

РИБАЛКА

Олександр Ілліч — член-кореспондент НАН України, завідувач відділу генетичних основ селекції Селекційно-генетичного інституту — Національного центру насіннєзнавства та сортовивчення НААН, старший науковий співробітник відділу генетичного поліпшення рослин Інституту фізіології рослин і генетики НАН України

МОРГУН

Володимир Васильович — академік НАН України, радник при дирекції Інституту фізіології рослин і генетики НАН України

МОРГУН

Богдан Володимирович — член-кореспондент НАН України, заступник директора з наукової роботи Інституту клітинної біології та генетичної інженерії НАН України, директор Дослідного сільськогосподарського виробництва Інституту фізіології рослин і генетики НАН України

ПОЛЩУК

Сергій Сергійович — кандидат сільськогосподарських наук, провідний науковий співробітник відділу генетичних основ селекції Селекційно-генетичного інституту — Національного центру насіннєзнавства та сортовивчення НААН

ВПЕРШЕ ЗА ТИСЯЧІ РОКІВ: КОЛЬОРОВЕ ЗЕРНО ЗЛАКІВ ЯК ФУНКЦІОНАЛЬНА ЇЖА МАЙБУТНЬОГО

Статтю присвячено новому для України напрямку селекції пшениці й голозерного ячменю з кольоровим зерном для підвищення харчової цінності цих культур. Чорний, синій і фіолетовий колір зерна злаків зумовлюють антоціаніни і фітомеланіни з групи рослинних флавоноїдів, а жовтий колір ендосперму — каротиноїди з групи тетратерпеноїдів. Ці пігменти мають високу антиоксидантну активність і можуть забезпечити харчову профілактику таких тяжких захворювань, як серцево-судинні патології, цукровий діабет, деякі форми раку тощо. Створені авторами статті унікальні сорти чорнозерної пшениці та голозерного ячменю з кольоровим зерном внесено до Державного реєстру і наразі впроваджуються в промислове виробництво.

Ключові слова: кольорове зерно, пшениця, ячмінь голозерний, антоціаніни, каротиноїди, антиоксиданти, харчовий функціонал.

Наразі серед відомих мені круп найсмачнішими й найкориснішими за харчовою цінністю є крупи із сортів чорнозерного ячменю та інших злаків, створених талановитим генетиком О. Рибалкою. Варто прискорити появу виробів із чорнозерних злаків на прилавках наших магазинів.

Академік НАН України В. Моргун

Біоактивні рослинні пігменти, такі як антоціаніни, фітомеланіни і каротиноїди, зумовлюють забарвлення овочів, фруктів, різних плодів і квітів та належать до групи потужних антиоксидантів. А як відомо, антиоксидантна активність компонентів нашої їжі є одним із найважливіших факторів біологічної цінності харчових продуктів [1, 2].

Згідно з результатами численних клінічних досліджень, рослинні пігменти-антиоксиданти здатні ефективно знешкоджувати (нейтралізувати) деструктивні вільні радикали, знижуючи тим самим ризик появи небезпечних захворювань, пов'язаних з оксидативним стресом, таких як рак, серцево-судинні та нейродегенеративні патології, гіпертонія, запалення органів, ожиріння. Крім того, рослинні антиоксиданти сповільнюють старіння і захищають організм від руйнівного УФ-випромінювання [3].

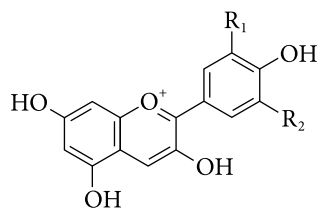


Рис. 1. Базова молекулярна структура антоціанінів [4]

	R ₁	R ₂
Pelargonidin	H	H
Cyanidin	OH	H
Delphinidin	OH	OH
Malvidin	OCH ₃	OCH ₃
Peonidin	OCH ₃	H
Petunidin	OCH ₃	OH

Антоціаніни є найпоширенішими в рослинному царстві природними водорозчинними пігментами-антиоксидантами, критично важливими для здорового харчування. Ці пігменти відповідають за червоний, фіолетовий, синій, помаранчевий кольори та інші відтінки забарвлення різних рослинних органів, тканин, плодів.

Антоціаніни належать до сімейства флавоноїдів, які в свою чергу є частиною ще більшої групи біологічно активних поліфенольних сполук. За особливостями молекулярної структури антоціаніни становлять клас глікозидів і мають складний молекулярний скелет у формі В-кільця (B-ring) з боковими метильними та гідроксильними групами (рис. 1).

Найбільш поширені в рослинному царстві шість антоціанінів: ціанідин (*cyanidin*), дельфінідин (*delphinidin*), мальвідин (*malvidin*), пеларгонідин (*pelargonidin*), петунідин (*petunidin*) та піонідин (*peonidin*) (рис. 1). Нескладно помітити, що назви антоціанінів походять від назв відповідних квітів, згідно з їхнім кольором. Залежно від позиції гідроксильної групи у В-кільці основні антоціаніни поділяють на пеларгонідини (4'-ОН), які визначають червону/оранжеву пігментацію, ціанідини (3'4'-ОН) — темно-червону пігментацію і дельфінідини (3'4'5'-ОН) — фіолетову/синю пігментацію [5, 6].

На сьогодні антиоксидантну дію антоціанінів вивчено досить добре, в сотнях наукових статей та оглядів [4—9] розглянуто й проана-

лізовано результати досліджень, які свідчать про їх позитивний вплив як функціональних інгредієнтів їжі на організми різних біологічних об'єктів, зокрема й людини. У статті ми акцентуємо увагу лише на найбільш важливих положеннях цих досліджень.

Біодоступність, тобто частка перетравлених, всмоктаних кишечником і метаболізованих антоціанінів, є дуже високою. Більшість досліджень вказують на те, що біоабсорбція (засвоєння) антоціанінів кишечником відбувається досить швидко — протягом 0,25—1,5 год [10].

Антиокисний ефект, тобто дія антоціанінів з нейтралізації вільних радикалів (ROS, RNS), — це реальний механізм зниження ризику захворювань, особливо хронічних, таких як коронарна хвороба серця, деякі види раку [11]. Антоціаніни за своїми антиоксидантними властивостями перевершують такі добре відомі антиоксиданти, як бутил-гідроксианізол (BHA), альфа-токоферол, тролокс, катехін і кверцетин [12]. Антиоксидантний ефект антоціанінів пов'язаний з їхньою спроможністю нейтралізувати вільні радикали, радикал-катіони, пригнічувати окиснення ліпідів, зокрема ліпопротеїдів низької щільності (LDL), а також окиснення метил-лінолеату (MeLo) та жирів. Серед антоціанінів найвищу антиоксидантну активність проявляють дельфінідин, ціанідин, ціанідин-3-глюкозид, які є активнішими за згадані вище антиоксиданти та аскорбінову кислоту [13].

Інгібування окиснення ліпопротеїдів низької щільності (LDL) людини. LDL в неокисненому стані не утворюють атеросклеротичних бляшок, які спричиняють тяжкі патології серцево-судинної системи і призводять до смерті. Тому вживання антоціанінів сприяє зниженню ризику серцево-судинних патологій, особливо атеросклерозу [14].

Зниження вмісту ліпідів та окисдаивний стрес. Однією з причин розвитку цукрового діабету 2-го типу є синдром стійкості до інсуліну, зумовлений підвищеним рівнем тригліцеридів у крові (гіпертригліцеридемія). Антоціаніни протидіють розвитку цього синдрому, сприяю-

чи зниженню вмісту в крові LDL тригліцеридів та блокуючи ранні запальні процеси в жировій тканині. Тому вони є превентивним харчовим фактором розвитку цукрового діабету 2-го типу [15, 16]. Як ефективні антиоксиданти антоціаніни захищають бета-клітини підшлункової залози, які продукують інсулін, від індукованого глюкозою крові оксидативного стресу, усуваючи тим самим одну з важливих причин діабету 2-го типу [17].

Антиканцерогенний ефект. Серед багатьох відомих хемопревентивних агентів проти раку антоціаніни потенційно є найбільш цінними, оскільки вони здатні впливати на диференціацію та апоптоз (генетично програмоване знищення) ракових клітин. Було показано роль антоціанінів як агентів-інгібіторів ангиогенезу — утворення нових судин у ракових пухлинах, припинення якого приводить до блокування доступу кисню і поживних речовин до злоякісної пухлини та унеможливує міграцію ракових клітин (метастази) в інші органи тіла [18, 19].

Здоров'я очей і якість зору. Позитивний вплив антоціанінів на якість зору був одним із перших виявлених ефектів, пов'язаних із цими рослинними пігментами [20]. Порівнюючи вміст антоціанінів у тканинах печінки, мозку та очей, було показано, що саме в тканинах ока їхній вміст був найвищим (до 700 пкг/г сирової маси) [21]. Причому антоціаніни настільки ефективно проникають у різні тканини й органи, що навіть здатні долати гематоенцефалічний бар'єр кров'яного русла. Суть позитивного впливу антоціанінів на якість зору полягає в їхній спроможності пригнічувати фотоокиснення піридиндизретиноїду A2E через інгібування синглетного кисню та запобігати розвитку залежної від віку макулярної деградації сітківки, яка починається з руйнування пігменту епітеліальних клітин сітківки й дегенерації клітин, що містять фоторецептори [22].

Вище перелічено далеко не всі досліджені позитивні впливи антоціанінів на здоров'я різних біологічних організмів, зокрема й людини. Крім зазначеного, вони здатні пригнічувати запальні процеси, захищати епітелій кишечника, в тому числі й від етанол-індукованого ушко-

дження, інгібувати агрегацію тромбоцитів, забезпечувати протирадіаційний захист біологічних об'єктів тощо [23—25].

Останнім часом, з поширенням серед населення інформації про користь для здоров'я антоціанінів, значно побільшало прикладів використання антоціанінвмісної рослинної сировини для виготовлення різноманітних харчових продуктів із функціональним статусом, таких як брендові продукти зі злаків, ферментовані напої, продукти дитячого харчування, молочні продукти тощо [26, 27].

Характеризуючи пігменти-антиоксиданти, не можна хоча б мимохідь не згадати про каротиноїди, які зумовлюють жовтий колір борошна пшениці і мають таке ж важливе функціональне значення, як і антоціаніни. Досить сказати, що каротиноїд атаксантин є найпотужнішим антиоксидантом серед усіх нині відомих [28]. Жовтий колір ендосперму пшениці контролюють два головні локуси *Psy1* і *Psy2*, локалізовані на хромосомах гомологічних груп 7 і 5 [29]. Ці локуси контролюють біосинтез каротиноїдів через ключовий фермент фітоен-синтазу. Найбільш дослідженими локусами є *Psy1-A1(7AL)*, *Psy1-B1(7BL)*, *Psy1-D1(7DL)*, *Psy2-A1(5A)*, *Psy2-B1(5B)* [30].

На відміну від овочів і фруктів, злаки не є типовим джерелом антоціанінів. Однак зерно злаків і продукти його переробки — це товари щоденного масового вжитку для населення земної кулі. Тому злаки з кольоровим зерном (синім, фіолетовим і, особливо, чорним), зважаючи на їхню високу біологічну цінність, насамперед такі як рис, пшениця і ячмінь, останнім часом приваблюють і споживачів, і переробників зерна, і виробників продуктів функціонального харчування, і селекціонерів у багатьох країнах світу, передусім у Китаї, Індії, США, Канаді, Австралії, Австрії, Чехії, Японії, Кореї [31]. Селекція сортів пшениці і ячменю з кольоровим зерном набуває нині ознак світового тренду. Наприклад, у Китаї та Індії використання кольорових сортів пшениці у хлібопекарській промисловості постійно зростає, і вони поступово починають витісняти звичайні комерційні сорти [32].

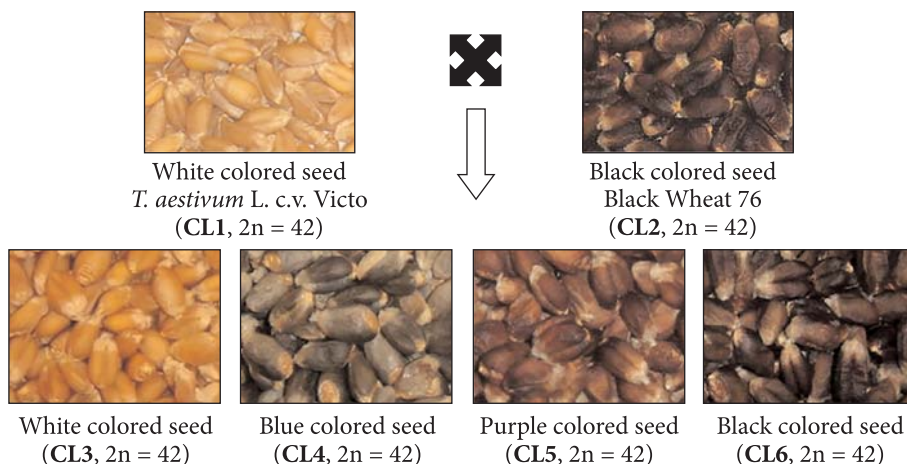


Рис. 2. Зразки кольорового зерна пшениці з Канади: CL1, CL3 — біле; CL2, CL6 — чорне; CL4 — синє; CL5 — фіолетове [34]

Рис. 3. Зразки кольорового зерна ячменю з Південної Кореї: 1 — жовте плівчасте; 2, 3, 6 — чорне плівчасте; 4 — чорне голе; 5 — фіолетове плівчасте; 7 — синє голе; 8 — фіолетове голе [35]



Поширення харчових злаків з кольоровим зерном як джерела нутрієнтів, нестача яких у харчуванні пов'язана з розвитком багатьох хвороб, фахівці розглядають сьогодні як складову світової стратегії біофортificaції зерна за вмістом ключових харчових інгредієнтів і створення на цій основі унікальних продуктів функціонального харчування. Ця стратегія навіть здобула спеціальну назву — «**друга зелена революція**» [33].

Наведемо кілька прикладів кольорового зерна пшениці і ячменю. На рис. 2 як типовий приклад показано зразки кольорового зерна (чорне, фіолетове, синє) пшениці з Канади. Добре видно, що чорне зерно пшениці має інтенсивну пігментацію, тоді як фіолетове зерно виглядає

дещо світлішим. Синє зерно пшениці забарвлене пігментом блакитного кольору.

На рис. 3 наведено зразки кольорового зерна ячменю з Південної Кореї. Чорний, фіолетовий і синій кольори зерна особливо чітко виражені в голозерного ячменю, тоді як у плівчастого зерна пігментація маскується плівкою, залежно від товщини якої змінюється інтенсивність видимого забарвлення.

Колір зерна як пшениці, так і ячменю має доволі складну генетичну детермінацію, тому системна селекційна робота зі створення сортів із кольоровим зерном практично не можлива без чіткого уявлення про генетику цієї ознаки. У звичайної червонозерної пшениці (майже всі зареєстровані в Україні сорти пшениці — саме

червонозерні) червоний колір зерна контролюється одним, двома або трьома доміантними алелями: *R-A1b* (хромосома 3AL), *R-B1b* (хромосома 3BL) та *RD1b* (хромосома 3DL). Червона пігментація зерна зумовлена фенольними сполуками, насамперед танінами, які надають зерну гіркуватий присмак та позитивно асоційовані зі стійкістю зерна до передзбирального проростання. Відповідно, відсутність червоного забарвлення (білий колір зерна) контролюється набором із трьох рецесивних алелів: *R-A1a*, *R-B1a* та *RD1a*. Пшениця з білим зерном (потрійний рецесив) має м'який «солодкуватий» присмак, без властивої червоному зерну гіркоти, але менш стійка до передзбирального проростання, ніж червонозерна пшениця [36].

Анатомічно біосинтез пігментів антоціанінів фіолетового забарвлення локалізовано в оболонці (перикарпі) зерна, тоді як пігменти з синім забарвленням синтезуються в клітинах алейронового шару, розміщеного безпосередньо під зерновою оболонкою. Генетично біосинтез пігментів фіолетового і синього забарвлення — це незалежні системи, а отже, вони можуть легко комбінуватися в одному генотипі. Гени, що кодують синє забарвлення, позначають символом *Ba* (*blue aleurone*), тоді як гени для фіолетового кольору — символом *Pp* (*purple pericarp*). Клітини оболонки зерна мають диплоїдний набір хромосом ($2n = 42$), тому успадкування фіолетового забарвлення відбувається за материнським типом: колір *PpPp* гомозиготи чи гетерозиготи визначається генотипом материнської рослини, тоді як успадкування синього забарвлення має більш складний прояв, оскільки залежить від ефекту триплоїдного набору хромосом ($3n = 63$) клітин алейронового шару. Отже, гетерозигота за генами *Ba* проявлятиме ксенійність, тобто на одній рослині і в одному й тому самому колосі виявляються як сині, так і червоні (чи білі) зерна, залежно від батьківських наборів генів (рис. 4) [33].

Слід наголосити, що культурна пшениця за кілька тисяч років свого існування ніколи не мала синього, фіолетового і чорного кольорів зерна, а гени, які кодують біосинтез



Рис. 4. Ксенійність: різнобарвні зернівки в одному колосі пшениці [33]

відповідних антоціанінів, інтрогресовано в геном культурної пшениці шляхом віддаленої гібридизації виключно від дикорослих видів-донорів.

Так, фіолетовий колір зерна перенесено до культурної пшениці від дикорослої тетраплоїдної пшениці *Abyssinian wheat* походженням з Ефіопії (*Triticum aethiopicum*). Генетичний контроль фіолетового забарвлення кодується щонайменше трьома відомими нині доміантними генами: геном *Pp-1*, який локалізований у хромосомі 7BL і позначається як *Pp-B1* (7B *T. durum*, 7S *Ae. speltoides*); геном *Pp-D1*, локалізованим у хромосомі 7D (*T. aestivum*), і геном *Pp3*, локалізованим у хромосомі 2A. Таким чином, для прояву фіолетового забарвлення необхідні два комплементуючі фактори в геномах: A і B або A і D. Навіть якщо два гени *Pp-B1* і *Pp-D1* є доміантними, в присутності рецесивного алеля *Pp3* фіолетовий колір зерна не проявиться. Отже, ознака «фіолетовий перикарп» експресується лише на гексаплоїдному (AABBDD, $2n = 6x = 42$) і аж ніяк не на тетраплоїдному (AABB, $2n = 4x = 28$) рівні плоїдності.

Синій колір зерна інтрогресовано в геном культурної пшениці від дикорослої пшениці однозернянки *T. boeoticum* та кількох видів пирію: *Ag. trichophorum*, *Ag. glaucum*, *Ag. elongatum*. Доміантний ген *Ba1* локалізовано в хромосомі 4AgL *Ag. elongatum*. Ген із неповним домінуванням *Ba2* локалізовано в хромосомі 4A *T. monococcum*/*T. boeoticum*. Доміантний ген *Ba(c)* зосереджено в хромосомі 4J *Th. bessarebicum*, а ген *Ba(d)* — в хромосомі 4E *Th. elongatum*.

gatum/Th. ponticum. Однак молекулярний механізм утворення синього забарвлення алейрону поки що до кінця не вивчено.

Отже, генетичний контроль і прояв ознак фіолетового і синього зерна досить непростий, що значно ускладнює сам процес селекції [37].

Сьогодні світова селекція вже активно створює нові сорти пшениці з кольоровим зерном. Лідером у створенні сортів пшениці з чорним і фіолетовим зерном є Китай, де зареєстровано вже кілька десятків сортів чорнозерної пшениці. Серед них найбільш відомими є такі сорти, як Heibaoshi 1, Hedongwumai 526, Luozhen 1, Heilixiaomai 1, Heilixiaomai 76, Gaoyoan 115, Huanpu 1, Zhouheimai 1, Shandongzimai 1 [38]. Кілька сортів пшениці з фіолетовим зерном районовано в Австралії. Відомо також кілька сортів пшениці з синім зерном, створених у різних країнах світу. Це сорт Tschermaкс Blaukörniger Sommerweizen, Blue CI 12025 (США), сорт Skorpion (Чехія, Австрія), сорт Sebesta Blue, лінія UC66049 і сорт Thatcher Blue (США), сорт Xiao Yan (Китай).

При створенні цих сортів пшениці часто використовували генетичні джерела, отримані віддаленою гібридизацією. Синє забарвлення алейронового шару деяких із цих сортів зумовлене присутністю в ньому антоціанінів, біосинтез яких контролюється двома генами: *Ba1* та *Ba2*. Ген *Ba1* локалізовано в довгому плечі хромосоми 4B (4BS-4eL₂), яке повністю перенесено в хромосому 4B пшениці від пирію *Thinopyrum ponticum* Rodr. (синонім *Agropyron elongatum*) у результаті робертсонівської хромосомної транслокації [39]. Ген *Ba2* розміщено в довгому плечі хромосоми 4A^m дикорослої пшениці-однозернянки *Triticum monocossum* L., перенесеної від цього виду в хромосому 4A пшениці [40]. Синє зерно таких сортів пшениці має високий вміст антоціаніну дельфінін-3-глюкозиду (*delphinine-3-glucoside*) та незначну кількість дельфінін-3-рутинозиду (*delphinine-3-rutinoside*), ціанідін-3-глюкозиду (*cyanidin-3-glucoside*) і 3-ціанідін рутинозиду (*3-cyanidin rutinoside*) [41].

Найбільш відомими джерелами синього кольору зерна, які активно використовують у селекції культурної пшениці, є такі дикорос-

лі види як *T. boeoticum*, *Agropyron glaucum*, *A. trichophorum*, *A. elongatum* [42]. Кілька європейських сортів гексаплоїдної пшениці — Berlin, Probstdorf, Tschermak, Weihestephan — отримали синій колір зерна завдяки повному заміщенню хромосоми 4A на чужинну хромосому, тоді як сорти із синім зерном Brunn і Moskau несуть чужинне заміщення хромосоми 4B. Причому обидві хромосоми — 4A і 4B — у цих сортів заміщено на чужинну хромосому 4A від *T. boeoticum* або *T. monocossum*. Однак у китайського сорту пшениці Xiao Yan синій колір зерна є результатом заміщення хромосоми 4D на гомеологічну хромосому *A. elongatum* [38]. Кілька сортів пшениці несуть гени, що контролюють синє забарвлення алейронового шару (*Ba*), від таких дикорослих видів, як *Th. ponticum* (*Ba1*), *T. monocossum* (*Ba2*), *T. boeoticum* (*Ba2*), *Th. bucranium* (*BaThb*) [39, 40, 43, 44].

Як генетичний контроль, так і біосинтез антоціанінів наразі доволі добре досліджено. Пігментація зерна пшениці починає проявлятися вже на 21—25-й день після виколювання, а максимальна концентрація пігментів спостерігається в середині фази формування зернівки. Пігмент дельфінін визначає синій колір зернівки, пеларгонін — червоний, ціанідін — фіолетовий. Чорний колір зернівки пшениці є результатом комбінування ефектів антоціанінових генів у перикарпі та алейроновому шарі [45, 46].

На сьогодні відомо багато селекційно орієнтованих досліджень, спрямованих на створення сортів кольорової пшениці, і розглянути всі їх у цій статті, звісно, неможливо, однак на деякі фундаментальні праці варто звернути особливу увагу. Наприклад, важливим є дослідження індійських авторів з Національного агробіотехнологічного інституту (NABI, Індія, штат Пенджаб) [46], метою якого було перенесення в масштабі повноцінної селекційної програми генів синього, фіолетового і чорного кольору зерна від різних джерел в елітні сорти пшениці індійської селекції. В результаті було створено перспективні селекційні лінії пшениці з кольоровим зерном, які хоча й дещо поступаються вихідним сортам за врожайністю, але відповідають стандартам за комплексом

інших агрономічно цінних ознак, а за вмістом антоціанінів і цинку значно перевершують звичайні сорти. Найвищий вміст антоціанінів було зафіксовано у селекційних ліній з чорним зерном, дещо менший — у ліній з синім зерном, і ще менший — у ліній з фіолетовим зерном. З використанням сучасного методу мас-спектрометрії TOF-MS і TOF-MS/MS у ліній із чорним зерном було ідентифіковано 26 індивідуальних антоціанінів, у ліній із синім зерном — 22, а у ліній із фіолетовим зерном — 23 антоціаніни [46].

Кольорові пшениці в Індії стали настільки популярними, що найвідоміше індійське бізнес-видання «The Economic Times» опублікувало резонансну статтю «Наскільки фіолетовий мій роті»¹ (roti (roti) — найпопулярніший в Індії різновид плоского хліба, частину якого вже випікають із чорнозерної пшениці). Публікацію було присвячено обговоренню результатів досліджень, проведених у кількох наукових центрах, щодо користі кольорових пшениць. У статті також йшлося про стрімке зростання площі посівів сортів кольорової пшениці, встановлення преміум-цін на таке зерно і наведено прогноз, що в перспективі левова частка всіх вирощуваних в Індії сортів пшениці (якщо не всі) будуть з кольоровим зерном.

Ячмінь має подібні до пшениці типи пігментації зерна за участі тих самих антоціанінів. Особливості метаболізму антоціанінів, їх генетичний контроль і біологічну цінність кольорового зерна ячменю на сьогодні також доволі добре вивчено. Встановлено, що антиоксидантна активність антоціанінів ячменю вища за антиоксидантну активність популярних вітамінів С і Е [47].

Незважаючи на те, що геном ячменю, як диплоїда, «простіший» за геном гексаплоїдної пшениці, генетичний базис, наприклад, синього забарвлення зерна ячменю є складнішим за генетичний базис цієї ознаки у пшениці. Сине забарвлення алеїрону ячменю контролюється щонайменше п'ятьма комплементарно домінантними локусами, з яких три тісно зчеплені і

зосереджені на хромосомі 4HL (*Blx1*, *Blx3*, *Blx4*) і два — на хромосомі 7HL (*Blx2*, *Blx5*) [48, 49]. У локусі *Blx1* ячменю ідентифіковано тригенний кластер MbHF35, що займає на хромосомі 4HL інтервал у ~1,13 млн пар нуклеотидів і містить гени *HvMYB4H*, *HvMYC4H* та *HvF35H*. У подібному генетичному базисі домінантного локусу *Ba1* у пшениці ідентифіковано такі самі ортологічні гени: *TaMYB4H*, *TaMYC4H* та *TaF35H* [46].

Експресія синього забарвлення в ячменю може контролюватися всього одним домінантним геном, а може двома домінантними генами з комплементарним ефектом, коли сине забарвлення проявляється лише в разі одночасної присутності обох домінантних генів в одному й тому самому генотипі. При цьому кожний домінантний алель окремо не приводить до появи синього пігменту в алеїроновому шарі зернівки. У триплоїдному алеїроновому шарі зернівок F_2 рослини покоління F_1 в одному й тому самому колосі спостерігається ксенійність.

Крім наявності генів синього кольору, зерно ячменю містить пігменти меланінової природи, що надають йому фіолетового і чорного забарвлення. Фіолетову пігментацію ячменю контролює ген *Ant2*, локалізований на хромосомі 2HL, та нещодавно ідентифікований ген *Ant1* зі слабкою експресією на хромосомі 7HS. Причому залежно від генетичної основи, що контролює фіолетове забарвлення перикарпу зернівки, кількісний вміст антоціанінів у зерні ячменю може істотно різнитися. Подібно до пшениці, успадкування чорного і фіолетового кольорів зерна ячменю супроводжується материнським ефектом прояву відповідних генів у рослин F_1 , що свідчить про локалізацію експресії генів чорного й фіолетового забарвлення в диплоїдній тканині зернової оболонки [50].

Чорний колір перикарпу зернівки та зернової плівки ячменю контролює ген *Blp* (*black lemma pericarp*), розміщений на хромосомі 1HL [51]. Причому чорна пігментація зернівки проявляється завдяки наявності в клітинах перикарпу переважно меланінподібних пігментів [52]. «Рослинні меланіни» — це загальний термін на позначення групи високомолекулярних

¹ Sharma Sh. How purple is my roti. *The Economic Times*. 02.08.2019.

чорно-коричневих пігментів як нерегулярних полімерних молекул, що утворюються внаслідок окиснення й полімеризації фенольних сполук. Незважаючи на те, що чорна пігментація зернівки ячменю є дуже важливою агрономічною ознакою, пов'язаною зі стійкістю рослин ячменю до стресових факторів середовища і грибних інфекцій, шляхи біосинтезу чорних пігментів зерна ячменю й досі вивчено недостатньо. Деякі дослідники вважають, що чорний колір зерна ячменю є результатом присутності меланінподібних пігментів у суміші з антоціанінами та іншими копігментами, які становлять значну частку в загальному вмісті фенольних сполук у зернівці ячменю [35, 53].

Отже, на сьогодні злаки з кольоровим зерном уже не екзотика, а потужний світовий тренд біотехнологічних, клінічних, технологічних, генетичних і селекційних досліджень. З аналізу публікацій за цим напрямом можна зробити висновок, що в цій сфері досліджень працюють щонайменше 60 провідних наукових центрів у 16 країнах світу [37].

В Україні поки що в широкому асортименті практично немає сортів пшениці чи харчового ячменю з кольоровим зерном, і, відповідно, на харчовому ринку дуже мало пропозицій функціональних продуктів повсякденного споживання, виготовлених із кольорового зерна, а населення України (як, до речі, і наукова спільнота) мало поінформоване про високу біологічну цінність таких продуктів.

Наш науковий колектив першим в Україні ініціював програму створення й дослідження сортів пшениці та ячменю з кольоровим зерном. Ми вперше в Україні створили сорти озимої пшениці і пшениці-спельти з фіолетовим зерном, які вже внесено до Державного реєстру сортів рослин. Тому завданням цієї публікації є, зокрема, огляд основних інформаційних матеріалів щодо створених нами сортів пшениці і харчового голозерного ячменю з кольоровим зерном як унікальної сировини для виготовлення нових продуктів функціонального харчування для продовольчого ринку України.

Перші наші селекційні програми зі створення сортів пшениці Чорноброва і Чорнозерна

з кольоровим зерном ми почали з комбінації схрещування сорту (♀) Куяльник (СГІ-НЦНС НААН України) із китайським сортом Donghei 10 з чорним зерном. У результаті з популяції було отримано продуктивну селекційну лінію з темно-фіолетовим зерном, що дала початок сорту Чорноброва, який у 2014 р. було внесено до Державного реєстру сортів рослин, придатних для поширення в Україні. З популяції від схрещування сорту (♀) Чорноброва з лінією пшениці з хромосомно-інженерною транслокацією 1RSm.1BL було дібрано перспективну селекційну лінію, яка згодом стала сортом Чорнозерна (внесений до Державного реєстру сортів рослин у 2018 р.). Вміст пігментів антоціанінів у зерні цих сортів становить 50–60 мг/кг. Нові сорти характеризуються середніми значеннями показників хлібопекарської якості (вміст протеїну в зерні 12–13 %, «сила» борошна W — 180–200 о. а.), але це мінімальний рівень якості, необхідний для випікання продуктів із цільнозернового борошна.

Особливо слід наголосити на тому, що будь-які продукти з сортів пшениці з кольоровим зерном задля максимального збереження високого харчового функціоналу такого зерна мають виготовлятися виключно і безальтернативно з цільнозернового борошна, оскільки пігменти антоціаніни з високою антиоксидантною активністю локалізовані саме в оболонці (перикарпі) та алейроновому шарі зернівки і при помелі кольорового зерна у біле рафіноване борошно вони практично повністю відходять у висівки і втрачаються. Саме тому сорти пшениці з кольоровим зерном повинні мати якомога вищі характеристики хлібопекарської якості.

З огляду на це в нашій програмі схрещувань з джерелами кольорового зерна було задіяно різноманітний генетичний матеріал високої і екстрависокої хлібопекарської якості. Зокрема, для схрещування брали матеріал з екстрависокою хлібопекарською якістю, рівень якої детермінується екстраекспресією окремих алелів, особливо *Glu-1* локусу, що кодує біосинтез високомолекулярних глютенінів. Важливим джерелом високої якості в нашій програмі

схрещувань був матеріал з геном *Gpc-B1* походженням від *T. turgidum* var. *dicoccoides*, здатний істотно (до 2 %) підвищувати вміст протеїну в зерні. До програми схрещувань було також включено багато сортів іноземної селекції, які крім високої продуктивності й стійкості до захворювань характеризуються високим рівнем хлібопекарської якості. Програму схрещувань було спрямовано на створення сортів як хлібопекарського, так і бісквітного напрямку, щоб сорти пшениці з кольоровим зерном можна було використовувати не лише для випікання хліба, а й для виготовлення якісних борошняних бісквітних виробів. Важливою особливістю сортів пшениці з кольоровим зерном є те, що вони мають підвищений вміст у зерні ключових мінералів: заліза, цинку, марганцю, вітамінів, насамперед групи В.

Наступний етап нашої селекційної програми був пов'язаний зі створенням пшениці-спельти з темно-коричневим (чорним) зерном. Пшениця-спельта (*Triticum aestivum* ssp. *spelta* L.) є плівчастим різновидом м'якої пшениці (*T. aestivum* L.) і має такий самий гексаплоїдний набір хромосом (AABBDD, $6x = 2n = 42$). Спельта належить до групи так званих древніх пшениць, а її зерно тісно окутане жорсткою плівкою, морфологічні особливості якої контролюються мутаціями у двох локусах.

Пшениця-спельта має цілу низку привабливих харчових характеристик і перевершує за харчовою цінністю зерна сучасні сорти хлібопекарської пшениці. Хліб із борошна спельти по праву називають здоровим і більш натуральним, ніж хліб із борошна сучасних сортів пшениці. Зерно спельти містить більше загального і розчинного (засвоюваного) протеїну, цінних ліпідів, важливих мінералів (Mg, P, Fe, Cu, Zn) та розчинної дієтичної клітковини, ніж сучасні сорти пшениці. Спельта має у 8–10 разів вищий вміст резистентного крохмалю, подібного за властивостями до розчинної дієтичної клітковини, характеризується досить високим потенціалом адаптації до умов вирощування і добре придатна для органічного землеробства. Тому й не дивно, що останніми роками площі посівів спельти у світі істотно зросли.

Разом з тим, спельта є природною дикорослою пшеницею, якої не торкнулася сучасна селекція, а питання щодо її поліпшення селекційним шляхом є доволі проблематичним. Відповіді на нього ми поки не знайшли в доступній нам науковій літературі. Не знайшли також і жодного свідчення про існування сортів спельти з кольоровим зерном, і наше завдання полягає саме в тому, щоб створити таку пшеницю-спельту.

Головною передумовою для досягнення поставленої нами мети було не порушити фундаментальний статус спельти як дикорослої пшениці, інакше це звало б нанівець її унікальну харчову цінність. Ми мали перенести в її геном лише одну цільову ознаку — «фіолетове зерно» від створеного нами раніше донора цієї ознаки сорту хлібопекарської пшениці Чорноброва, залишивши при цьому первозданий статус спельти максимально недоторканим. Це завдання нам вдалося вирішити за допомогою звичайної традиційної селекції з використанням кількох перерваних бекросів із системним ретельним контролем морфологічних ознак оригінальної спельти та цільової ознаки «фіолетове зерно».

Насіння покоління F_1 від схрещування спельти (♀) Schwalbenkorn × Чорноброва (♂) було отримано у 2009 р. У 2010 р. спельту Schwalbenkorn (♀) запилено пилом гібриду F_1 (♀) Schwalbenkorn × Чорноброва (♂) і отримано насіння від першого бекросу BC_1 . У 2011 р. отримано насіння BC_1/F_2 і паралельно (♀) Schwalbenkorn запилено пилом рослин BC_1/F_2 (рандомізовано), серед рослин BC_1/F_2 дібрано рослини з морфологічними ознаками спельти і фіолетовим зерном. У наступні роки, з 2012 по 2019 р., від первинного схрещування виконано загалом шість перерваних бекросів на оригінальну спельту (♀) Schwalbenkorn. У кожному схрещуванні оригінальну спельту використовували як материнську рослину з метою збереження цитоплазми оригінальної спельти. Після другого перерваного бекросу в потомстві вищепився рекомбінант — низькоросла рослина з темно-фіолетовим зерном, майже на 30 см нижча за оригінальну спельту, і саме цю рослину ви-

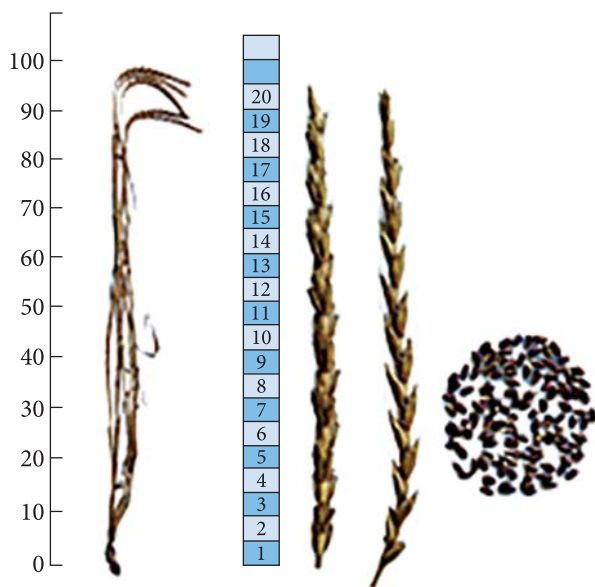


Рис. 5. Рослина, колос і зерно спельти сорту Білбері



Рис. 6. Зразки зерна сортів: 1 — Адмірал; 2 — Чорноброва; 3 — Білбері

користували в подальших бекросах з оригінальною спельтою (♀) *Schwalbenkorn* незмінно як материнську рослину.

У 2020—2021 рр. дібрані елітні короткостеблові рослини, максимально морфологічно подібні до оригінальної спельти, досліджували на морфологічну стабільність, зернову продуктивність, стійкість до фітозахворювань, вилягання рослин, вивчали характеристики хлібопекарської якості й використовували для подальшого розмноження. У тісній співпраці з компанією Biligrain (Хмельницька обл.) сорт спельти Білбері було передано в Держсорт випробування і зареєстровано у 2023 р. (а.с. № 230792, патент № 230659). Середній урожай зерна сорту спельти Білбері в умовах оптимально високого агро-

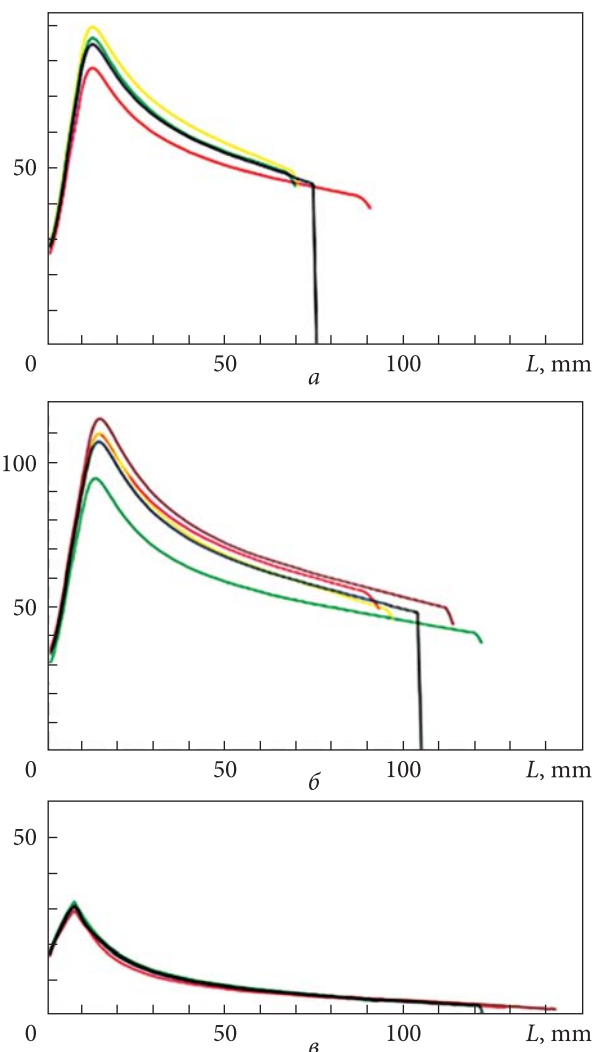


Рис. 7. Альвеограми борошна: а — сорт Адмірал ($W = 283$, $L = 74$ мм, $P/L = 1,26$, $I_e = 68,3$ %); б — лінія пшениці з геном *Gpc-B1* ($W = 454$, $L = 104$ мм, $P/L = 1,13$, $I_e = 68,4$ %); в — спельта Білбері ($W = 75$, $L = 119$ мм, $P/L = 0,29$, $I_e = 31,3$ %)

фону на полях компанії Biligrain становив 4,8 т/га, максимальний — 6 т/га.

На рис. 5 показано рослину, колос і зерно спельти Білбері. Зразки зерна звичайної пшениці сорту Адмірал з червоним зерном, сорту Чорноброва з фіолетовим зерном і сорту спельти Білбері з темно-фіолетовим зерном наведено на рис. 6.

Порівнюючи забарвлення сорту Білбері із забарвленням оригінального сорту Чорнобро-

ва, можна бачити, що зерно сорту Білбері значно темніше за фіолетове зерно сорту Чорноброва і навіть близьке до чорного. Підвищення інтенсивності забарвлення зерна спельти сорту Білбері порівняно з сортом — донором ознаки «фіолетове зерно» свідчить про вплив генетичного середовища на інтенсивність забарвлення, що пов'язано з підвищеною активністю біосинтезу пігментів антоціанінів. І це підтверджується даними вмісту пігментів у зерні. Так, за одних і тих самих умов вирощування у сорту Чорноброва вміст антоціанінів становить ~60 мг/кг, тоді як у спельти — майже 80 мг/кг.

Отже, ми створили перший в Україні (можливо, і перший у світі) інноваційний продукт — пшеницю-спельту з темно-фіолетовим забарвленням зерна і високим вмістом пігментів-антиоксидантів — антоціанінів.

Наведемо характеристики хлібопекарської якості спельти Білбері. З табл. 1 видно, що спельта Білбері (як і оригінальна спельта Schwalbenkorn) має значно вищий вміст у зерні сирого протеїну (16,8 %) і сирої клейковини (45 %) порівняно з сортом Адмірал (13 % і 20,1 % відповідно). Однак характеристики хлібопекарської якості, такі як тест Зелені, SDS-30K і сила борошна W, у спельти Білбері (як і в оригінальної спельти) істотно нижчі.

На рис. 7 наведено альвеограми борошна сортів Адмірал, високобілкової лінії пшениці з геном *Gpc-B1* і спельти Білбері. Можна бачити значну різницю між альвеограмами спельти Білбері та високоякісних зразків борошна сорту Адмірал і лінії пшениці з геном *Gpc-B1*.

Як уже зазначалося, хліб зі спельти Білбері слід виготовляти виключно з цільного борош-

Рис. 8. Цільнозернове борошно ТОВ «Дар Млин Закарпаття» зі спельти Білбері



на (близького до 100 % виходу), оскільки її головний харчовий фактор — антоціаніни — зосереджений в оболонці зерна і при помелі з відсівом висівок практично повністю втрачається. Тому для виготовлення хліба із цільного борошна спельти Білбері потрібно було опрацювати спеціальну технологію, починаючи від якісного помелу зерна в цільне борошно і аж до хлібопекарських рецептів і технології замішування тіста й випікання. Однак ці технологічні труднощі стосуються лише хліба. Для виготовлення бісквітних виробів (печиво, крекери тощо) цільне борошно спельти Білбері підходить краще, ніж борошно традиційних хлібопекарських сортів пшениці.

Технологію помелу якісного цільного борошна із зерна спельти Білбері опрацювали млинарі ТОВ «Дар Млин Закарпаття» (рис. 8).

Приватна пекарня ТМ «Мамин Хліб» (Хмельницька обл.) розробила оригінальні рецепти й технологію замішування борошна і

Таблиця 1. Порівняльні характеристики хлібопекарської якості спельти Білбері, оригінальної спельти Schwalbenkorn і звичайної пшениці сорту Адмірал

Зразок	Цільне борошно				Біле борошно (70 %)		
	Волога, %	Протеїн, %	Твердість Inframatic	Клейковина, %	Zeleny, мл	SDS-30K, мл	W
Адмірал	11,9	13,0	34	20,1	38	47	283
Білбері	12,2	16,8	6	45,0	21	15	75
Schwalbenkorn	11,8	17,4	10	49,0	22	17	74



Рис. 9. Хлібопродукти ТМ «Мамин Хліб» із цілого борошна спельти сорту Білбері



Рис. 10. Добори зразків за кольорами зерна: синій; фіолетовий + чорний; чорний

Таблиця 2. Зразки-донори пшениці з високим вмістом каротиноїдів у зерні

Сорт/лінія	Вміст каротиноїдів, мг/кг	Зразок	Вміст каротиноїдів, мг/кг
Сорт Адмірал	3,61	4172	5,50
Сорт Citrus	8,48	4310	6,66
Сорт Bona Vita	9,58	4338	6,16
Лінія СЛ4200	9,14	4401	7,44
Лінія СЛ4088	5,89	<i>T. durum</i>	6,16
Лінія СЛ4116	5,66		

першою в Україні почала виготовляти хліб та інші продукти із цілого борошна спельти Білбері з повністю натуральним темно-коричневим кольором без жодних штучних фарбників (рис. 9).

У нашій селекційній програмі створення сортів пшениці з кольоровим зерном нині задіяно кілька сотень комбінацій схрещування, переважно схрещування типу: (♀) традиційний сорт хлібопекарської пшениці або перспективна селекційна лінія × зразок із кольоровим зерном. Кінцевим цільовим генотипом є продуктивний генотип (95 % або на рівні сорту-стандарту) з чорним зерном, який поєднує в собі гени синього забарвлення (різних відтінків) в алейроновому шарі і гени фіолетового забарвлення (різних відтінків) у перикарпі (рис. 10) з цінними агрономічними й технологічними характеристиками, плюс жовтий колір ендосперму як індикатор вмісту каротиноїдів від наявних у нашій колекції донорів (табл. 2). Традиційний сорт (лінія) у схрещуваннях слугує донором цінних агрономічних і технологічних ознак, а зразок з кольоровим зерном є донором забарвлення бажаного типу.

На сьогодні наша селекційна програма створення сортів пшениці з кольоровим зерном єдина в Україні. Вона стала досить результативною, незважаючи на брак сучасних лабораторних інструментів дослідження специфічного селекційного матеріалу з кольоровим зерном. Наша робота з селекційним матеріалом поділяється на чотири основні етапи:

- 1) отримання продуктивних доборів із цільовим синім зерном різних відтінків;
- 2) отримання продуктивних доборів із цільовим фіолетовим зерном різних відтінків;
- 3) комбінування синього і фіолетового кольорів оболонки зерна з жовтим кольором ендосперму;
- 4) гібридизація і добори перспективного матеріалу з цільовим чорним зерном від трьох попередніх етапів (рис. 10).

Лабораторна робота з оцінки доборів генотипів з кольоровим зерном ускладнюється тим, що ми не маємо лабораторних інструментів машинного рейтингування та сепарації кольорів і

відтінків зерна, а тому змушені робити це вручну. Селекційна робота зі зразками пшениці з кольоровим зерном є незрівнянно складнішою за селекційну роботу з пшеницею з традиційним (червоним) кольором зерна. Особливо не простою є робота з ранніми (покоління F_2 і F_3) популяціями рослин від схрещування зразків із синім і фіолетовим забарвленням зерна. На рис. 11 показано гетерогенну популяцію насінин за кольором зерна як потомство лише з однієї рослини F_2 . Можна бачити, що популяція насінин від схрещування двох генотипів із синім і фіолетовим зерном на одній лише рослині покоління F_2 містить біле, червоне, синє, фіолетове і чорне зерно. Добори за кольором зерна ускладнюються також тим, що фіолетовий колір зерна успадковується по материнському типу, а синій у зв'язку з триплоїдністю алейронового шару, де локалізовані сині пігменти, проявляє чітко виражену ксенійність (рис. 4). І якщо додати ще комбінування кольорів оболонки зерна з жовтим кольором ендосперму, плюс належні агрономічні і технологічні характеристики рослин і зерна, можна уявити всю складність селекції сортів пшениці з кольоровим зерном.

Крім того, наш колектив виконує першу й найбільшу за масштабом в Україні програму створення сортів харчового голозерного ячменю, зокрема голозерного ячменю з кольоровим (синім, фіолетовим і чорним) зерном з унікальними харчовими характеристиками (рис. 12), серед яких на першому місці стоїть антиоксидантна активність зерна і продуктів його перероблення. Поряд із пігментами антоціанінами 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 антоціанінами, які, як і в кольоровій пшениці, локалізуються в алейроновому шарі і кодуються комбінацією генів *Ant1* та *Ant2* з комплементарним типом взаємодії. Фіолетовий колір зерна ячменю визначається антоціанінами, зо-

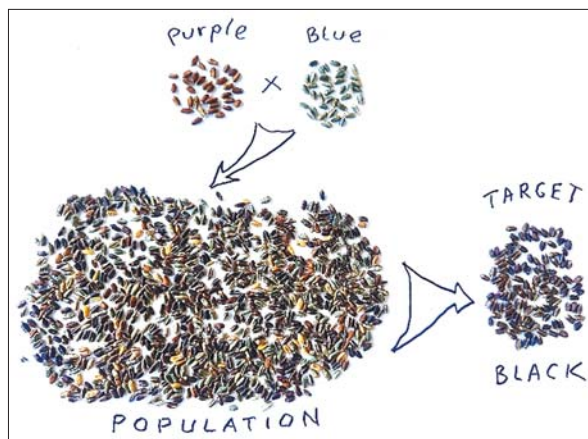


Рис. 11. Популяція зернин за кольором (білі, червоні, сині, фіолетові, чорні) на одній рослині покоління F_2



Рис. 12. Зразки зерна харчового голозерного ячменю: а — звичайного жовтого, чорного і синього кольору; б — інтенсивно чорного кольору різної крупності зерна

середженими структурно в оболонці зерна (перикарпі).

Комбінування синього і фіолетового кольорів дає чорний колір різної інтенсивності. Процес комбінування кольорів зерна голозерного ячменю набагато складніший, ніж у пшениці,



Рис. 13. Вміст пігментів антоціанінів у зерні зразків голозерного ячменю з різним забарвленням зерна: *a* — 239 ppm; *b* — 7 ppm; *v* — 6 ppm

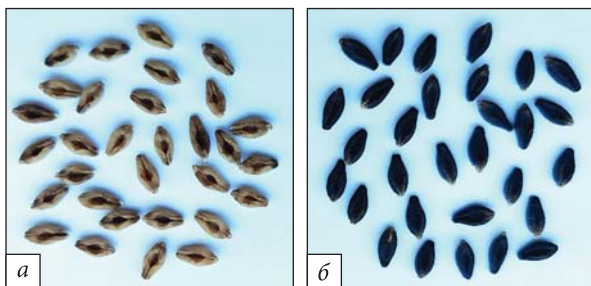


Рис. 14. Селекційні лінії озимого голозерного ячменю з мутацією *ssIIa* та унікальними харчовими характеристиками: *a* — з жовтим зерном; *b* — з чорним зерном

оскільки в ячменю на зумовлене антоціанінами забарвлення накладається ще забарвлення, пов'язане з чорними і темно-коричневими пігментами — фітомеланінами, які кодується геном *Blp1*. Тому, наприклад, визначений у зерні вміст лише антоціанінів часто не корелює з інтенсивністю забарвлення зерна (рис. 13).

Інтенсивно чорний колір зерна харчового голозерного ячменю, який є комбінацією максимального вмісту фіолетових, синіх антоціанінів та темно-коричневих фітомеланінів і має інтегруватися у максимально високу антиоксидантну активність зерна, і є цільовим завданням наших досліджень. Як у пшениці, так і у харчового голозерного ячменю синій, фіолетовий і чорний кольори зерна супроводжуються підвищеним вмістом у зерні мінералів, особливо заліза, цинку та вітамінів групи В.

Ячмінь на відміну від пшениці є джерелом цінної для харчування розчинної дієтичної клітковини у формі некрохмалистих полісахаридів — бета-глюканів. Вміст бета-глюканів

у зерні ячменю становить 4,5—5,0 %, тоді як у пшениці — всього 0,2 %. Тому нашим важливим завданням залишається подальше підвищення вмісту бета-глюканів у зерні створюваного нами харчового ячменю з чорним зерном. Вміст бета-глюканів у зерні ячменю можна істотно підвищити, використовуючи спеціальний генетичний матеріал. Як такий матеріал ми беремо переважно сорти голозерного ячменю з Канади з крохмалем типу *waxy*, такі як CDC Alamo, CDC Fibar, CDC Candle, CDC Rattan. Ці сорти несуть ген *wax* (хромосома 1S = 7HS) і внаслідок експресії цього гена мають підвищений (7—8 %) вміст у зерні бета-глюканів.

Інший шлях підвищення вмісту бета-глюканів у зерні ячменю — використання специфічної генної мутації, яка блокує активність ферменту синтази крохмалю *ssIIa* (EC2.4.1.21) [54—57]. Внаслідок блокування ключового ферменту *ssIIa* різко знижується вміст у зерні крохмалю (з 60 % до 18—20 %) і водночас підвищується вміст бета-глюканів (до >10 %) та амілози у крохмалі (з 25 % до 70 %). Такий крохмаль набуває властивостей резистентного до ферментів травлення крохмалю й імітує поведінку дієтичної клітковини. Мутація *ssIIa* більш ніж утричі (18—20 %) порівняно з нормою (60—65 %) знижує вміст крохмалю у зерні ячменю. Пропорційно до зниження частки крохмалю в зерні ячменю підвищується вміст усіх без винятку цінних харчових компонентів зерна, локалізованих переважно в його оболонці: вітамінів, мінералів, жирів, біоактивних сполук тощо. Ми отримали цінні селекційні лінії харчового голозерного ячменю з мутацією *ssIIa*, жовтим і чорним зерном, вмістом у зерні бета-глюканів понад 10 % та значно підвищеним (у 2,5 раза) вмістом вітамінно-мінерального комплексу зерна (рис. 14). Такий харчовий ячмінь має всі ознаки *superfood* і характеризується екстрависокою антиоксидантною активністю зерна.

Нашу програму створення кольорового харчового голозерного ячменю спрямовано також на істотне підвищення в зерні вмісту біодоступного мінерального фосфору. Зерно ячменю містить фосфору в середньому 470 мг/100 г су-

хої маси і перевершує за вмістом цього мінералу зерно інших злаків, таких як пшениця (410), жито (380), овес (340), рис (285), кукурудза (310). Однак близько 65—85 % фосфору в зернових і бобових культурах перебуває у зв'язаному стані в структурі фітинової кислоти (міоїнозитол-1,2,3,4,5,6-гексакісфосфат — InsP_6). Фітати — це основний депонент зернового фосфору, але він не засвоюється організмами з однокамерним шлунком (людина, свині, птиця) [57]. Для вирішення проблеми біодоступності фосфору із зерна ячменю ми використовуємо у схрещуваннях спеціальні *lpa*-мутації, які дають змогу трансформувати більш як 80 % недоступного для засвоєння органічного фосфору фітатів у біодоступний мінеральний фосфор. На сьогодні ми вже отримали цінний селекційний матеріал харчового голозерного ячменю з чорним зерном, біофортифікований за вмістом біодоступного мінерального фосфору.

Наступна наша селекційна програма пов'язана зі створенням голозерного ячменю з чорним зерном зі статусом *gluten free*. Річ у тім, що ячмінь, як і пшениця та жито, містить у зерні білки клейковини (глютен), а тому є небажаною їжею для осіб, чутливих до клейковини, особливо для тих, хто страждає на патологічну аутоімунну ентеропатію [58]. Зважаючи на цю поширену патологію, у світовій харчовій промисловості було розгорнуто масштабну програму зі створення із зерна злаків *безглютенових продуктів* (gluten free products), тобто продуктів, які не містять клейковини. Світовий ринок *gluten free* індустрії у 2018 р. оцінювався у \$4,35 млрд із щорічним приростом близько 7,7 % (за формулою CAGR), і за прогнозом до 2026 р. він має сягнути \$7,91 млрд². Тому створення сортів зернових культур харчового призначення, зокрема ячменю, що не містять клейковини, безперечно є економічно привабливою темою наукових досліджень.

Для отримання генотипів ультранизкоглютенового голозерного ячменю з чорним зерном, який практично не містить білків клейковини — гордеїнів (рис. 15), ми поєднуємо в

² Gluten Free Food Market Statistics 2026. Industry Forecasts. Nov. 2019. Report ID GMI226. 190 p.

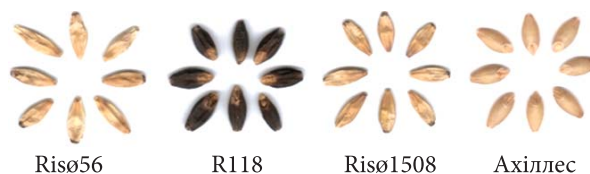


Рис. 15. Зразки зерна вихідних генотипів, використаних у програмі зі створення голозерного ячменю з чорним зерном з харчовим статусом *gluten free*: Risø56 — плівчастий; R118 — голозерний чорнозерний; Risø1508 — плівчастий; Ахіллес — сучасний районований сорт ячменю

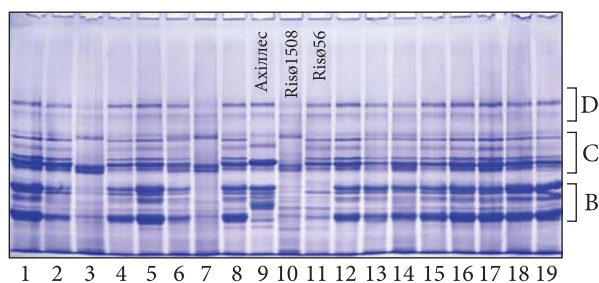


Рис. 16. SDS-PAGE електрофореграма розподілу гордеїнів ячменю: доріжка 9 — сорт-стандарт Ахіллес; 10 — мутант Risø1508; 11 — мутант Risø56; 1—8, 12—19 — генотипи популяцій F3/4 (рослини F3, зерно F4) від схрещування Risø1508 × Risø56. Буквами В, С і D позначено локації відповідних білків — гордеїнів

одному генотипі три незалежні гордеїн-дефіцитні мутації (Risø1508, Risø56 та R118), які практично повністю блокують біосинтез білків гордеїнів (рис. 16), а також додаємо ген *nud* (голе зерно), що міститься в хромосомі 7HL, і ген чорної пігментації перикарпу *Blp*, локалізований у довгому плечі хромосоми 1HL. Нині ми активно використовуємо такий генетичний матеріал у програмі схрещувань для створення низкоглютенового голозерного ячменю з чорним зерном і харчовим статусом *gluten free*.

Ці дослідження досить складні як за генетичною, так і за селекційною технологіями, а отже, потребують відповідного аналітичного ресурсу для контролю цільових мутантних генів. Дослідження зі створення харчового голозерного ячменю з чорним зерном і харчовим статусом *gluten free* на сьогодні виконано вже більш як на 60 %.



Рис. 17. Ячна крупа з різних сортів ячменю: *а* — крупа з плівчастого ячменю ТМ «Жменька»; *б* — крупа з голозерного ячменю з жовтим зерном; *в* — крупа з чорного голозерного ячменю

Результатом тісної співпраці з нашими бізнес-партнерами з компанії Biligrain стало те, що незабаром у торговельному сегменті харчового ринку України з'являться перші крупи й пластівці із зерна різних сортів чорного голозерного ячменю.

На рис. 17 наведено зразки ячної крупи ТМ «Жменька» з плівчастого ячменю, крупи з голозерного ячменю із жовтим зерном і крупи з голозерного ячменю з чорним зерном. Крупа ТМ «Жменька» має світліший відтінок порівняно з крупою з голозерного ячменю, оскільки її отримано зі шліфованого зерна. Вихід круп при переробленні шліфованого зерна плівчастого ячменю становить 60—65 %, причому в процесі шліфування зерна разом із плівкою втрачаються найцінніші у харчовому плані елементи — зернова оболонка і зародок. Цільнозернова крупа з голозерного ячменю з жовтим зерном темніша за попередню, має вихід при переробленні до 90 % і зберігає всі цінні харчові компоненти зернової оболонки та зародку. Крупа з чорного ячменю має оригінальний чорний колір, її вихід при переробленні становить також 90 % без втрати жодного із харчових компонентів зерна.

Отже, за виходом кінцевого продукту та його харчовою цінністю харчовий голозерний ячмінь із жовтим й особливо з чорним зерном має беззаперечну перевагу над плівчастим ячменем як за економічними, так і за харчовими характеристиками. Ми провели масштабні дегустаційні випробування каші, виготовленої з круп чорнозерного ячменю, і переконалися, що **ця крупа поєднує в собі непересічні харчові і над-**

звичайно високі смакові характеристики, що є досить важливим для успішного просування продукту на продовольчому ринку.

Особливо слід наголосити на тому, що з появою сортів пшениці та ячменю з кольоровим зерном змінюються вимоги до технологій переробки зерна, які мають спрямовуватися на виробництво виключно цільнозернових продуктів харчування з високим функціональним статусом. Адже цінні для здоров'я біологічно активні антоціаніни, а також вітаміни, мінерали, біоактивні компоненти зосереджено саме в периферійних шарах зернівки кольорових пшениці й ячменю. Це означає, що **традиційні технології переробки такого зерна у високосортне рафіноване борошно з відсіванням і видаленням висівок протирічать самій суті біологічної цінності зерна**. Найцінніші анатомічні частини зерна — його оболонка і зародок — повинні з повнотою, близькою до 100 %, зберігатися в харчовому продукті, виготовленому із застосуванням мінімальної кількості технологічних операцій для забезпечення максимальної натуральності продукту [59].

Така логіка технологічної переробки пшениці й ячменю з кольоровим зерном відповідає нещодавно сформульованій **новій гіпотезі щодо механізмів захисного впливу на здоров'я людини цільнозернових злаків**. Цю гіпотезу сформулював французький вчений Антоні Фарде з Національного інституту агрономічних досліджень (INRA) у статті, опублікованій в авторитетному світовому виданні Nutrition Research Reviews [59]. Коротко переказати зміст цієї фундаментальної праці, викладеної на 70 сторінках журнального тексту з цитуванням 1029(!) джерел, навряд чи можливо, оскільки це не просто ґрунтовна аналітика зерна як джерела фізичного здоров'я людини, а й детальний довідник з переліком сотень найцінніших компонентів зерна злаків за їх функціональним впливом на життєдіяльність організму людини.

Автор статті особливо акцентує на тому, що ціле зерно злаків є багатим джерелом унікальної клітковини і біоактивних компонентів. Наприклад, ціле зерно пшениці містить близько

13 % загальної дієтичної клітковини і 2 % біоактивних компонентів, і на них припадає 15 % цілого зерна. У таких фракціях зерна, як висівки і зародок, міститься відповідно близько 45 % і 18 % дієтичної клітковини, 7 % і щонайменше 6 % біоактивних компонентів, які становлять приблизно 52 % і 24 % цих фракцій.

Звідси зрозуміло, що рафінований продукт технологічної переробки пшениці — біле борошно без висівок і зародку — втрачає левову частку цих цінних для здоров'я захисних компонентів. Рафіноване біле борошно позбавлене близько 58 % цінної клітковини, 83 % магнію, 79 % цинку, 92 % селену, 70 % нікотинової кислоти, 61 % фолатів і 79 % вітаміну Е. І це ще далеко не всі втрати, якщо згадати про антоціаніни і фенольні сполуки, *n*-3 (або ω -3) жирні кислоти, SH-вмісні амінокислоти, олігосахариди (стахіоза, рафіноза, фруктани), лігнін, інші мінерали і слідові елементи, вітаміни групи В, каротиноїди, поліфеноли, лігнани, алкілрезорциноли, фітати, бетаїн, холінвмісні компоненти, інозитол, фітостероли, полікозанол і меланін. Кожен із цих компонентів має численні фізіологічні функції та доведений позитивний вплив на здоров'я людини, але, на жаль, ми їх втрачаємо з висівками [60].

Отже, наведені в цій статті результати інноваційних досліджень, що стосуються таких галузей переробки зерна в Україні, як виробництво борошна, хліба та хлібопродуктів і круп, варті уваги кожного, хто ці продукти вживає. Крім того, викладений матеріал ми розглядаємо як **наукове обґрунтування започаткованого нами нового для України напряму селекції кольорових сортів пшениці і голозерного ячменю**, який є одним із важливих шляхів біофортificaції зерна цих культур, поліпшення його харчової (біологічної) цінності. Особливий акцент ми робимо на створенні кольорових сортів пшениці й ячменю **круп'яного напряму використання зерна**. Зернові крупы та пластівці є повністю натуральними продуктами переробки зерна, отриманими з використанням практично лише однієї технологічної операції — подрібнення чи плющення зерна з мінімальними втратами його анатомічних елементів. Крупы дозво-

ляють зберегти в кінцевому продукті всі цінні для здоров'я компоненти зерна.

Злаки є основою харчування населення світу. Ґрунтуючись на наведених вище даних, що відображають науково підтверджену позицію провідних світових учених-нутриціологів щодо біологічної цінності цілого зерна злаків, ми вважаємо, що в **Україні слід чітко сформулювати і прийняти національну стратегію здорового (функціонального) харчування на основі цільнозернових продуктів із зерна головних харчових злаків. Селекція має бути спрямована на поліпшення біологічної цінності зерна цих культур, а технологічна переробка зерна — гарантувати максимальне збереження в кінцевому харчовому продукті всіх цінних для здоров'я нутрієнтів зерна.**

Положення цієї стратегії необхідно в популярній формі і на систематичній основі через усі засоби масової інформації доводити до свідомості кожного пересічного споживача продуктів із зерна злаків, тобто до кожного українця. Щоденне вживання цільнозернових продуктів із зерна злаків у рекомендованій нутриціологами кількості має лягти в основу Державної/Національної стратегії повноцінного здорового харчування і стати запорукою поліпшення фізичного і духовного здоров'я населення України, профілактики тяжких захворювань та подовження активного здорового життя для всієї української нації.

Ці положення давно вже стали національними стратегіями харчування в розвинених країнах світу. Так, згідно з нормами харчування Великої Британії³ і США⁴, продукти із цілого зерна в раціоні населення мають становити за сирою масою не менш як 51 %; у Швеції⁵ і Данії⁶ продукти із цільного зерна за сухою ма-

³ Joint Health Claims Initiative (JHCI), 2002. Generic health claim for wholegrain foods and heart health.

⁴ Food and Drug Administration (FDA), 1999. Health Claim Notification for Whole Grain Foods.

⁵ Swedish Nutrition Foundation (SNF), 2004. Health claims in the labelling and marketing of food products. The food sector's code of practice.

⁶ Mejborn H., Biloft-Jensen A.P., Trolle E., Tetens I. (eds) *Fuldkorn — Definition og vidensgrundlag for anbefaling af*

сою — не менш як 50 %, а у Німеччині⁷ частка хліба із цільного зерна — не менш як 90 %.

З усіма нормативними документами ЄС, які стосуються норм безпеки харчування і містять

відповідні рекомендації, а також зі щорічними звітами за цим напрямом можна ознайомитися на сайті Європейського агентства з безпеки продуктів харчування (EFSA)⁸.

fuldkornsindtag i Danmark. DTU Fødevareinstituttet, 2008.

⁷ Deutsches Lebensmittelbuch. Leitsätze für Brot und Kleingebäck, 1993.

⁸ The European Food Safety Authority.
<https://www.efsa.europa.eu/en>

REFERENCES

- Einbond L.S., Reynertson K.A., Luo X.-D., Basile M.J., Kennelly E.J. Anthocyanin antioxidants from edible fruits. *Food Chem.* 2004. **84**(1): 23—28. [https://doi.org/10.1016/s0308-8146\(03\)00162-6](https://doi.org/10.1016/s0308-8146(03)00162-6)
- Zhang B., Peng H., Deng Z., Tsao R. Phytochemicals of lentil (*Lens culinaris*) and their antioxidant and anti-inflammatory effects. *J. Food Bioactives*. 2018. **1**: 93—103. <https://doi.org/10.31665/jfb.2018.1128>
- Andersen O., Jordheim M. The anthocyanins. In: *Flavonoids: Chemistry, Biochemistry and Applications*. Edited by O.M. Andersen, K.R. Markham. Boca Raton, CRC Press, 2006. P. 471—552. <https://doi.org/10.1201/9781420039443>
- Khoo H.E., Azlan A., Tang S.T., Lim S.M. Anthocyanidins and anthocyanins: colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits. *Food Nutr. Res.* 2017. **61**(1): 1361779. <https://doi.org/10.1080/16546628.2017.1361779>
- Liu R.H. Potential synergy of phytochemicals in cancer prevention: mechanism of action. *J. Nutr.* 2004. **134**(12): 3479—3485. <https://doi.org/10.1093/jn/134.12.3479s>
- Liu R.H. Whole grain phytochemicals and health. *J. Cereal Sci.* 2007. **46**(3): 207—219. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.06.010>
- Shipp J., Abdel-Aal E.-S. Food applications and physiological effects of anthocyanins as functional food ingredients. *The Open Food Science Journal*. 2010. **4**: 7—22. <https://doi.org/10.2174/1874256401004010007>
- Reis J., Monteiro V., Gomes R., Moraes do Carmo M., Vilhena da Costa G., Ribera P., Monteiro M. Action mechanism and cardiovascular effect of anthocyanins: a systematic review of animal and human studies. *J. Transl. Med.* 2016. **14**: 315. <https://doi.org/10.1186/s12967-016-1076-5>
- Mazza G. Anthocyanins and heart health. *Annali dell'Istituto Superiore di Sanità*. 2007. **43**(4): 369—374. https://www.iss.it/documents/20126/45616/369+-+ANN_07_54_Mazza.1201593082.pdf/ed763f20-9ff1-5536-dffe-9ff6d18b55d3?t=1581099677023
- Kepler K., Humpf H.-U. Metabolism of anthocyanins and their phenolic degradation products by the intestinal microflora. *Bioorg. Med. Chem.* 2005. **13**(17): 5195—5205. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2005.05.003>
- Abdel-Aal E.-S., Abou-Arab A., Gamel T., Hucl P., Young J., Rabalski I. Fractionation of blue wheat anthocyanin compounds and their contribution to antioxidant properties. *J. Agric. Food Chem.* 2008. **56**(23): 11171—11177. <https://doi.org/10.1021/jf802168c>
- Kahkonen M., Heinonen M. Antioxidant activity of anthocyanins and their aglycones. *J. Agric. Food Chem.* 2003. **51**(3): 628—633. <https://doi.org/10.1021/jf025551i>
- Fukumoto L., Mazza G. Assessing antioxidant and prooxidant activities of phenolic compounds. *J. Agric. Food Chem.* 2000. **48**(8): 3597—3604. <https://doi.org/10.1021/jf000220w>
- Astadi I., Astuti M., Santoso U., Nugraheni P. *In vitro* antioxidant activity of anthocyanins of black soybean seed coat in human low-density lipoprotein (LDL). *Food Chem.* 2009. **112**(3): 659—663. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.06.034>
- DeFuria J., Bennett G., Strissel K. Dietary blueberry attenuates whole-body insulin resistance in high fat-fed mice by reducing adipocyte death and its inflammatory sequelae. *J. Nutr.* 2009. **139**(8): 1510—1516. <https://doi.org/10.3945/jn.109.105155>
- Guo H., Ling W., Wang Q. Effect of anthocyanin-rich extract from black rice (*Oryza sativa* L. *indica*) on hyperlipidemia and insulin resistance in fructose-fed rats. *Plant Foods Hum. Nutr.* 2007. **62**: 1—6. <https://doi.org/10.1007/s11130-006-0031-7>
- Jayaprakasam B., Vareed S., Olson L., Nair M. Insulin secretion by bioactive anthocyanins and anthocyanidins present in fruits. *J. Agric. Food Chem.* 2005. **53**(1): 28—31. <https://doi.org/10.1021/jf049018+>

18. Fimognari C., Berti F., Nusse M., Cantelli-Forti G., Hrelia P. Induction of apoptosis in two human leukemia cell lines as well as differentiation in human promyelocytic cells by cyanin-3-O-beta-glucopyranoside. *Biochem. Pharmacol.* 2004. **67**(11): 2047—2056. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2004.02.021>
19. Kang S., Seeram N., Nair M., Bourquin L. Tart cherry anthocyanins inhibit tumor development in Apc (Min) mice and reduce proliferation of human colon cancer cells. *Cancer Lett.* 2003. **194**(1): 3—19. [https://doi.org/10.1016/s0304-3835\(02\)00583-9](https://doi.org/10.1016/s0304-3835(02)00583-9)
20. Sangsefidi Z., Hasanizadeh S., Hosseinzadeh M. Effect of purified anthocyanins or anthocyanin-rich extracts on C-reactive protein levels: a systematic review and meta-analysis of randomised clinical trials. *British J. Nutr.* 2018. **120**(12): 1406—1414. <https://doi.org/10.1017/s0007114518002957>
21. Kalt W., Blumberg J., McDonald J. Identification of anthocyanins in the liver, eye and brain of blueberry-fed pigs. *J. Agric. Food Chem.* 2008. **56**(3): 705—712. <https://doi.org/10.1021/jf071998l>
22. Matsumoto H., Nakamura Y., Iida H., Ito K., Ohguro H. Comparative assessment of distribution of blackcurrant anthocyanins in rabbit and rat ocular tissues. *Exp. Eye Res.* 2006. **83**(2): 348—356. <https://doi.org/10.1016/j.exer.2005.12.019>
23. Matsumoto M., Hara H., Chiji H., Kasai T. Gastroprotective effect of red pigments in black chokeberry fruit (*Aronia melanocarpa* Elliot) on acute gastric hemorrhagic lesions in rats. *J. Agric. Food Chem.* 2004. **52**(8): 2226—2229. <https://doi.org/10.1021/jf034818q>
24. Canter P., Ernst E. Anthocyanosides of *Vaccinium myrtillus* (bilberry) for night vision — a systematic review of placebo-controlled trials. *Therapeutic Review.* 2004. **49**(1): 38—50. <https://doi.org/10.1016/j.survophthal.2003.10.006>
25. Akhmadieva A., Zaichkina S., Ruzieva R., Ganassi E. The protective action of a natural preparation of anthocyanin (pelargonidin-3,5-diglucoside). *Radiobiologiya.* 1993. **33**(3): 433—435.
26. Herrero J., Frutos M. Effect of concentrated plum juice on physicochemical and sensory properties of yoghurt made at bench top scale. *Int. J. Dairy Technol.* 2014. **67**(1): 123—128. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12101>
27. Bueno J., Plaza S., Escudero R., Jimenez A., Fett R., Asuero A. Analysis and antioxidant capacity of anthocyanin pigments. Part II: Chemical structure, color, and intake of anthocyanins. *Critical Reviews in Analytical Chemistry.* 2012. **42**(2): 126—151. <https://doi.org/10.1080/10408347.2011.632314>
28. Dang Y., Li Z., Yu F. Recent advances in astaxanthin as an antioxidant in food applications. *Antioxidants.* 2024. **13**(7): 879. <https://doi.org/10.3390/antiox13070879>
29. Pozniak C., Knox R., Clarke F., Clarke J. Identification of QTL and association of phytoene synthase gene with endosperm color in durum wheat. *Theor. Appl. Genet.* 2007. **114**: 525—537. <https://doi.org/10.1007/s00122-006-0453-5>
30. Zhang W., Dubcovsky J. Association between allelic variation at the phytoene synthase 1 gene and yellow pigment content in the wheat grain. *Theor. Appl. Genet.* 2008. **116**: 635—645. <https://doi.org/10.1007/s00122-007-0697-8>
31. Guo Z.F., Zhang Z.B., Xu P., Guo Y.N. Analysis of nutrient composition of purple wheat. *Cereal Res. Commun.* 2013. **41**: 293—303. <https://doi.org/10.1556/crc.2012.0037>
32. Jeewani D., Nishantha M. Blue wheat: genetics, healthy value and food processing. *Sch. J. Agric. Vet. Sci.* 2018. **5**(4): 230—235. <https://doi.org/10.21276/sjavs.2018.5.4.7>
33. Guo Z., Xu P., Zhang Z., Guo Y. Segregation ratios of colored grains in F1 hybrid wheat. *Crop Breeding and Applied Biotechnology.* 2012. **12**(2): 126—131. <https://doi.org/10.1590/s1984-70332012000200005>
34. Song E.-S., Park S.-J., Woo N.-R.-A., Won M.-H. Antioxidant capacity of colored barley extracts by varieties. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 2005. **34**(10): 1491—1497. <https://doi.org/10.3746/jkfn.2005.34.10.1491>
35. Kim M.-J., Hyun J.-N., Kim J.-A., Park J.-C., Kim M.-Y., Kim J.-G., Lee S.-J., Chun S.-C., Chung I.-M. Relationship between phenolic compounds, anthocyanins content and antioxidant activity in colored barley germplasm. *J. Agric. Food Chem.* 2007. **55**: 4802—4809. <https://doi.org/10.1021/jf0701943>
36. Sherman J., Souza E., See D., Talbert L.E. Microsatellite markers for kernel color genes in wheat. *Crop Science.* 2008. **48**: 1419—1424. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.10.0561>
37. Garg M., Kaur S., Sharma A. et al. Rising demand for healthy foods-anthocyanin biofortified colored wheat is a new research trend. *Front. Nutr.* 2022. **9**: 1—23. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.878221>
38. Zeller E., Cermefio M., Miller T. Cytological analysis on the distribution and origin of the alien chromosome pair conferring blue aleurone color in several European common wheat (*Triticum aestivum* L.) strains. *Theor. Appl. Genet.* 1991. **81**: 551—558. https://doi.org/10.1007/978-3-476-03295-9_6
39. Keppen V., Baenziger P. Inheritance of the blue aleurone trait in diverse wheat crosses. *Genome.* 1990. **33**: 525—529. <https://doi.org/10.4337/9781788972345.00009>
40. Singh K., Ghai M., Garg M., Chhuneja P., Kaur P., Schnurbusch T., Keller B., Dhaliwal H.S. An integrated molecular linkage map of diploid wheat based on a *Triticum boeoticum* × *T. monococcum* RIL population. *Theor. Appl. Genet.* 2007. **115**: 301—312. <https://doi.org/10.1007/s00122-007-0543-z>

41. Knievel D., Abdel-Aal E., Rabalski I., Nakamura T., Hucl P. Grain color development and the inheritance of high anthocyanin blue aleurone and purple pericarp in spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Cereal Sci.* 2009. **50**(3): 113—120. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2009.03.007>
42. Zeven A.C. Wheats with purple and blue grains — a review. *Euphytica*. 1991. **56**: 243—258. <https://doi.org/10.1007/bf00042371>
43. Dubcovsky J., Luo M., Zhong G., Bransteitter R., Desai A., Kilian A., Kleinhofs A., Dvorak J. Genetic map of diploid wheat, *Triticum monococcum* L., and its comparison with maps of *Hordeum vulgare* L. *Genetics*. 1996. **143**: 983—988. <https://doi.org/10.1093/genetics/143.2.983>
44. Shen Y., She J., Dawadondup Z., Wang Y., Pu J., Feng Y., Chu C., Wang X., Qi Z. Physical localization of a novel blue-grained gene derived from *Thinopyrum bessarabicum*. *Molecular Breeding*. 2013. **31**: 195—200. <https://doi.org/10.1007/s11032-012-9783-y>
45. Li W., Shan F., Sun S., Corke H., Beta T. Free radical scavenging properties and phenolic content of Chinese black-grained wheat. *J. Agric. Food Chem.* 2005. **53**(22): 8533—8538. <https://doi.org/10.1021/jf051634y>
46. Garg M., Chawla M., Chunduri V., Kumar R., Sharma S., Sharma N., Kaur N., Kumar A., Munday J., Saini M., Singh S. Transfer of grain colors to elite wheat cultivars and their characterization. *J. Cereal Sci.* 2016. **71**: 138—144. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.08.004>
47. Rivas-Gonzalo J.C. Analysis of anthocyanins. In: Saltmarsh M., Santos-Buelga C., Williamson G. (eds). *Methods in Polyphenol Analysis*. Royal Society of Chemistry, London, 2003. P. 338—358.
48. Finch R., Simpson E. New colors and complementary color genes in barley. *Zeitschrift fur Pflanzenzuchtung*. 1978. **81**(1): 40—53.
49. Shim J., Suh S.J. Linkage relationship of blue aleurone genes (Bl's) in barley. In: Yasuda S., Konishi T. (eds). *Barley Genetics V*. Proc. Fifth Int. Barley Genet. Symp. Okayama, Sanyo Press Co., 1986. P. 213—217.
50. Zhang X.-W., Jiang Q.-T., Wei Y.-M., Liu C. Inheritance analysis and mapping of quantitative trait loci (QTL) controlling individual anthocyanin compounds in purple barley (*Hordeum vulgare* L.) grains. *Plos One*. 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183704>
51. Jia Q., Wang J., Zhu J., Hua W., Shang Y., Yang J. Toward identification of black lemma and pericarp gene Blp1 in barley combining bulked segregant analysis and specific-locus amplified fragment sequencing. *Front. Plant Sci.* 2017. **8**: 1414. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01414>
52. Harlan H.V. *Some distinctions in our cultivated barleys with reference to their use in plant breeding*. Washington, Govt. Print. Off., 1914. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.37224>
53. Siebenhandl S., Grausgruber H., Pellegrini N., Del Rio D., Fogliano V., Pernice R. Phytochemical profile of main antioxidants in different fractions of purple and blue wheat, and black barley. *J. Agric. Food Chem.* 2007. **55**(21): 8541—8547. <https://doi.org/10.1021/jf072021j>
54. Bird A., Flory C., Davies D., Usher S., Topping D. 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.* 2004. **134**(4): 831—835. <https://doi.org/10.1093/jn/134.4.831>
55. Bird A., Jackson M., King R., Davies D., Usher S., Topping D. 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.* 2004. **92**(4): 607—615. <https://doi.org/10.1079/BJN20041248>
56. Clarke B., Liang R., Morell M., Bird A., Jenkins C., Li Z. Gene expression in a starch synthase IIa mutant of barley: changes in the level of gene transcription and grain composition. *Funct. Integr. Genomics*. 2008. **8**: 211—221. <https://doi.org/10.1007/s10142-007-0070-7>
57. Berdanier C., Dwyer J., Herber D. *Handbook of Nutrition and Food*. CRC Press, 2013. <https://doi.org/10.1201/b15294>
58. Rosell C., Barro F., Sousa C., Mena C. Cereals for developing gluten-free products and analytical tools for gluten detection. *J. Cereal Sci.* 2014. **59**(3): 354—364. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.10.001>
59. Fardet A. New hypotheses for the health-protective mechanisms of whole-grain cereals: what is beyond fibre? *Nutrition Research Reviews*. 2010. **23**(1): 65—134. <https://doi.org/10.1017/s0954422410000041>
60. Truswell A. Cereal grains and coronary heart disease. *Eur. J. Clin. Nutr.* 2002. **56**: 1—14. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1601283>

Olexandr I. Rybalka

*Plant Breeding and Genetics Institute — National Center of Seed and Cultivars Investigation
of National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Odesa, Ukraine
Institute of Plant Physiology and Genetics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

Volodymyr V. Morhun

*Institute of Plant Physiology and Genetics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5842-6328>*

Bogdan V. Morgun

*Institute of Cell Biology and Genetic Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Institute of Plant Physiology and Genetics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7041-6894>*

Sergiy S. Polishchuk

*Plant Breeding and Genetics Institute — National Center of Seed and Cultivars Investigation
of National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Odesa, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8934-3621>*

FOR THE FIRST TIME IN THOUSANDS OF YEARS: COLORED CEREAL GRAINS AS THE FUNCTIONAL FOOD OF THE FUTURE

The article contains a scientific justification for a new direction for Ukraine in the breeding of wheat and naked barley with colored (black, purple, blue) grains in order to improve (biofortification) the nutritional (biological) value of the grain of these crops. Cereal grains are the basis of the world population's nutrition, and the strategy of biofortification of cereal grains is today called the "second green revolution".

The black, blue and purple color of cereal grains is caused by the pigments anthocyanins and phytomelanins, which have high antioxidant activity and, according to the classification, belong to the group of plant flavonoids. These are part of an even larger group of phytochemical components of grain — bioactive phenolic compounds. The yellow color of the endosperm is caused by carotenoid pigments from the group of tetraterpenoid pigments, which are also antioxidants.

Bioactive pigments anthocyanins of colored fruits, vegetables, legumes and colored cereals, together with carotenoids, are able to provide humans with nutritional prevention of a number of serious diseases, such as cardiovascular pathologies, diabetes, various forms of cancer. Therefore, these products are becoming increasingly popular among the population of developed countries of the world.

The article provides examples of unique varieties of wheat and edible naked barley with colored grain created by the authors, which are currently being introduced in Ukraine into the industrial production of functional food products valuable for health. It is emphasized that over thousands of years of wheat's existence, its grain has never had blue, purple, black colors, and, accordingly, such a high nutritional functionality of the grain. Genes encoding the unique colors of cultivated wheat grain were transferred to its genome from wild relative species.

The authors of the article are the first scientific team in Ukraine to create and bring to the State Register a variety of black wheat with high biological value of grain and initiated a new direction for Ukraine in the selection of varieties of colored wheat and naked barley. These varieties should become the basis for the creation of new functional food products on the food market of Ukraine.

The authors of the article propose, following the example of developed countries of the world, to develop a national strategy for healthy (functional) nutrition in Ukraine, aimed at the maximum (not less than 50%) increase in the share of whole grain cereal products in the diet of the population of Ukraine.

The scientific innovations of the authors of the article concern such branches of grain processing in Ukraine as the production of flour, bread, bread products and cereals.

Keywords: colored grains, wheat, naked barley, anthocyanins, carotenoids, antioxidants, food functionality.

Cite this article: Rybalka O.I., Morhun V.V., Morgun B.V., Polishchuk S.S. For the first time in thousands of years: colored cereal grains as the functional food of the future. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2025. (7): 7—27.
<https://doi.org/10.15407/visn2025.07.007>