,4 мм (у частках одиниці) й загального виходу крупи при жорновому помелі зерна селекційних ліній пшениці і тритикале з різною твердістю зерна ($n = 96$, $r = 0,787$, $P > 0,05-0,001$)

(за винятком одного) — негативні. Зразки зерна, що є винятком, цікаві для ретельного вивчення.

Загалом досліджені зразки пшениці і тритикале за виходом фракції крупи з розміром часточок >1,4 мм та її співвідношення із загальним виходом виявляють чітку тенденцію до поділу на дві окремі групи типу hard та soft і extra-soft, що узгоджується з моногенним (два альтернативних алелі) генетичним контролем ознаки твердості зерна (див. рис. 6, 7). Ця тенденція також свідчить про те, що максимальний вихід біологічно цінної фракції з розміром часточок >1,4 мм можна отримати із зерна з високою твердістю.

Твердість усіх досліджених селекційних ліній тритикале урожаю 2018 р. на відміну від широкого діапазону позитивних і негативних значень твердості зразків пшениці знаходилася в діапазоні лише негативних значень від 0 до -45 одиниць, тому цікаво було визначити кореляційну залежність між загальним виходом крупи зразків тритикале у цьому діапазоні (рис. 8).

Досить висока кореляційна залежність ($r = 0,762$) між загальним виходом крупи ліній тритикале і твердістю зерна чітко зберігається в діапазоні лише негативних значень твердості в одиницях приладу Inframatic 8611 (див. рис. 8). Звідси випливає, що як і у пшениці, максимальний вихід крупи тритикале можна отримати лише при помелі зерна з високою твердістю.

Від твердості зерна залежать не лише борошномельні, а й хлібопекарські характеристики борошна пшениці. Тому ми поставили за мету визначити залежність між твердістю зерна досліджуваного селекційного матеріалу та індексом седиментації борошна пшениці SDS-30K. Результати дослідження наведено на рис. 9. Ознака твердості селекційних ліній пшениці варіювала від негативної -60 до позитивної $+45$ одиниць. Кореляційна залежність між оцінкою твердості і седиментацією також виявилася доволі високою — $r = 0,711$. Досліджені зразки пшениці чітко поділились на дві окремі групи з позитивними й негативними значеннями твердості зерна (див. рис. 9). Такий характер поділу, як і в разі з виходом крупи, свідчить про моногенний характер генетичного контролю різниці між дослідженими твердозерними і м'якозерними селекційними лініями пшениці.

У дослідях 2018 р. в гостропосушливих умовах виділилися 26 перспективних селекційних ліній з білим зерном, які мали високу зернову продуктивність та особливо високу виповненість зерна. Ці лінії походять від однієї комбінації схрещування й різко відрізняються за твердістю зерна від негативного -60 до позитивного $+26$ значення (рис. 10).

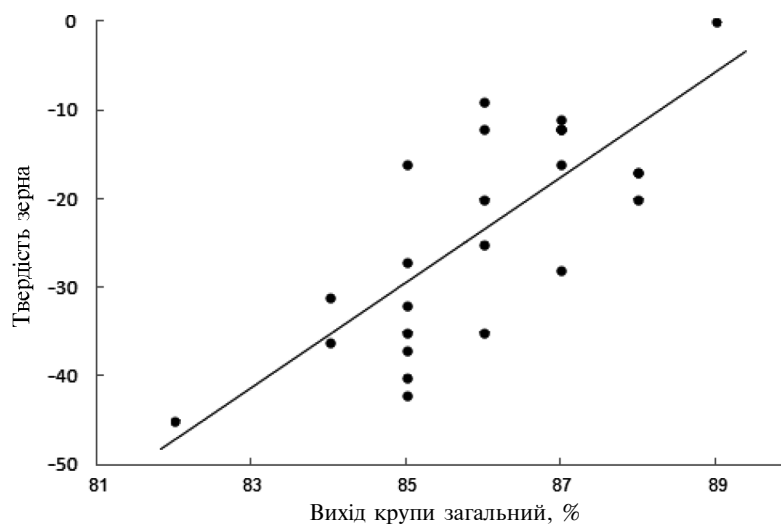


Рис. 8. Загальний вихід крупи селекційних ліній тритикале залежно від твердості зерна ($n = 25$, $r = 0,762$, $P > 0,05-0,001$)

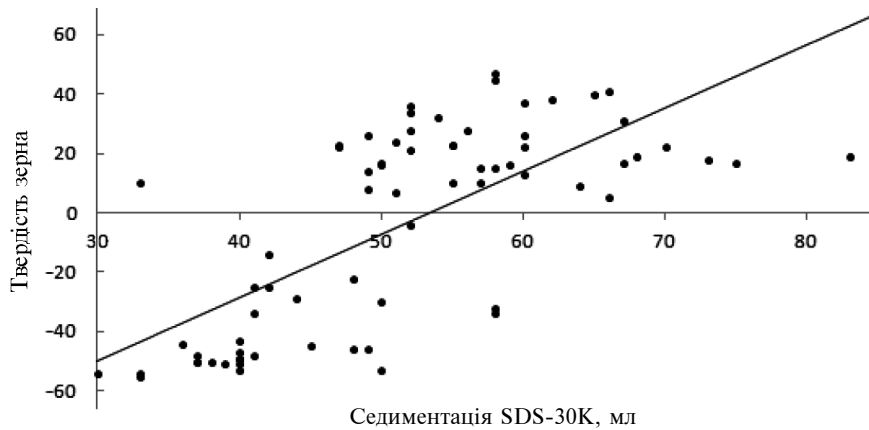


Рис. 9. Залежність між твердістю зерна та седиментацією SDS-30К борошна селекційних ліній озимої пшениці ($n = 71$, $r = 0,711$, $P > 0,05-0,001$)

Як бачимо, лише на окремому білозерному матеріалі озимої пшениці зберігається висока кореляційна залежність ($r = 0,782$) між твердістю зерна та седиментацією SDS-30К. Загальна сукупність досліджених ліній, як і в попередніх випадках, чітко поділяється на дві (м'якозерна і твердозерна) групи за характером моногенної генетичної детермінації ознаки твердості зерна.

Взявши до уваги низькі круп'яні характеристики м'якозерного й екстрем'якозерного білозерного і червонозерного матеріалу, ми дослідили зразки пшениці і тритикале за якістю пластівців, виготовлених із зерна цих селекційних ліній. Оскільки стандартної лабораторної процедури оцінки якості пластівців ми не знайшли, то розробили власну методику лабораторного виготовлення пластівців, яка б у загальних рисах копіювала промислову технологію їх виробництва.

Весь м'якозерний та екстрем'якозерний матеріал пшениці і тритикале оцінено за цією лабораторною процедурою. За критерій оцінки якості пластівців обрано їх здатність зберігати структуровану форму після прокатування обробленого (під тиском) парю зерно на вальцях, колір і форму пластівців. У результаті отримано практично

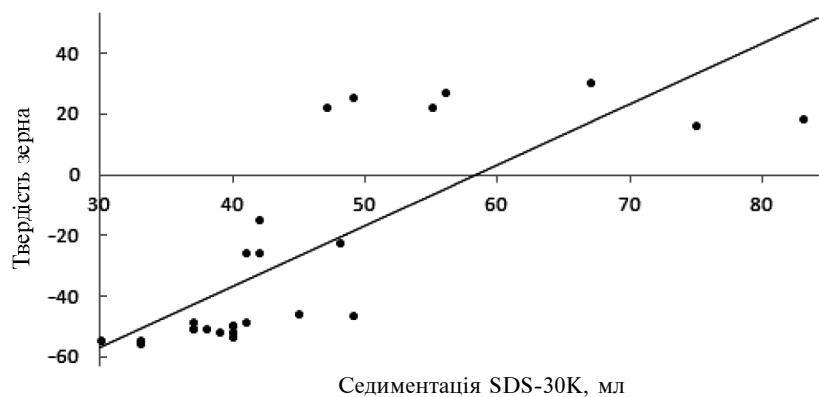


Рис. 10. Залежність між твердістю зерна та седиментацією SDS-30К борошна селекційних білозерних ліній озимої пшениці ($n = 26$, $r = 0,782$, $P > 0,05-0,001$)

однозначні висновки про те, що найгіршу якість мали пластівці з контрольних твердозерних зразків пшениці, найліпшу — зі зразків із крайніми негативними значеннями твердості зерна — екстрем'якозерних (рис. 11). Особливо високоякісними за формою і зовнішнім виглядом були пластівці, виготовлені із зерна білозерних екстрем'якозерних зразків пшениці, у тому числі із зерна білозерної екстрем'якозерної пшениці сорту Білява. М'якозерні зразки пшениці і тритикале отримали середні оцінки за якістю пластівців, виготовлених із їх зерна. Звідси можна дійти висновку, що твердість зерна справді є ключовим детермінантом як круп'яних характеристик зерна пшениці і тритикале, так і хлібопекарської характеристики пшениці, яку відбиває седиментація SDS-30К. Пластівці з м'якозерних та екстрем'якозерних зразків пшениці і тритикале мають вищу якість, ніж пластівці, виготовлені із зерна твердозерних зразків пшениці. Селекційні лінії з високою твердістю зерна ми розглядаємо як вихідний матеріал для створення спеціальних технологічних класів пшениці круп'яного напрямку, тоді як матеріал пшениці і тритикале з низькою твердістю зерна придатний для створення сортів бісквітного використання та виготовлення пластівців.

Вміст білка і седиментація. Вміст білка в зерні та індекс седиментації SDS-30К — важливі характеристики хлібопекарської якості борошна пшениці, особливо на ранніх етапах селекції, коли обсяг матеріалу для аналізу обмежений. Метод седиментації SDS-30К ми розробили спеціально для аналізу селекційного матеріалу пшениці, в тому числі ушкодженого клопом-черепашкою. Індекс седиментації борошна SDS-30К має високу корелятивну залежність із головними

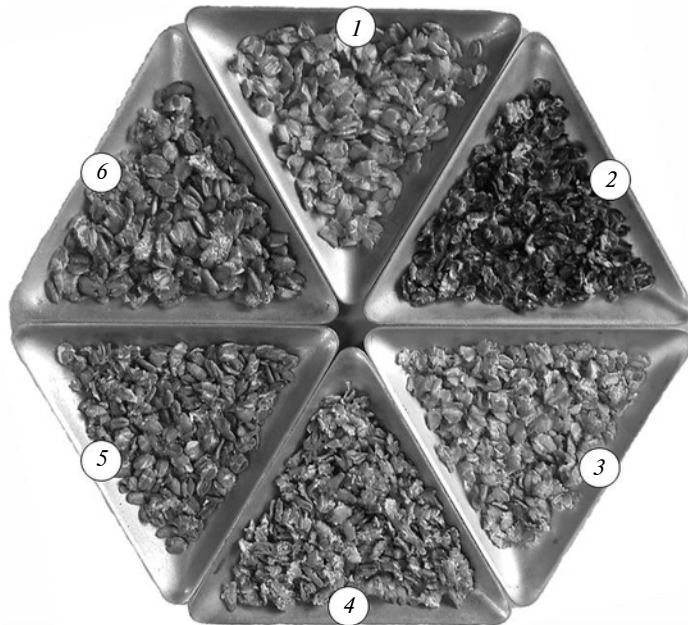


Рис. 11. Пластівці із зерна озимої пшениці та тритикале різної твердості:

1 — СЛ-8107 білозерна (–50); 2 — Чорноброва (+20); 3 — СЛ-8053 білозерна (–54); 4 — СЛ-8055 тритикале (–37); 5 — СЛ-8087 червонозерна (–34); 6 — СЛ-8093 тритикале (–42)

характеристиками еластичності тіста, такими як «сила» борошна W та індекс еластичності тіста Ie %.

Одним із головних питань, на яке ми шукали відповідь у дослідженні, чи можливо при віддалених схрещуваннях пшениці з дикорослими видами отримати селекційний матеріал із високою хлібопекарською якістю борошна?

Вміст білка в зерні за обидва роки досліджень сильно варіював від мінімального 8,3 % у деяких високопродуктивних ліній тритикале й 8,8 % у кількох білозерних екстрям'якозерних ліній до максимального 15,1–15,6 % у кількох червонозерних твердозерних ліній походженням від схрещувань сорту Куяльник з гексаплоїдними синтетиками. В зерні урожаю 2018 р. вміст білка загалом був істотно нижчим, ніж у попередньому році. Спостерігалася негативна кореляційна залежність ($r = -0,60$) між вмістом білка і виповненістю зерна. Втім за однакової виповненості зерна, наприклад 4,0 і такого ж урожаю зерна, різниця між окремими лініями за вмістом білка в зерні була 10,0 і 14,6 %. Жодна екстрям'якозерна лінія пшениці з високими негативними значеннями твердості зерна ($-50...-60$) не перевищувала за вмістом білка 11,0 %. Це цілком нормально, оскільки екстрям'якозерна пшениця, як правило, належить до класу бісквітних пшениць і, згідно з чинними вимогами, вміст білка в зерні не повинен перевищувати 11,0 %. Серед дослідженого матеріалу, що походить від схрещування з амфіплоїдами-синтетиками, виділено кілька десятків червонозерних і білозерних інтрогресивних ліній пшениці з найліпшою комбінацією таких ознак, як урожай зерна, вміст білка, виповненість і натура зерна.

Однак для ефективного підвищення вмісту білка в зерні пшениці потрібні надійні донори високого вмісту білка з генетично зумовленою детермінацією цієї ознаки, яку можна передавати й контролювати у поколіннях при схрещуванні. Такий донор був знайдений і детально досліджений у лабораторії Ж. Дубковського (J. Dubcovsky, UC Davis, USA) [23, 24]. Серед колекції дикорослої пшениці Ізраїлю виявлено високобілкові з крупним зерном зразки дикорослої двозернянки *T. turgidum* ssp. *dicoccoides* (Korn. ex Asch. and Graebn.) Thell. ($2n = 4x = 28$) із геномною формулою $A^u A^u BB$ [25]. Ця лінія дикорослої пшениці стала донором гена *Gpc-B1*, який сприяє ремобілізації азоту з вегетативних органів рослини пшениці в зерно і здатний істотно підвищувати вміст білка й ключових мінералів у зерні без значного негативного впливу на урожай зерна. Ген *Gpc-B1* активно й успішно використовує світова селекція пшениці вже понад 10 років [26].

У програмі досліджень озимої пшениці ми також використовуємо у схрещуваннях донор гена *Gpc-B1* на базі ярої хромосомно-заміщеної лінії (хромосома 6В від *T. turgidum* ssp. *dicoccoides*), яку отримали від її оригінатора професора Ж. Дубковського. Наявність гена *Gpc-B1* у популяціях контролюється за допомогою полімеразної ланцюгової реакції (ПЛР) (рис. 12).

У дослідах 2018 р. ми вивчали гомозиготні за цільовим геном *Gpc-B1* генотипи різних поколінь, отримані від схрещування сорту Куяльник із донором гена *Gpc-B1* (табл. 1).

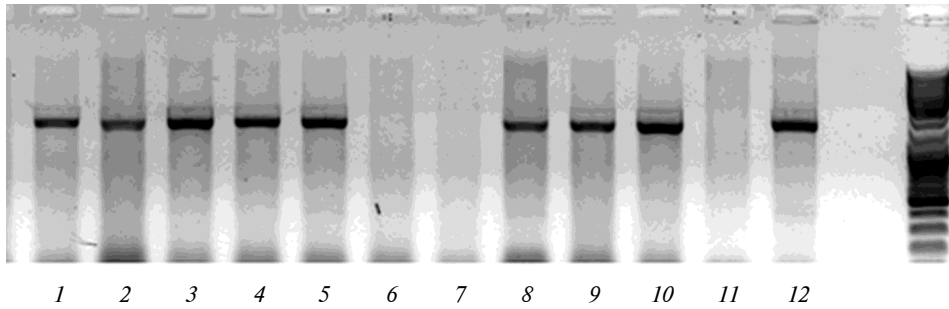


Рис. 12. Ідентифікація гена *Grc-B1* за допомогою полімеразної ланцюгової реакції у популяціях генотипів пшениці:

1–5, 8–10, 12 — генотипи з позитивним сигналом на ген *Grc-B1*

ТАБЛИЦЯ 1. Вплив гена *Grc-B1* на продуктивність, вміст білка в зерні та технологічні характеристики зерна генотипів озимої пшениці, гомозиготних за цільовим геном *Grc-B1*

Номер зразка	Походження	Маса зерна з 1 м рядка, г	Виповненість зерна, бал	Вміст протеїну, %	Твердість, Inframatic 8611	Седиментація, SDS-30K, мл
<i>Grc-B1+</i>						
824/35	F7, <i>Grc-B1</i> × Куяльник	257	3,0	13,9	42	93
825/25	F4, Кул* × 26/122(F4, <i>Grc-B1</i> × Кул)	292	3,3	13,4	34	92
825/29		217	2,8	14,3	35	91
825/46		283	3,8	12,6	28	93
826/38		211	3,0	14,1	38	92
826/42		250	3,8	12,5	21	93
826/45		225	2,8	14,4	1	96
826/47		223	2,8	13,5	10	95
827/38	F4, Кул × 635/76(<i>Grc-B1</i>)	271	3,8	12,5	12	88
827/40		234	3,8	12,7	19	88
827/41		271	3,3	13,0	20	93
828/41		315	3,8	12,8	17	91
828/42		249	3,0	12,9	18	87
828/45		279	2,8	13,2	9	86
828/47		293	3,3	12,9	13	90
828/48		298	3,0	13,5	6	94
	Усереднено	261	3,2	13,3	20	91
<i>Grc-B1-</i>						
822/34	F4, Кул × 425/1-49 (<i>Grc-B1</i>)	333	3,8	10,0	39	58
822/39		307	3,8	11,2	8	62
823/32		283	4,0	9,1	18	50
823/33		227	3,8	9,5	30	50
824/31	F7, <i>Grc-B1</i> × Куяльник	189	3,8	10,5	18	70

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НОВОГО НАПРАВЛЕНИЯ СЕЛЕКЦИИ

Закінчення табл. 1

824/32		149	3,0	11,6	8	68
824/37		259	3,8	11,1	11	64
824/41	F4, Кул × 26/122(F4, Gpc-B1 × Кул)	286	3,0	11,9	14	80
825/28		298	4,0	12,1	27	74
825/32		285	3,3	11,3	21	63
825/33		253	3,8	10,2	21	55
825/37		263	3,8	11,8	31	80
825/45		240	3,8	12,0	26	81
826/30		243	4,0	12,0	29	77
826/37		263	3,0	11,6	26	80
826/41		231	3,0	11,8	25	74
826/48		285	3,8	11,5	17	76
827/39	F4, Кул × 635/76(GpcB1)	313	3,8	11,3	15	76
827/42		244	3,8	11,6	13	77
828/46		300	3,8	11,9	13	85
	Усереднено	263	3,6	11,2	21	70
	$t_{\text{факт}}$	0,16	2,96**	8,17**	0,09	8,56**
	$t_{\text{табл 05}} = 2,03$					
	$t_{\text{табл 01}} = 2,73$					

*Кул — Куяльник; **рівень значущості $p < 0,01$.

Отримані результати дослідження впливу гена *Gpc-B1* на вміст білка в зерні та деякі технологічні характеристики зерна генотипів із геном *Gpc-B1* і без нього, наведені в табл. 1, ми розглядаємо як попередні, оскільки цей матеріал ще потребує ретельної селекційної проробки та об'єктивнішого порівняння в ділянкових посівах. Однак навіть попередні дані виявилися досить цікавими й такими, що дають підставу дійти висновку — ген *Gpc-B1* працює. Так, генотипи з геном *Gpc-B1+* порівняно з генотипами без нього *Gpc-B1—* містили в середньому протеїну в зерні на 2,1 % більше і переважали останніх за індексом SDS-30K седиментації в середньому на 20 мл.

Не виявлено істотної різниці між генотипами *Gpc-B1+* і *Gpc-B1—* за збором зерна з 1 м рядка і твердістю зерна. Разом з тим генотипи *Gpc-B1+* порівняно з генотипами *Gpc-B1—* мали вірогідно знижену виповненість зерна. Як свідчить світова селекційна практика використання гена *Gpc-B1*, виповненість зерна можна значно поліпшити добром генотипів із геном *Gpc-B1+* у комбінації з молекулярними маркерами для генів, що поліпшують виповненість зерна і дають змогу нівелювати різницю за цією ознакою між генотипами *Gpc-B1+* та *Gpc-B1—* [26].

Оскільки вміст білка в зерні є ознакою стратегічного значення для культури пшениці, з урахуванням успішного світового досвіду використання гена *Gpc-B1*, ми вважаємо, що цей ген як цільовий має бути наявним в усіх селекційних програмах створення сортів пше-

ниці в Україні з високим вмістом у зерні білка і ключових мікроелементів [27].

Високий вміст білка в зерні пшениці не завжди відповідає високим характеристикам хлібопекарської якості борошна пшениці, оскільки крім кількості білка існує поняття його якості, що значно більшою мірою є генетично детермінованою ознакою і визначається головно алельним складом *Gli/Glu* локусів, які кодують біосинтез клейковинних білків зерна. У зв'язку з цим весь матеріал пшениці і тритикале, вивчений у досліджах 2017–2018 рр., було оцінено методом SDS-30К седиментації, який має високу кореляційну залежність саме з якістю білка і може слугувати надійним критерієм прогнозування рівня фактичної хлібопекарської якості зразка пшениці. Наголосимо, що седиментація SDS-30К на відміну від тесту Zeleny, стандартизованого в ЄС, більшою мірою пов'язана з якістю білка і меншою — з його вмістом, тоді як тест Zeleny, навпаки, значно більше залежить від вмісту білка в зерні і менше — від його якості. Значення седиментації SDS-30К залежно від об'єму осаду седиментації поділяють на три групи: 70–98 мл — високої якості, 55–70 — середньої, 25–55 мл — низької якості.

Серед майже 490 зразків пшениці і тритикале, досліджених у 2017 і майже стільки ж у 2018 р., спостерігали значну варіабельність за показниками SDS-30К седиментації від 80–95 мл у матеріалі, який акумулює сильні щодо впливу на хлібопекарські якості *Gli/Glu* алелі (у тому числі алель *Gli-D1cyl*, інтрогресований у культурну пшеницю від дикорослого егілопсу *Ae. cylindrica*), до 57–70 мл серед м'якозерних та екстрем'якозерних генотипів. У селекційному матеріалі, що походить від схрещувань з амфіплоїдами-синтетиками, також виявлено зразки з високою (до 98 мл) і низькою (35–40 мл) седиментацією.

Перспективні селекційні лінії пшениці, що містять модифіковану 1RSm.1BL транслокацію, в якій негативний щодо якості житній локус *Sec-1* замінений на позитивний пшеничний, характеризувалися середніми значеннями SDS-30К седиментації 60–75 мл, тоді як лінії з оригінальною 1RS.1BL пшенично-житньою транслокацією мали традиційно низькі показники седиментації — лише 35–40 мл. Отже, модифікована пшенично-житня транслокація катастрофічно не знижує рівень хлібопекарської якості пшениці, як це має місце у ліній і сортів пшениці з оригінальною 1RS.1BL пшенично-житньою транслокацією.

Селекційні лінії пшениці з чорним зерном незважаючи на високий вміст протеїну в зерні (до 15,3 %) в основному характеризувалися низьким рівнем SDS-30К седиментації. Цей матеріал орієнтований на створення сортів чорнозерної пшениці круп'яного напрямку використання, де висока хлібопекарська якість взагалі не потрібна.

Практично всі білозерні м'якозерні та екстрем'якозерні селекційні лінії також мали низькі показники SDS-30К седиментації на рівні 37–45 мл до максимум 58 мл.

Лінії озимого тритикале за досить високого врожаю зерна (80–95 ц/га) за обидва роки випробувань і низького вмісту білка в зерні

(10—11 %) теж характеризувались низькими показниками SDS-30K седиментації — 17—31 мл.

Еластичність тіста та об'єм хліба. Селекційний матеріал озимої пшениці походженням від різних, у тому числі віддалених схрещувань, що був вирощений у 2017 р., виявився надзвичайно різноманітним за основними характеристиками еластичності тіста, такими як «сила» борошна W , індекс еластичності тіста Ie та індекс конфігурації альвеограми P/L залежно від вмісту протеїну в зерні, твердості зерна та водопоглинальної спроможності (ВПС) борошна. Важливо наголосити, що максимальну в досліді «силу» борошна ($W = 421$ і 303) мали лінії пшениці, одна з яких містила екзотичний алель *Gli-D1*, перенесений у культурну пшеницю від егілопсу *Ae. tauschii*. Найнижча «сила» борошна у досліді ($W = 82$) виявилася у білозерної екстрям'якозерної лінії з високою негативною твердістю (-54) і вмістом у зерні протеїну всього 10,7 %.

Загалом екстрям'якозерні селекційні лінії, як і очікувалося, мали низькі вміст у зерні протеїну, ВПС і «силу» борошна. Однак білозерні лінії пшениці, які за твердістю зерна балансували між hard і soft, показали прийнятний рівень «сили» борошна ($W = 250...270$).

Перспективні селекційні лінії походженням від схрещування сорту Куяльник з амфіплоїдами-синтетиками, в яких індекс еластичності тіста Ie знаходився на рівні 60 % і вище, відрізнялися також великим об'ємом хліба. Найбільший у досліді об'єм мав хліб ($V = 1720$ см³, $Ie = 63$ %, вміст протеїну 12,5 %, $P/L = 0,99$), випечений зі 100 г борошна перспективної селекційної лінії пшениці СЛ7322, отриманої від схрещувань за участю амфіплоїдів-синтетиків (рис. 13). Тісто з борошна цієї лінії мало також найвищу в досліді розтяжність (87 мм) — характеристика, яка відіграє критично важливу роль у формуванні великого об'єму хліба. Хліб з борошна багатьох інших селекційних ліній пшениці, отриманих від віддалених схрещувань, також мав великий об'єм — 1500—1600 см³. Одна червонозерна екстрям'якозерна лінія (-40 одиниць твердості), отримана від схрещування з амфіплоїдом-синтетиком, за седиментації всього 55 мл мала великий об'єм хліба — 1600 см³. Практично всі інтрогресивні селекційні лінії

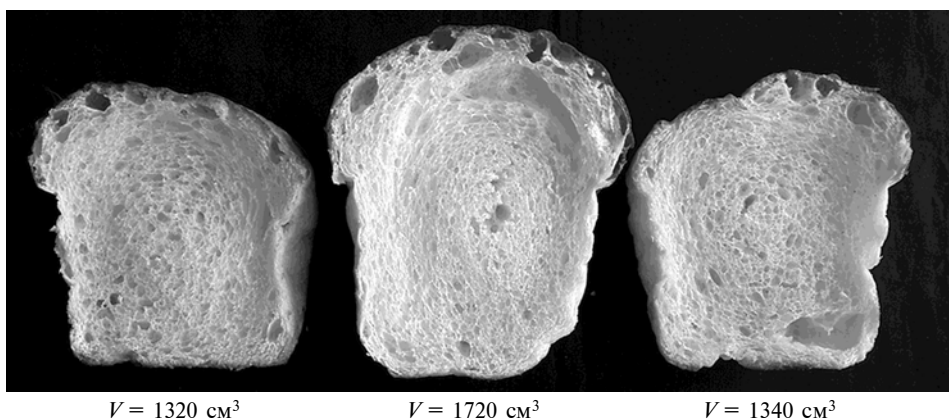


Рис. 13. Перспективна селекційна лінія пшениці СЛ7322 з найбільшим об'ємом хліба ($V = 1720$ см³) у досліді 2017 р.

з великим об'ємом хліба також отримали високі оцінки шпаристості м'якуша хліба.

Як уже зазначалося, всі перспективні лінії тритикале, досліджені у 2017 і 2018 рр., характеризувались низькими оцінками SDS-30K седиментації борошна. Відповідно всі 30 ліній тритикале урожаю 2017 р. порівняно з пшеницею мали малі об'єми хліба — всього 300—400 см³, низьку водопоглинальну спроможність (ВПС — 52—56 % проти 59—62 % у твердозерної пшениці). Майже всі лінії тритикале отримали негативні оцінки твердозерності (—5...—28 одиниць). Лише одна лінія тритикале з позитивною оцінкою твердозерності +3 одиниці показала найвищу серед тритикале оцінку седиментації борошна — 31 мл, найвищу ВПС — 57,8 % і найбільший об'єм хліба — 480 см³. Число падіння серед ліній тритикале вельми різнилося від мінімального 130 с до максимального 350 с.

Електрофоретичним аналізом в усіх перспективних лініях тритикале виявлено обидва житні локуси *Sec-1* і *Sec-3*, які кодують біосинтез клейковинних білків жита секалінів, вкрай негативно пов'язаних із хлібопекарськими властивостями як жита, так і тритикале.

Принагідно наголосимо, що ми випікали хлібці з борошна тритикале за типом подового, а не формового хліба. Випічка лабораторних хлібців із борошна тритикале за типом формового хліба — це груба помилка, яку допускають практично всі автори в Україні, які досліджують хлібопекарські якості борошна тритикале. Тритикале — особлива культура в сенсі хлібопекарської якості, її некоректно порівнювати з пшеницею в режимі випічки формового хліба, для якого потрібна висока якість клейковини, тому тритикале завжди програватиме пшениці. Хліб із борошна тритикале (як і з жита та пшениці спельти) у промисловому виробництві також має бути виключно подовим, а не формовим.

Із результатів досліджень можна дійти таких висновків. По-перше, при віддалених схрещуваннях за участю дикорослих джерел-донорів ключового геному D пшениці можна отримати селекційний матеріал високої хлібопекарської якості. По-друге, твердість зерна визначає належність генотипів пшениці до двох різних класів якості: твердозерних селекційних ліній з високими показниками хлібопекарської якості і м'якозерних та екстрем'якозерних селекційних ліній, отриманих виключно від віддалених схрещувань, із низькими хлібопекарськими характеристиками. Проте остання група генотипів пшениці включно з тритикале відповідає всім основним критеріям щодо бісквітної якості борошна і може слугувати цінним вихідним матеріалом для створення сортів пшениці і тритикале бісквітного напрямку використання зерна [28].

Екзотичні алейні варіанти локусів *Gli/Glu* і якість зерна. Одним із ключових чинників, які детермінують хлібопекарську та інші якості зерна пшениці, є генетичне різноманіття клейковинних білків, або генетична варіабельність за алейним складом локусів *Gli/Glu*, що кодують біосинтез білків клейковини, фізичні властивості якої безпосередньо пов'язані з реологією тіста. Оскільки більшість селекційного матеріалу, створюваного за нашою програмою, походить від відда-

лених схрещувань, цілком закономірно очікувати на появу в нашому селекційному матеріалі ознак із незвичайними для традиційно створених сортів характеристиками. Особливо це стосується алельного складу локусів *Gli/Glu*.

На рис. 14 наведено електрофореграми клейковинних білків зерна інтрогресивних ліній пшениці з алелем *Gli-D1cyl*, перенесеним у геном культурної пшениці (у вигляді кластера разом із маркерним геном, що контролює коричневе забарвлення зовнішньої колосової луски) від дикорослого ендемічного виду *Ae. cylindrica* ($2n = 4x = 28$).

Природно, що цей екзотичний алель не трапляється в жодного з відомих сортів пшениці. За нашими даними, алель *Gli-D1cyl* чинить найсильніший серед відомих алелів локусу *Gli-D1* пшениці вплив на хлібопекарські і водночас борошномельні (підвищує твердість зерна) характеристики зерна пшениці. У дослідях практично всі селекційні лінії пшениці, які містили алель *Gli-D1cyl*, мали високі й задовільні хлібопекарські характеристики, що підтвердило дані, отримані нами раніше [9]. Крім того, алель *Gli-D1cyl* ми включили у програму створення селекційного матеріалу для сортів пшениці з максимальною кількістю алелів *Gli/Glu* із сильним позитивним впливом на хлібопекарські властивості борошна пшениці.

На рис. 15 наведено три селекційні лінії пшениці з екзотичним алелем *Gli-D1ts*, інтрогресованим у хромосому 1D пшениці від дикорослого егілопсу *Ae. tauschii*. Як і в попередньому випадку з інтрогресією алеля *Gli-D1cyl*, у рекомбінантно-інбредних ліній з інтрогресією алеля *Gli-D1ts* ми спостерігали також істотне збільшення седиментації (на 10–15 мл) порівняно з лініями без нього.

Екзотичні алелі *Gli-D1cyl* і *Gli-D1ts*, які чинять сильні позитивні ефекти на хлібопекарську якість, ми оцінили як додаткові до існуючого серед сортименту пшениці генетичного ресурсу для поліпшення якості зерна нових сортів пшениці.

Рис. 16 демонструє вельми рідкісне явище: відсутність у двох генотипів пшениці субодиниці *Glu-D1x5*, яка є складовою зазвичай стабільного кластера *Glu-D1x5+y10* із двох субодиниць. Субодиниці *x5* та *y10* наявні разом лише в сортів пшениці з високим рівнем хлібопекарської якості й успадковуються завжди в тісному зчепленні. Субодиниця *x5* — одна з найбільш насичених залишками амінокислоти цистеїну (5 залишків) і є важливим генетичним детермінантом високої хлібопекарської якості, оскільки бере участь у формуванні

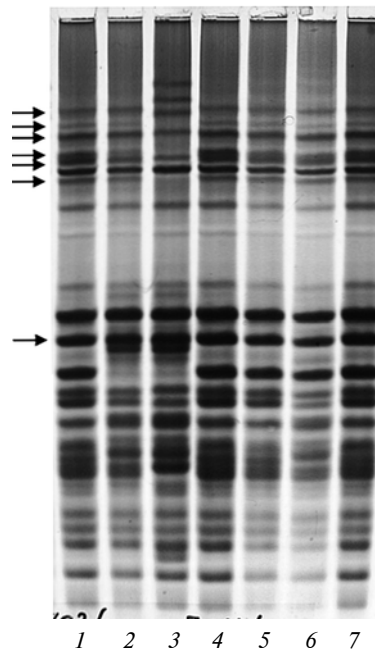


Рис. 14. Інтрогресивні лінії пшениці (1, 2, 4–7; 3—стандарт), що містять екзотичний алель *Gli-D1cyl* (позначено стрілками), перенесений у геном культурної пшениці від дикорослого ендемічного егілопсу *Ae. cylindrica*

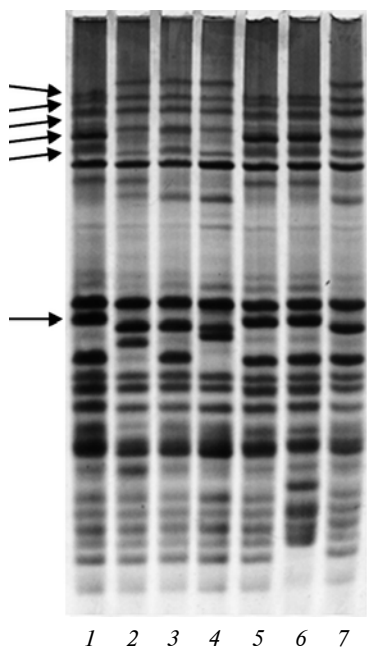


Рис. 15. Інтрогресивні лінії пшениці (1, 5, 6) з екзотичним алелем *Glu-D1s* (позначено стрілками), перенесеним у геном культурної пшениці від дикорослого егілопу *Ae. tauschii*

клейковинного комплексу внаслідок утворення ковалентних інtermолекулярних —S—S— дисульфідних містків [29]. Генотипи без субодиниці x5 ізольовані в популяції віддалених схрещувань, а сам факт відсутності цієї субодиниці ми розцінили як акт внутрішньолокусної делеції в локусі *Glu-D1* пшениці.

Відсутність субодиниці x5 приводила до різкого майже вдвічі зменшення SDS-30 седиментації порівняно із сестринськими лініями, де ця субодиниця наявна як *Glu-D1x5+y10* кластер. Лінії пшениці без субодиниці x5 — цікавий модельний матеріал для дослідження ролі субодиниці x5 у формуванні хлібопекарської якості пшениці. Водночас їх доцільно використовувати у схрещуваннях при створенні сортів пшениці технологічних класів, де висока хлібопекарська якість не є пріоритетом, наприклад сортів круп'яного і бісквітного напрямів використання.

У польових дослідах 2018 р. ми вивчали також селекційні лінії пшениці з екстраекспресією біосинтезу субодиниць

високомолекулярних глютенінів *Glu-A1x2** і *Glu-D1x5*, кожна з яких кодується потроєною кількістю копій базової послідовності [30]. При електрофоретичному розділенні субодиниць високомолекулярних глютенінів *Glu-A1x2** і *Glu-D1x5* проявлялися щонайменше з потроєною інтенсивністю порівняно з відповідним стандартним фенотипом (рис. 17).

Вихідні оригінальні лінії з екстраекспресією субодиниць *Glu-A1x2** і *Glu-D1x5*, отримані на базі ярого сорту пшениці Bob White, були схрещені із сортом Куяльник. Дослідження успадкування субодиниць *Glu-A1x2** і *Glu-D1x5* показало, що додаткові екстракопії послідовностей для кожної субодиниці інтегровані в базовий сайт

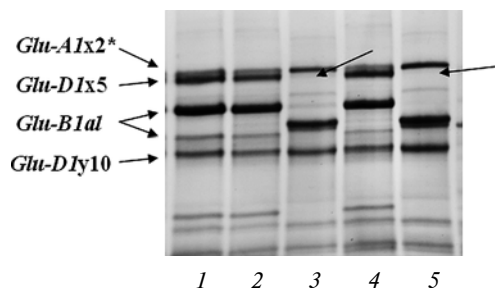


Рис. 16. Електрофореграми міні-SDS-електрофорезу високомолекулярних глютенінів пшениці. Селекційні лінії 3 і 5 містять інтралокусну делецію субодиниці *Glu-D1x5* (позначено стрілками)

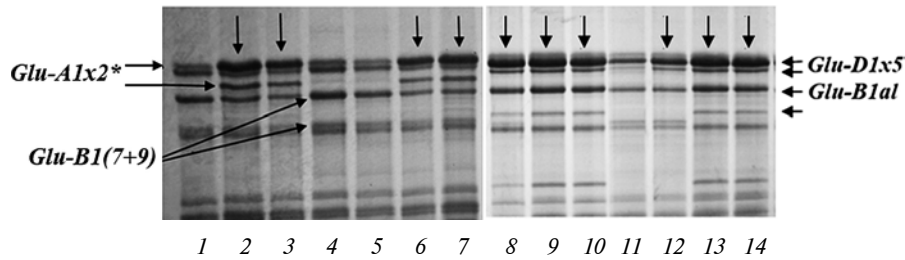


Рис. 17. Электрофореграммы мини-SDS-электрофорезу высокомолекулярных глютенинов селекционных линий пшеницы с экстраэкспрессией субединицы *Glu-A1x2** (2, 3, 6, 7) та субединицы *Glu-D1x5* (8–14). Алель *Glu-B1a1* (8–10, 13, 14)

відповідних локусів *Glu-A1* і *Glu-D1* та успадковуються як одне ціле без сегрегації. Екстрадоза кожної субединиці легко детектується за допомогою електрофоретичного аналізу. Крім екстраекспресії субединиць *Glu-A1x2** і *Glu-D1x5* у популяції від схрещування із сортом Куяльник є також алель *Glu-B1a1*, характерний для цього сорту зі спонтанною екстраекспресією субединиці *Glu-B1x7*, яка теж ідентифікується при електрофоретичному аналізі.

У 2018 р. ми вивчали ефекти екстраекспресії субединиць *Glu-A1x2** і *Glu-D1x5* на характеристики зерна стабільних селекційних ліній F7 (табл. 2).

У дослідження були включені такі ознаки, як збір зерна з 1 м рядка, виповненість і твердість зерна, вміст протеїну в зерні, SDS-30К седиментація. З наведених у табл. 2 даних видно, що лінії з екстраекспресією субединиці *Glu-D1x5* дали в середньому дещо нижчий урожай зерна з 1 м рядка порівняно зі стандартом сортом Куяльник. Лінії з екстраекспресією субединиці *Glu-A1x2** за збором зерна з 1 м рядка практично не відрізнялися від сорту Куяльник. Лінії з екстраекспресією обох субединиць *Glu-D1x5* і *Glu-A1x2** мали в середньому ліпше виповнене зерно, ніж сорт Куяльник. За вмістом білка в зерні обидва варіанти екстраекспресії субединиць *Glu-D1x5* і *Glu-A1x2** вірогідно переважали сорт Куяльник, особливо виділялися лінії з екстраекспресією субединиці *Glu-A1x2**, які за середнім вмістом білка в зерні (13,0 %) істотно переважали сорт Куяльник, що містив у середньому 10,7 % білка в зерні. Особливо сильним був ефект екстраекспресії обох субединиць *Glu-D1x5* і *Glu-A1x2** на ознаку твердості зерна. Лінії з екстраекспресією *Glu-D1x5* у середньому майже вдвічі (58 проти 32) переважали сорт Куяльник за твердістю зерна. Вкрай сильно екстраекспресія субединиці *Glu-A1x2** впливала на показник седиментації борошна SDS-30К — в середньому на 22 мл перевищувала середнє значення 70 мл седиментації для сорту Куяльник. Ефект екстраекспресії субединиці *Glu-D1x5* негативно позначався на показнику седиментації, вірогідно знизивши його в середньому на 17 мл порівняно зі значенням седиментації борошна сорту Куяльник (53 мл проти 70 мл). Негативний ефект екстраекспресії субединиці *Glu-D1x5* на показник седиментації можна пояснити тим, що екстрадоза субединиці *Glu-D1x5* призводить до надлишкової кількості у клейковині міжмолекулярних —S—S— зв'язків, які надають клейковині незвичай-

ТАБЛИЦЯ 2. Вплив екстраекспресії субодиноць високомолекулярних глютенінів *Glu-D1x5* і *Glu-A1x2** на урожай та характеристики зерна озимої пшениці (урожай 2018 р.)

Номер зразка	Походження	Маса зерна з 1 м рядка, г	Виповненість зерна, бал	Вміст протеїну, %	Твердість, (Infromatic 8611)	Седиментація, мл (SDS-30K)	
804/69	Куяльник	264	3,8	10,3	34	61	
808/70		302	4,0	9,8	30	68	
818/71		293	3,8	11,4	32	74	
822/69		297	3,8	10,5	24	64	
827/70		330	4,0	11,1	35	80	
827/71		279	4,0	11,0	35	74	
		Усереднено	294	3,9	10,7	32	70
<i>Glu-D1x5</i> (***)							
823/52	F7, Кул × <i>Glu-D1x5</i> (***)	277	4,0	11,7	53	53	
823/55		218	4,0	12,5	58	51	
823/57		265	4,0	12,3	69	53	
823/68		272	4,3	11,2	61	50	
823/73		241	4,3	10,5	56	54	
823/74		284	3,8	11,6	57	53	
823/75		215	4,3	12,1	62	54	
823/79		300	4,0	11,6	53	52	
823/81		219	4,3	11,2	55	52	
823/90		257	4,3	12,6	55	58	
		Усереднено	255	4,1	11,7	58	53
		$t_{\text{факт}}$	2,98*	3,08**	3,28**	11,28**	5,76**
		$t_{\text{табл 05}} = 2,15$					
		$t_{\text{табл 01}} = 2,98$					
<i>Glu-A1x2*</i> (***)							
823/112	F7, Кул × <i>Glu-A1x2*</i> (***)	213	4,3	13,2	46	92	
823/114		194	4,3	10,9	37	84	
823/115		262	3,8	13,9	57	92	
823/118		256	4,0	13,6	50	93	
823/121		251	3,8	12,3	52	91	
823/122		330	4,3	13,0	41	94	
823/124		288	4,0	14,2	49	94	
823/125		263	3,8	13,3	58	92	
823/130		342	4,0	13,4	46	94	
823/132		366	4,3	12,9	55	93	
823/133		304	4,0	13,5	35	94	
823/136		357	4,3	12,2	52	92	
		Усереднено	286	4,1	13,0	48	92
		$t_{\text{факт}}$	0,47	2,30*	6,67**	5,97**	7,28**
	$t_{\text{табл 05}} = 2,12$						
	$t_{\text{табл 01}} = 2,92$						

но високої пружності, що й виявляється у зниженні хлібопекарської якості та супроводжується зменшенням SDS-30K седиментації.

Отже, результати досліджень, підтвердили, що такий важливий чинник як генетична варіабельність за алельним станом *Gli/Glu* локусів і посилення експресії окремих генів, які кодують біосинтез клейковинних білків, можуть бути дієвим інструментом у створенні нових і поліпшенні існуючих за якістю зерна класів, у тому числі екстрасильної пшениці.

На жаль, чинна сьогодні в Україні система оцінювання нових сортів пшениці виключно за пріоритетом зернової продуктивності залишає якість зерна на задньому плані, стимулює створення врожайних сортів пшениці фуражної якості, неякісне збіжжя яких Україна пропонує на міжнародному ринку.

Селекція пшениці круп'яного напрямку використання. Як уже наголошувалось, крупа із зерна пшениці та інших культур — чи не єдиний різновид натурального харчового продукту на полицях сучасних супермаркетів. Крупа із цілого змеленого зерна як пшениці, так і тритикале, особливо грубого жорнового помелу, зберігає всі біологічно цінні компоненти, які містяться головню у периферійних шарах зерна й зародка, має незрівнянно вищу харчову (біологічну) цінність порівняно з білим рафінованим, біологічно збідненим борошном [31].

Більше того, хліб і хлібопродукти випікаються при температурі 400—425 °С. А вже при температурі 120 °С і вище в цих (як і в багатьох інших) продуктах у результаті реакції Мейларда за участю амінокислоти аспарагіну та вуглеводів (типу глюкози і фруктози) утворюється вкрай небезпечна генотоксична (індукує мутації ДНК), нейротоксична і канцерогенна сполука акриламід [32]. Так, згідно із шокуючими даними Агентства безпеки харчових продуктів Ірландії, з хлібом і хлібопродуктами населення споживає 44 % (!) акриламиду загальної його кількості, вживаної з харчами, і 48 % цього небезпечного токсину потрапляє в організм із продуктами з картоплі, виготовленими за температур понад 120 °С (картопля фрі, чипси тощо) [33].

На відміну від хліба і хлібопродуктів каша з крупи готується при температурі, нижчій за 100 °С й акриламід за цих умов не утворюється. Отже, біологічна цінність крупи із зерна пшениці і тритикале незрівнянно вища, ніж продуктів випічки із білого рафінованого і навіть оббивного борошна.

Вище ми продемонстрували залежність між виходом і якістю крупи та твердістю зерна. Генетичну варіабельність пшениці за кольором зерна сьогодні розглядають як важливе джерело біофортифікації (збагачення) пшениці такими біологічно цінними складовими зерна, як вітаміни, мінерали й особливо компоненти зерна з антиоксидантною активністю [34].

Крім сортів пшениці з червоним зерном (єдиний клас пшениці в Україні) світова селекція створює численні сорти з білим, чорним і голубим зерном (рис. 18). Білозерні сорти пшениці поширені в США, Австралії, Канаді, Китаї. Чорнозерні сорти пшениці особливо ціняться в Китаї, де в результаті численних фундаментальних науко-

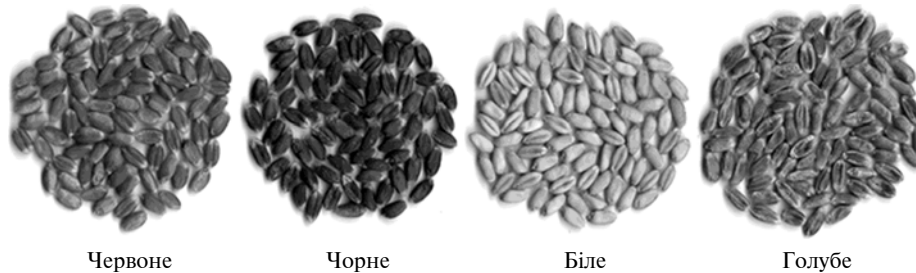


Рис. 18. Зразки зерна пшениці з різною пігментацією зернівки як маркерною ознакою його високої біологічної цінності

вих досліджень доведено надзвичайно високу біологічну цінність такого зерна [35].

Вже відомі сорти пшениці із голубим зерном [6]. Перший сорт із голубим зерном Skorpion зареєстрований у 2011 р. в Австрії, а в 2012 р. він занесений у Європейський каталог сортів (рис. 19). Сорти із чорним і з голубим зерном містять цілий комплекс речовин (дельфінін-3-глюкозид, дельфінін-3-рутинозид, ціанідин-3-глюкозид, 3-ціанідин рутинозид) із високою антиоксидантною активністю, яку сучасна нутриціологія розцінює як головний харчовий чинник антиракової профілактики, протизапальної дії, профілактики оксидативного стресу, цукрового діабету, хвороб очей [36, 37].

Генетичний контроль незвичайної для пшениці чорної і голубої пігментації зерна достеменно досліджений, відомі також джерела її походження. Донорами цього типу пігментації зерна є головно дикорослі рослини, такі як пирій (*Thinopyrum ponticum* = *Agropyron elongatum* = *Lophopyron elongatum*) [38].

Сьогодні ми активно використовуємо у селекційній роботі всі зазначені вище джерела з різним кольором зерна у комбінації з різною консистенцією ендосперму (твердістю) з метою створення базового генетичного і селекційного матеріалу для сортів саме круп'яного (крупни, пластівці) напряму використання для здорового (функціонального) харчування.

При грубому жорновому помелі зерна пшениці різного кольору на крупу й наступному провіюванні крупни від пилоподібної дрібнодисперсної фракції (борошечця) на аспіраційній колонці Paul Polikeit спостерігається подібне до райдуги нашарування борошечця різного кольору, що відповідає вихідному забарвленню розмеленого зерна (рис. 20).

Спираючись на результати власних досліджень і матеріали здебільшого іноземних публікацій, ми вважаємо, що крім твердості зерна як головного детермінанта якості зерна круп'яної пшениці і тритикале, критично важливими селекційними ознаками для пшениці і тритикале круп'яного напряму технологічного використання зерна мають бути:

- а) твердість зерна (категорія hard призначена для виробництва крупни, категорії soft та extra-soft — для виробництва пластівців);
- б) мінімальні показники хлібопекарської якості борошна;
- в) підвищений вміст у зерні розчинного білка;
- г) підвищений вміст у зерні амілози та резистентного крохмалю;

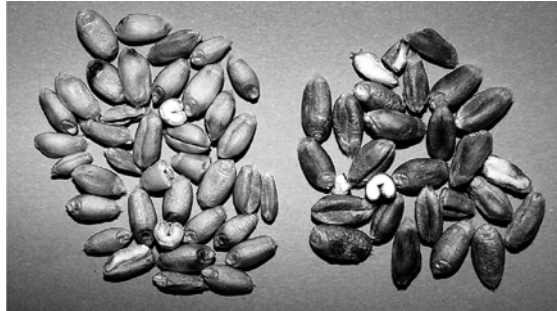


Рис. 19. Зерно пшениці сорту Skorpion (справа) голубого кольору [6]

д) підвищений вміст у зерні вітамінів і мінералів, цінних для здоров'я фітохімічних сполук з антиоксидантною активністю;

е) колір зерна білий, чорний, голубий як маркери його біологічної цінності.

За нашими даними, зерно білого і чорного кольорів надає поліпшених смакових характеристик каші. Зерно білозерної пшениці з екстрем'якозерною консистенцією ендосперму є сировиною відмінної якості для приготування такого традиційного українського ритуального продукту, як різдвяна кутя. На відміну від кути з твердої пшениці кутя з білозерної екстрем'якозерної пшениці вариться до готовності всього 40 хв без попереднього замочування, зварене зерно завжди зберігається цілим, має неперевершені фізичні і смакові характеристики.

У зерні чорного і голубого кольорів більший вміст вітамінів і мінералів, вища антиоксидантна активність, яка тісно пов'язана з підвищеною загальною біологічною цінністю зерна.

Отже, пшениця (тритикале) круп'яного напрямку використання мусить мати всі або більшість із зазначених вище характеристик, і відповідно селекційний процес створення круп'яних сортів пшениці є доволі складною селекційною технологією, спрямованою на комбінування в одному генотипі багатьох технологічних характеристик.

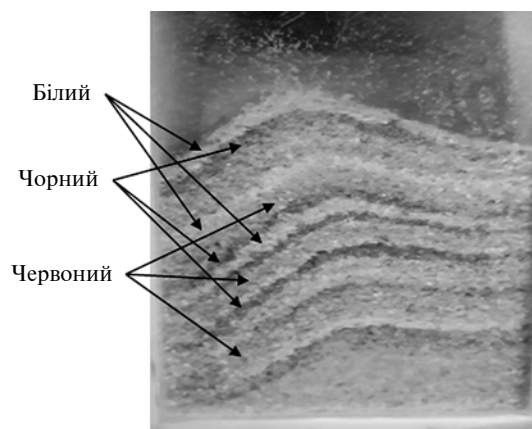


Рис. 20. Нашарування різнобарвного борошенця при провіюванні крупи із зерна різного кольору

Роботу зі створення селекційного матеріалу для сортів пшениці і тритикале круп'яного напрямку використання зерна ми ведемо на базі кількох селекційних популяцій різного рівня. Сюди ж належать і дослідження зі створення селекційних ліній чорнозерної пшениці — спельти та спельти з голубим зерном круп'яного напрямку використання. Робота зі спельтою є особливою й передбачає інтрогресію в її геном лише ознак чорного і голубого кольору зерна та максимального відтворення генотипу оригінальної спельти шляхом кількох бекросів.

Ми вже створили занесений у Держреєстр перший в Україні сорт білозерної екстрям'якозерної пшениці бісквітного напрямку використання Білява, придатний для виробництва пластівців, перший в Україні сорт чорнозерної пшениці Чорноброва, придатний для виготовлення круп. У Державному сортовипробуванні знаходиться новий сорт чорнозерної пшениці з однойменною назвою Чорнозерна, нові сорти пшениці з високою якістю зерна, а також тритикале.

На підставі отриманих нами результатів впровадження оригінального генетичного ресурсу, включно з віддаленими схрещуваннями, у селекційний процес можна дійти загальних висновків.

1. На основі віддалених схрещувань пшениці з гексаплоїдними амфіплоїдами-синтетиками можливо цілеспрямовано отримувати перспективний селекційний матеріал, цінний за зерновою продуктивністю, комплексом агрономічних і технологічних характеристик зерна і борошна.

2. Схрещування хромосомно заміщеного (5B)5D тритикале з пшеницею забезпечить отримання цінного високопродуктивного посухостійкого селекційного матеріалу тритикале з відмінною виповненістю й високою натурою зерна, великим виходом крупи при гробу жорновому помелі зерна.

3. Віддалені схрещування пшениці з гексаплоїдними амфіплоїдами-синтетиками істотно розширюють генетичну варіабельність пшениці за ознакою твердості зерна від твердозерної до екстрям'якозерної. Отриманий селекційний матеріал з різними твердістю й кольором зерна перспективний для створення нових за якістю зерна класів пшениці бісквітного і круп'яного напрямків використання.

4. Використання чужорідної генетичної плазми, екзотичної за алельною варіабельністю локусів *Gli/Glu*, оригінального генетичного матеріалу з екстраекспресією окремих субодиниць високомолекулярних глютенінів і гена *Gpc-B1*, інтрогресованого в культуру від дикорослої пшениці *T. dicoccoides*, дає цінний селекційний матеріал із високим вмістом білка в зерні, поліпшеними характеристиками хлібопекарської якості, необхідними для селекції сортів технологічних класів сильної та екстрасильної пшениці.

5. Зі створенням оригінального селекційного матеріалу за твердістю й кольором зерна (білий, чорний, голубий) ми ініціюємо появу в Україні нового напрямку селекції пшениці круп'яного використання: твердозерного для виробництва крупи і м'якозерного та екстрям'якозерного для виробництва пластівців, обидва напрями у комбінації з різним кольором зерна. Успішне втілення цієї ініціативи у практичну селекцію не лише забезпечить створення в Україні сортів

круп'яного напряму використання, а й істотно поліпшити харчову (біологічну) цінність зерна пшениці.

6. Отриманий нами унікальний генетичний і селекційний матеріал є перспективним додатком для поліпшення якості вже створених нами високопродуктивних сортів пшениці, які вперше за всю історію України забезпечили рекордні врожаї зерна на рівні 120–132 ц/га. Їх широко висівають на полях України та за її межами [39, 40].

REFERENCES

1. Official grain grading guide. Canadian Grain Commission. (2017). Chapter 4. Wheat, August, pp. 4-1-4.90.
2. Blakeney, A., Cracknell, R., Crosbie, G., Jefferies, S., Miskelly, D., O'Brien, L., Panozzo, J., Suter, D., Solah, V., Watts, T., Westcott, T. & Williams, R. (2009). Understanding Australian wheat quality. A basic introduction to Australian wheat quality. Grains research and development corporation, pp. 5-39.
3. Gwirtz, J., Willyard, M. & McFall, K. (2004). Wheat quality in the United States of America. Chapter 5. Wheat — historical perspective, pp. 17-42.
4. Ransom, J. (2015). Hard white wheat: producing North Dakota's next market opportunities. North Dakota State University, Fargo, ND, pp. 1-8.
5. Nandy, S., Chen, Q., Sun, Sh., Ahmad, F., Graf, R. & Kreliuk, G. (2008). Nutritional analyses and their inheritance properties in colored wheat seed lines from different origins using near-infrared spectroscopy. *Amer. J. Plant Sci. Biotechnology*, 2(2), pp. 74-79.
6. Martinek, P., Skorpik, M., Chrpova, J., Fucik, P. & Schweiger, J. (2013). Development of the new winter wheat variety Skorpion with blue grain. *Czech J. Genet. Plant Breed.*, 49 (2), pp. 90-94.
7. Pasha, I., Anjum, F. & Morris, C. (2010). Grain hardness: a major determinant of wheat quality. *Food Sci. Tech. Int.*, 16(6), pp. 511-522.
8. Sozinov, A., Blohin, N., Vasilenko, I., Sinitsin, S., Komarov, V., Tarasenko, N. & Kravtsova, B. (1977). Methodical recommendations as evaluated by quality of grain. Moskva: Nauchnyy sovet VASHNIL po kachestvu zerna [in Russian].
9. Rybalka, O.I. (2011). Quality of wheat and her improvement. Kyiv: Logos [in Ukrainian].
10. Pat. 65644, Device for determination of sedimentation of SDS-30, Rybalka, O. & Pokoiviy, G. (2011). Publ. 12.12.2011 [in Ukrainian].
11. Rybalka, O.I. (2010). Methods of electrophoretic analysis of glutens proteins of glutenins of wheat. *Zbirnyk naukovykh prats SGI–NTNS*, 16 (56), pp. 171-179.
12. Cox, T., Wu, J., Wang, Sh., Cai, J., Zhong, Q. & Fu, B. (2017). Comparing two approaches for introgression of germplasm from *Aegilops tauschii* into common wheat. *The Crop J.* (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).
13. Li, J., Wei, H., Hu, X. & Yang, W. (2010). Locus R-D1 conferring red-grain-color in synthetic derivative wheat Chuanmai 42 mapped with SSR markers, 1 (3), pp. 1-6.
14. Ogbonnaya, F., Abdalla, O., Mujeeb-Kazi, A., Kazi, A., Xu, S., Gosman, N., Lagudah, E., Bonnett, D., Sorrells, M., Tsujimoto, H. & Janick, J. (2013). Synthetic hexaploids: harnessing species of the primary gene pool for wheat improvement, in: (Eds.), *Plant Breeding Reviews*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 37, pp. 35-122.
15. Gill, B., Friebe, B., Raupp, W., Wilson, D., Cox, T., Sears, R., Brown-Guedira, G. & Fritz, A. (2006). Wheat Genetics Resource Center: the first 25 years. *Adv. Agron.*, 89, pp. 73-136.
16. Mujeeb-Kazi, A., Gul, A., Farooq, M., Rizwan, S. & Ahmad, I. (2008). Rebirth of synthetic hexaploids with global implications for wheat improvement, *Crop Pasture Sci.*, 59, pp. 391-398.
17. Yang, W., Liu, D., Li, J., Zhang, L., Wei, H., Hu, H., Zheng, Y., He, Z. & Zou, Y. (2009). Synthetic hexaploid wheat and its utilization for wheat genetic improvement in China. *J. Genet. Genomics*, 36, pp. 539-546.
18. Gill, B. & Raupp, W. (1987). Direct genetic transfers from *Aegilops squarrosa* L. to hexaploid wheat. *Crop Sci.*, 27, pp. 445-450.

19. Li, J., Wan, H. & Yang, W. (2014). Synthetic hexaploid wheat enhances variation and adaptive evolution of bread wheat in breeding processes. *J. Syst. Evol.*, 52, pp. 735-742.
20. Chantret, N., Salse, J., Sabot, F., Rahman, S., Bellec, A., Laubin, B., Dubois, I., Dossat, C., Sourdille, P., Joudrier, P., Gautier, M., Cattolico, L., Beckert, M., Aubourg, S., Weissenbach, J., Caboche, M., Bernard, M., Leroy, P. & Chalhoub, B. (2005). Molecular Basis of evolutionary events that shaped the Hardness locus in diploid and polyploid wheat species (*Triticum* and *Aegilops*). *Plant Cell.*, 17, pp. 1033-1045.
21. Bhave, M. & Morris, C. (2008). Molecular genetics of puroindolines and related genes: allelic diversity in wheat and other grasses. *Plant Mol. Biol.*, 66, pp. 205-219.
22. Gasparis, S., Orczyk, W. & Nadolska-Orczyk, A. (2013). Sina and Sinb genes in triticale do not determine grain hardness contrary to their orthologs Pina and Pinb in wheat. *BMC Plant Biol.*, 13, pp. 1-12.
23. Uauy, C., Distelfeld, A., Fahima, T., Blechl, A. & Dubcovsky, J. (2006). A NAC gene regulating senescence improves grain protein, zinc and iron content in wheat. *Science*, 314, pp. 1298-1301.
24. Distelfeld, A., Uauy, C., Fahima, T. & Dubcovsky, J. (2006). Physical map of the wheat high-grain protein content gene *Gpc-B1* and development of a high-throughput molecular marker. *New Phytol.*, 169, pp. 753-763.
25. Avivi, L. (1978). High protein content in wild tetraploid *Triticum dicoccoides* Korn. *Proc. 5th Int. Wheat Genet. Symp.* Ed. S. Ramanujam. Indian Soc. of Genet. and Plant Breeding, New Delhi, India, pp. 372-380.
26. Tabbita, F., Pearce, S. & Barneix, A. (2017). Breeding for increased grain protein and micronutrient content in wheat: Ten years of the *GPC-B1* gene. *J. Cereal Sci.*, 73, pp. 183-191.
27. Rybalka, O., Morgun, B. & Polischuk, S. (2018). *GPC-B1* (*NAM-B1*) gene as a new genetic resource in wheat breeding for high grain protein content and micronutrients. *Fiziol. rast. genet.*, 50, No. 4, pp. 279-298 [in Ukrainian].
28. Ma, F. & Baik, B-K. (2018). Soft wheat quality characteristics required for making baking powder biscuits. *J. Cereal Sci.*, 79, pp. 127-133.
29. Cao, S., Li, Z., Gong, C., Xu, H., Yang, R., Hao, Sh., Wang, X., Wang, D. & Zhang, X. (2014). Identification and characterization of high-molecular-weight glutenin subunits from *Agropyron intermedium*. *PLoS ONE* 9(2): e87477. Doi:10.1371/journal.pone.0087477.
30. Blechl, A. & Anderson, O. (1996). Expression of novel high-molecular-weight glutenin subunit gene in transgenic wheat. *Nature Biotechnol.*, 14, pp. 875-879.
31. Jones, J., Adams, J., Harriman, C., Miller, Ch. & Kamp, J. (2015). Nutritional impact of different whole grain milling techniques: a review of milling practice and existing data. *Cereal Food World*, 60, No. 30, pp. 130-139.
32. Eriksson, S. (2005). Acrylamide in food products: identification, formation and analytical methodology. Doctoral Thesis, Dept. of Environmental Chemistry, Stockholm University, Sweden, 83 p.
33. Acrylamide in Food (2009). Food Safety Authority of Ireland., 1, pp. 1-7.
34. Ma, D., Sun, D., Zuo, Yi., Wang, Ch., Zhu, Y. & Guo, T. (2013). Diversity of antioxidant content and its relationship to grain color and morphological characteristics in winter wheat grains. *J. Integr. Agric.*, Adv. online publ. pp.1-14, Doi: 10.1016/S2095-3119(13)60573-0.
35. Li, W., Shan, F., Sun, Sh., Corke, H. & Beta, T. (2005). Free radical scavenging properties and phenolic content of Chinese black-grained wheat. *J. Agric. Food Chem.*, 53 (22), pp. 8533-8536.
36. Kniewel, D., Abdel-Aal, E., Rabalski, I., Nakamura, T. & Hucl, P. (2009). Grain color development and the inheritance of high anthocyanin blue aleurone and purple pericarp in spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Cereal Sci.*, 50, pp. 113-120.
37. Lamy, S., Blanchette, M., Michaud-Levesque, J., Lafleur, R., Durocher, Y., Moghrabi, A., Barrette, S., Gingras, D. & Beliveau, R. (2006). Delphinidin, a dietary anthocyanidin, inhibits vascular endothelial growth factor receptor-2 phosphorylation. *Carcinogenesis*, 27, pp. 989-996.
38. Nandy, S., Chen, Q., Sun, Sh., Ahmad, F., Graf, R. & Kereliuk, G. (2008). Nutritional analyses and their inheritance properties in colored wheat seed lines from different origins using near-infrared spectroscopy. *Amer. J. Plant. Sci. Biotechnol.*, 2(2), pp. 74-79.

39. Morgun, V.V., Sanin, Y.V. & Schwartau, V.V. (2015). The club 100 centners. Kyiv: Logos [in Ukrainian].
40. Morgun, V. & Rybalka, O. (2017). Strategy of genetic improvement of cereals for the purpose of food safety, medical and preventive nutrition and needs of processing industry. Visnyk NAN Ukrainy, 3, pp. 54-64 [in Ukrainian].

Received 14.03.2019

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НОВОГО НАПРАВЛЕНИЯ СЕЛЕКЦИИ
ОРИГИНАЛЬНЫХ ПО КАЧЕСТВУ ЗЕРНА КЛАССОВ ПШЕНИЦЫ (*TRITICUM
AESTIVUM* L.) И ТРИТИКАЛЕ (\times *TRITICOSECALE* WITTMACK)

А.И. Рыбалка^{1,2}, В.В. Моргун², Б.В. Моргун^{2,3}, С.С. Полищук¹

¹Селекционно-генетический институт—Национальный центр семеноведения и сортоизучения Национальной академии аграрных наук Украины, Одесса

²Институт физиологии растений и генетики Национальной академии наук Украины, Киев

³Институт клеточной биологии и генетической инженерии Национальной академии наук Украины, Киев

В Украине мягкая пшеница *Triticum aestivum* L. представлена одним технологическим классом — твердозерная красnozерная хлебопекарная пшеница (*Hard Red Wheat*), что не соответствует требованиям технологий производства и качества мучных пищевых продуктов, каждый из которых требует сырья определенного качества. Культура тритикале в Украине вообще не имеет четко определенной ниши технологического использования. Особенно важным в формировании качества зерна является его твердость, которая служит классообразующей характеристикой. Для создания новых по качеству зерна классов пшеницы нами привлечен в селекционную практику широкий генетический ресурс: материал от отдаленных скрещиваний пшеницы с гексаплоидными амфилоидами-синтетиками, генетические системы влияющие на твердость и цвет зерна, содержание белка, его качество, физические, химические, реологические свойства крахмала и теста, хлебопекарные свойства муки. В исследовании селекционного материала пшеницы и тритикале с различной твердостью зерна обнаружена высокая позитивная коррелятивная зависимость между твердостью зерна и выходом крупы при грубом помоле. В группе белозерных образцов пшеницы выделены селекционные линии с высокой (до +40 единиц прибора Inframatic 8611) и низкой (до -58) твердостью зерна. Наилучшие по качеству хлопья получены из экстрамягкозерного белозерного материала селекционных линий пшеницы и экстрамягкозерных линий тритикале. Крупу самого высокого качества получили из зерна линий пшеницы с максимально высокой твердостью зерна. Селекционные линии тритикале имели низкую твердость зерна в отрицательном диапазоне от 0 до -45 единиц прибора Inframatic 8611. Среди линий тритикале наблюдали прямую позитивную зависимость между твердостью зерна и выходом крупы грубого помола. Несмотря на низкую твердость зерна, среди материала тритикале обнаружены линии с довольно высоким выходом крупы (до 89 %). Между показателями твердости зерна и характеристиками хлебопекарного качества, а также индексом седиментации муки SDS-30К пшеницы существует прямая позитивная зависимость. Наблюдали сильное положительное влияние гена *Gpc-B1* и экстра-экспрессии субъединиц высокомолекулярных глютеинов *Glu-A1x2**, *Glu-D1x5* на твердость зерна, содержание белка в зерне и его качество. В опытах изучены крупяные характеристики образцов пшеницы с разным цветом зерна: красным, белым, черным и голубым. На основании полученных данных обосновано новое направление селекции пшеницы и тритикале крупяного (крупы, хлопья) использования.

Ключевые слова: пшеница, селекция, тритикале, твердость зерна, хлебопекарное качество, содержание белка, цвет зерна, крупа.

GENETIC BACKGROUND FOR BREEDING OF NEW QUALITY CLASSES OF WHEAT (*TRITICUM AESTIVUM* L.) AND TRITICALE (\times *TRITICOSECALE* WITTMACK)

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

¹Plant Breeding and Genetics Institute—National Center of Seed and Cultivars Investigation, National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine
3 Ovidiopolska Road, 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 Zabolotnogo St., Kyiv, 03143, Ukraine

In Ukraine today bread wheat *Triticum aestivum* L. is presented just with one class only — hard red bread wheat (*Hard Red Wheat*) that doesn't correspond to industrial technology requirements for variety of wheat flour products and their consuming quality each one of those requires particular wheat grain quality. Triticale crop in Ukraine have no clearly defined technological end-use. Particular importance in wheat quality plays grain hardness that is the main wheat grain quality class determinant. For development of new wheat grain quality classes we use in our breeding program the following wide genetic resources: interspecific crosses of cultivated wheat with hexaploid amphiploid-synthetics, genes for grain hardness and caryopsis color determination, genes regulating of grain protein content and protein quality, physical, biochemical, rheology of starch and dough, flour bread-making properties. In the studies of experimental material of wheat and triticale with different grain hardness high positive correlation between grain hardness and minimally processed grouts extraction was found. Within white grain wheat samples group several advanced breeding lines with extra-hard (+40 Inframatic 8611 units) and extra-soft (up to –58) grain hardness were isolated. The best flakes quality from extra-soft textured white grain wheat and soft/extra-soft textured triticale breeding lines were processed. The best quality grouts produced wheat breeding material with high grain hardness. Winter triticale breeding lines showed soft and extra-soft grain hardness in the negative range (0 to –45 Inframatic 8611 units). Within advanced winter triticale breeding lines high positive correlation between grain hardness and minimally processed grouts extraction was observed. In spite of low grain hardness among winter triticale breeding lines samples with high grouts extractions (up to 89 %) were isolated. Grain hardness also showed high positive correlation with bread-making characteristics and sedimentation SDS-30A index of wheat flour. Strong positive influence of gene *Gpc-B1* as well as high-molecular-weight glutenin subunits *Glu-A1x2** and *Glu-D1x5* extra-expression on grain hardness, grain protein content and its quality were observed. Grout extraction of wheat samples with different grain color such as red, white, black and blue were evaluated. On the base of data obtained the new breeding strategy of wheat and triticale for grouts/flakes end-use was proposed and discussed.

Key words: wheat, triticale, breeding, grain hardness, bread-making, protein content, grain color, grouts.