

<https://doi.org/10.15407/frg2020.02.095>

УДК 575.113.2:577.112.82

КОЛЬОРОВЕ ЗЕРНО ПШЕНИЦІ І ЯЧМЕНЮ — НОВА СТРАТЕГІЯ СЕЛЕКЦІЇ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР ІЗ ВИСОКОЮ БІОЛОГІЧНОЮ ЦІННІСТЮ ЗЕРНА

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

¹Селекційно-генетичний інститут—Національний центр насіннєзнавства та сортовивчення Національної академії аграрних наук України
65036 Одеса, Овідіопольська дорога, 3

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

³Інститут клітинної біології та генетичної інженерії Національної академії наук України
03680 Київ, вул. Академіка Заболотного, 148
e-mail: molgen@icbge.org.ua

Науково обґрунтовано новий для України напрям селекції пшениці і голозерного ячменю з кольоровим (чорним, фіолетовим, синім) зерном з метою підвищення (біофортificaції) харчової (біологічної) цінності зерна цих культур. Зернові злаки є основою харчування населення світу. Стратегію біофортificaції зернових злаків сьогодні називають «другою зеленою революцією». Чорний, синій і фіолетовий колір зерна злаків зумовлюють пігменти антоціаніни і фітомеланіни, що належать до рослинних флавоноїдів, які є часткою ще більшої групи фітохімічних компонентів зерна — фенольних сполук. Антоціаніни кольорових плодів фруктів, овочів, бобових культур і кольорових зернових злаків забезпечують харчову профілактику людини до цілої низки тяжких захворювань — серцево-судинних патологій, цукрового діабету, різних форм раку, тому такі продукти стають дедалі популярнішими і вживанішими у їжу серед населення розвинутих країн. Наведено багато прикладів біохімічних, фізіологічних і клінічних досліджень пшениці та ячменю, виконаних у провідних лабораторіях світу, які доводять високу біологічну цінність кольорового зерна цих культур. Автори статті вперше в Україні створили і довели до Державного реєстру сорти чорнозерної пшениці з високою біологічною цінністю зерна і започаткували новий для України напрям селекції сортів кольорової пшениці та голозерного ячменю, які стануть основою для створення нових продуктів функціонального харчування на продовольчому ринку України. За прикладом розвинутих країн світу запропоновано розробити в Україні національну стратегію здорового (функціонального) харчування, спрямовану на максимальне (не менш як 50 %) підвищення в харчовому раціоні населення України частки продуктів із цільного зерна злаків.

Ключові слова: кольорове зерно, пшениця, ячмінь, селекція, біофортificaція, антоціаніни, антиоксиданти, функціональні харчові продукти.

Цитування: Рибалка О.І., Моргун В.В., Моргун Б.В. Кольорове зерно пшениці і ячменю — нова стратегія селекції зернових культур із високою біологічною цінністю зерна. *Фізіологія рослин і генетика*. 2020. 52, № 2. С. 95—127. <https://doi.org/10.15407/frg2020.02.095>

Кольорові продукти харчування такі як овочі і фрукти [1, 2], зернові злаки коричневий рис [3], кольорові сорго і просо [4], фіолетова кукурудза [5], кольорова сочевиця [6], ячмінь із чорним, фіолетовим і синім зерном [7], пшениця з чорним, фіолетовим і синім зерном [8], багаті на важливі для здоров'я людини біоактивні фітохімічні сполуки — антоціаніни та фенольні кислоти [9, 10]. Антоціаніни — це водорозчинні пігменти, що належать до родини флавоноїдів, які у свою чергу, є частиною ще більшої групи біологічно активних сполук — поліфенолів.

Згідно з результатами численних клінічних досліджень, харчові продукти, багаті на антоціаніни і поліфеноли (характеризуються як мікронутрієнти), забезпечують профілактику організму людини до цілого комплексу патологій, таких як серцево-судинні хвороби, рак, діабет, гіпертонія, запалення органів, ожиріння, сприяють сповільненню старіння, захищають організм від руйнівного УФ-випромінювання тощо [11]. Результати досліджень останніх років особливо наголошують на тому, що антоціаніни і поліфеноли як потужні рослинні антиоксиданти здатні знешкоджувати (нейтралізувати) вільні радикали і тим самим знижувати ризик появи небезпечних захворювань, пов'язаних з оксидативним (окиснювальним) стресом, таких як рак, серцево-судинні та нейродегенеративні патології [12].

Злаки з кольоровим зерном як джерело мікронутрієнтів, нестача яких пов'язана з багатьма хворобами, у зв'язку з їх високою біологічною цінністю розглядають як складову світової стратегії створення продуктів функціонального харчування. Ця стратегія навіть отримала спеціальну назву — «друга зелена революція» [23].

Колір перелічених вище продуктів визначають антоціаніни, які є природними водорозчинними флавоноїдами виключно рослинного походження. Антоціаніни відповідають за червоні, фіолетові, сині, помаранчеві та інші відтінки забарвлення різних рослинних органів, тканин, плодів. За особливостями молекулярної структури антоціаніни належать до класу глікозидів і мають складний молекулярний скелет у формі В-кільця (В-ring) із бічними метильними та гідроксильними групами (рис. 1).

Структурне варіювання молекули антоціанінів значно розширюється внаслідок утворення молекулярних комплексів В-кільця з цукрами, найчастіше з пентозами, аліфатичними та ароматичними кислотами. Як наслідок молекулярного різноманіття нині відомо більш як 600 природних антоціанінів. Найпоширеніші з них шість: ціанідини (cyanidins), дельфінідини (delphinidins), мальвінідіни (malvinidins), пеларгонідини (pelargonidins), петунідини (petunidins), піонідини (peonidins) (див. рис. 1). Антоціаніни фактично є фенольними фітохімічними сполуками, що класифікуються в межах ряду флавоноїдів разом із флавонолами, флавонами, флавононами та ізофлавоноїдами. Залежно від позиції гідроксильної групи у В-кільці основні антоціаніни поділяють на пеларгонідин (4'-ОН), ціанідин (3',4'-ОН) і дельфінідин (3',4',5'-ОН), які визначають відповідно червону/оранжеву, темно-червону і фіолетову/синю пігментацію [14, 15].

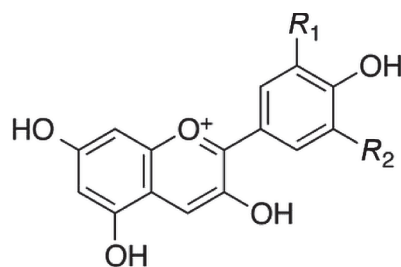
На відміну від овочів і фруктів злаки є нетиповим джерелом антоціанінів. Однак зерно злаків і продукти його переробки належать до

продуктів щоденного масового споживання населенням земної кулі. У зв'язку з цим злаки з кольоровим зерном, зважаючи на їх високу біологічну цінність, насамперед рис, пшениця, ячмінь, останнім часом особливо приваблюють споживачів, переробників зерна, виробників продуктів функціонального харчування і селекціонерів у багатьох країнах світу, передусім таких, як Китай, Індія, США, Канада, Австралія, Австрія, Чехія, Японія, Південна Корея та ін. [16].

На жаль, на полях України сьогодні практично не вирощують сортів пшениці чи ячменю з кольоровим зерном. На харчовому ринку України відповідно немає жодного функціонального продукту повсякденного споживання, виготовленого з кольорового зерна пшениці чи ячменю, а населення України, як і наукова спільнота, мало поінформовані про високу біологічну цінність таких продуктів.

Наш науковий колектив першим в Україні ініціював програму створення і дослідження сортів пшениці та ячменю з кольоровим зерном і створив два сорти озимої пшениці з фіолетовим зерном — Чорноброва і Чорнозерна, що занесені до Державного реєстру сортів рослин. Завданням цієї публікації є огляд наявних інформаційних матеріалів, пов'язаних із пшеницею та ячменем з кольоровим зерном, висвітлення особливостей генетичного контролю антоціанінів їх зерна як базису для біофортificaції зерна пшениці та ячменю й основи селекції сортів цих культур із кольоровим зерном, що є унікальною сировиною для створення нових продуктів функціонального харчування для продовольчого ринку України.

У звичайної червонозерної пшениці, що представляє майже 100 % сортів, зареєстрованих в Україні, червоний колір зерна контролюють один, два, або три домінуючі алелі: *R-A1b* (хромосома 3AL), *R-B1b* (хромосома 3BL) та *RD1b* (хромосома 3DL) [17]. Червона пігментація зерна пшениці зумовлена фенольними сполуками, головню танінами, які надають зерну червонозерної пшениці гіркуватого присмаку й позитивно асоційовані зі стійкістю її зерна до передзбирального проростання [18]. Відсутність червоного забарвлення (білий колір) зерна контролює набір із трьох рецесивних алелів: *R-A1a*, *R-B1a*, *RD1a*. Пшениця з білим зерном (потрійний рецесив) має м'який «солодкуватий» присмак без властивої червоному зерну гіркості, та менш стійка за червонозерну пшеницю до передзбирального проростання.



	<i>R</i> ₁	<i>R</i> ₂
Pelargonidin	H	H
Cyanidin	OH	H
Delphinidin	OH	OH
Malvidin	OCH ₃	OCH ₃
Peonidin	OCH ₃	H
Petunidin	OCH ₃	OH

Рис. 1. Базова молекулярна структура антоціанінів [13]

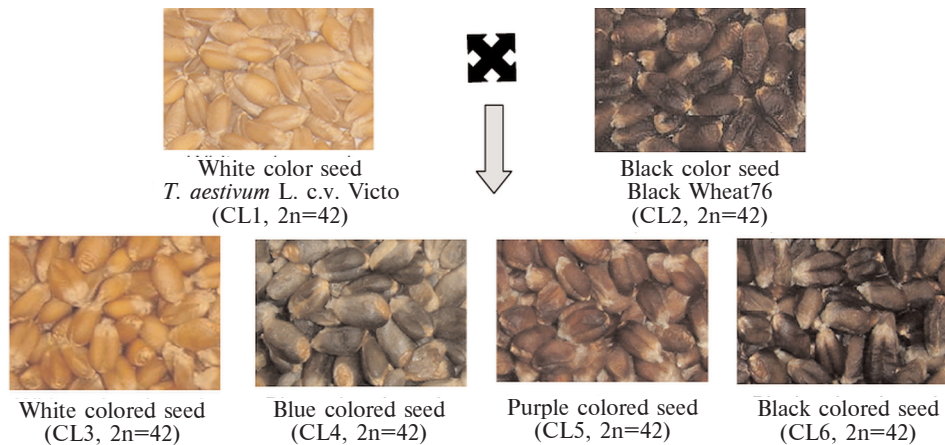


Рис. 2. Зразки кольорового зерна пшениці Канади:

CL1, CL3-white — біле зерно; CL2, CL6-black — чорне; CL4-blue — синє; CL5-purple — фіолетове [19]

На рис. 2, 3 як типовий приклад наведено зразки кольорового зерна (чорне, фіолетове, синє) пшениці з Канади та ячменю з Південної Кореї, які селекціонери цих країн сьогодні активно використовують для створення комерційних сортів пшениці та ячменю з кольоровим зерном.

Чорне зерно пшениці має інтенсивну пігментацію, фіолетове — дещо світліше. Синє зерно пшениці забарвлене пігментом синього кольору. Подібно до пшениці чорне, фіолетове і синє забарвлення зерна ячменю (див. рис. 3) особливо чітко виражені у голозерного ячменю, у півчастого зерна пігментація маскується плівкою і залежить від її товщини.



Рис. 3. Зразки кольорового зерна ячменю Південної Кореї:

1 — жовте півчасте; 2, 3, 6 — чорне півчасте; 4 — чорне голе; 5 — фіолетове півчасте; 7 — синє голе; 8 — фіолетове голе [20]

З урахуванням важливого значення кольорових пшениці та ячменю у харчуванні як засобу біофортифікації зерна цих культур у багатьох селекційних центрах світу останніми роками активно ведеться селекція сортів пшениці та ячменю з кольоровим зерном. Для успішної селекції таких сортів важливо мати уявлення про генетичний контроль і варіабельність фіолетового, чорного і синього забарвлення зерна.

Зерно різного кольору трапляється як у пшениці, так і її дикорослих родичів. Наприклад, у диплоїдного (RR) жита виявлено генотипи з голубим і зеленим зерном. Фіолетове зерно знайдено серед тетраплоїдної (AABB) пшениці Ефіопії, у місцевих зразках гексаплоїдної (AABBDD) пшениці з Китаю. Джерелом фіолетового і синього зерна є також дикорослий диплоїд (AA) *Triticum boeoticum*. Одне із джерел походження синього кольору зерна у гексаплоїдної пшениці — пирій *Agropyron elongatum* [21].

Колір зерна пшениці є ознакою з доволі складним виявом і сильно варіює за відтінками. Особливо це стосується фіолетового і синього кольорів. Фіолетовий колір інколи поділяють на світло-фіолетовий, фіолетовий і темно-фіолетовий (або чорний). Синій колір також має відтінки світлого, середнього й інтенсивного синього [22]. Це саме стосується і ячменю [20]. У зв'язку з варіабельністю ознак чорного, фіолетового та синього кольорів зерна, а також різними джерелами походження цієї пігментації дослідні дані щодо успадкування зазначених кольорів, отримані різними авторами на різному матеріалі, не збігаються.

Так, в одному з ранніх досліджень успадкування фіолетового кольору зерна, що походить від тетраплоїдної пшениці *Triticum polonicum*, контролювали два доміантні гени [24]. В іншому досліді за участі у схрещуванні тетраплоїдної пшениці з Ефіопії (фіолетове зерно) з білозерною пшеницею було встановлено, що фіолетовий колір зерна контролює доміантний ген [25]. Інші автори після проведення досліді дійшли висновку, що фіолетовий колір зерна у зразку гексаплоїдної пшениці контролюють два комплементарні гени у хромосомах 3A і 7B [26]. У досліді із сортом пшениці Charcoal встановлено, що фіолетовий колір перикарпу зерна цього сорту контролюють два гени з неповним домінуванням [27].

У низці досліджень було виявлено, що синій колір зерна пшениці контролює один ген [22, 26, 28, 29]. Стосовно символіки для позначення гена, який контролює синій колір зерна, у літературі склалося різночитання. Одні автори позначають цей ген символом *Ba*, інші — символом *Bl* або *Bk*. Оскільки автори символів *Ba* і *Bl* обидва виконували дослідження на матеріалі пшениці із синім зерном, колір якого походить від пирію *Agropyron elongatum*, то очевидно що символи *Ba* і *Bl* відносяться до одного й того самого гена. Автори праці [30] вивчали кілька ліній з синім зерном, колір якого походить від пирію *Thinopyrum ponticum* Podp. (синонім *Agropyron elongatum*) та жита. В результаті було встановлено, що синій колір зерна у трьох ліній пшениці контролюють два доміантні комплементарні гени, а в одній лінії колір визначав один доміантний ген.



Рис. 4. Ксенійність: різнобарвні зернівки в одному колосі пшениці [23]

У дослідях різних авторів було також встановлено, що чорний і фіолетовий кольори зерна пшениці мають «материнський» характер успадкування, тобто цей тип пігментації локалізований у диплоїдній ($2n$) тканині перикарпу (оболонки) зерна, тоді як синій колір зерна виявляє ксенійність, а відповідна пігментація зосереджена в алеїроновому шарі зернівки, який подібно до ендосперму утворюється з триплоїдної ($3n$) тканини. В останньому випадку залежно від типу схрещування за кольором зерна виявляється ксенійність, і в одному й тому ж колосі рослини можна знайти зерна з різним забарвленням (рис. 4) [23].

Світова селекція нині 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 найвідоміші такі сорти, як Heibao-shi 1, Hedongwumai 526, Luozen 1, Heilixiaomai 1, Heilixiaomai 76, Gaoyuan 115, Huanpu 1, Zhouheimai 1, Shandongzimai 1 [34]. Кілька сортів пшениці з фіолетовим зерном районовані в Австралії [35].

На сьогодні також відомо кілька сортів пшениці з синім зерном, створених у різних країнах світу. Серед них сорт Tscherma's Blaukorniger Sommerweizen, Blue CI 12025 (США) [21], сорт Skorpion (Чехія, Австрія) [31] (рис. 5), сорт Sebesta Blue [32], лінія UC66049 і сорт Thatcher Blue (США) [33], сорт Xiao Yan (Китай) [34].

При створенні цих сортів пшениці часто використовували генетичні джерела, отримані внаслідок віддаленої гібридизації. Синє за-



Рис. 5. Синє зерно пшениці чеського сорту Skorpion, який занесений у реєстр сортів Австрії [31]

барвлення алейронового шару зернівки низки цих сортів зумовлене наявністю в ньому антоціанінів, біосинтез яких контролюють два гени: *Ba1* і *Ba2*. Ген *Ba1* локалізований у довгому плечі хромосоми 4В (4BS-4el₂), яке цілком перенесене в хромосому 4В пшениці від пирію *Thinopyrum ponticum* Podp. у формі робертсонівської хромосомної транслокації [29]. Ген *Ba2* розміщений у довгому плечі хромосоми 4A^m дикорослої пшениці-однозернянки *Triticum monoccum* L. і перенесений у хромосому 4А пшениці від цього виду [36]. Синє зерно таких сортів пшениці має високий вміст антоціаніну дельфінідин-3-глюкозиду (delphinidine-3-glucoside) та незначні кількості дельфінідин-3-рутинозиду (delphinidine-3-rutinoside), ціанідин-3-глюкозиду (cyanidin-3-glucoside) і 3-ціанідинрутинозиду (3-cyanidin rutinoside) [37].

Найвідомішими джерелами синього кольору зерна, які активно використовуються в селекції культурної пшениці, є такі дикорослі види, як *Triticum boeoticum*, *Agropyron glaucum*, *Agropyron tricholophorum*, *Agropyron elongatum* [21]. Кілька європейських сортів гексаплоїдної пшениці — Berlin, Probstdorf, Tschermak, Weihenstephan — отримали синій колір зерна внаслідок повного заміщення хромосоми 4А на чужинну хромосому, тоді як сорти із синім зерном Brunn і Moskau несуть чужинне заміщення хромосоми 4В, причому обидві хромосоми 4А і 4В у цих сортів заміщені на чужинну хромосому 4А від *Triticum boeoticum* або *Triticum monoccum*. Водночас у китайського сорту пшениці Xiao Yan синій колір зерна є результатом заміщення хромосоми 4D на гомеологічну хромосому *Agropyron elongatum* [34]. Кілька сортів пшениці несуть гени, що контролюють синє забарвлення алейронового шару зернівки (*Ba*), від таких дикорослих видів, як *Th. ponticum* (*Ba1*), *T. monoccum* (*Ba2*), *T. boeoticum* (*Ba2*), *Th. bucranium* (*BaThb*) [29, 36, 41, 42].

Як генетичний контроль, так і біосинтез антоціанінів наразі достатньо добре досліджені. Пігментація зерна пшениці починає проявлятися вже на 21—25-ту доби після виколошування, максимальна концентрація пігментів спостерігається в середині фази формування зернівки.

Пігмент дельфінідин визначає синій колір зернівки, тоді як перларгонідин і ціанідин відповідальні за червоний і фіолетовий кольори зерна відповідно [37—39]. Чорний колір зернівки пшениці є результатом комбінування ефектів антоціанінових генів у перикарпі й алейроновому шарі [40].

Пшениця і ячмінь мають подібні типи пігментації зерна за участю одних і тих самих антоціанінів (див. рис. 2 і 3). Особливості метаболізму антоціанінів, їх генетичний контроль і біологічна цінність кольорового зерна ячменю наразі також доволі добре вивчені. Встановлено, що природні пігменти зерна антоціаніни пшениці й особливо ячменю мають антиоксидантну активність вищу навіть за антиоксидантну активність популярних вітамінів С і Е [43].

Хоча геном ячменю як геном диплоїда «простіший» за геном гексаплоїдної пшениці, генетичний базис, наприклад, синього забарвлення зерна ячменю складніший за генетичний базис цієї ознаки у пшениці. Синє забарвлення алейронового шару зернівки ячменю контролюють щонайменше п'ять комплементарно домінантних

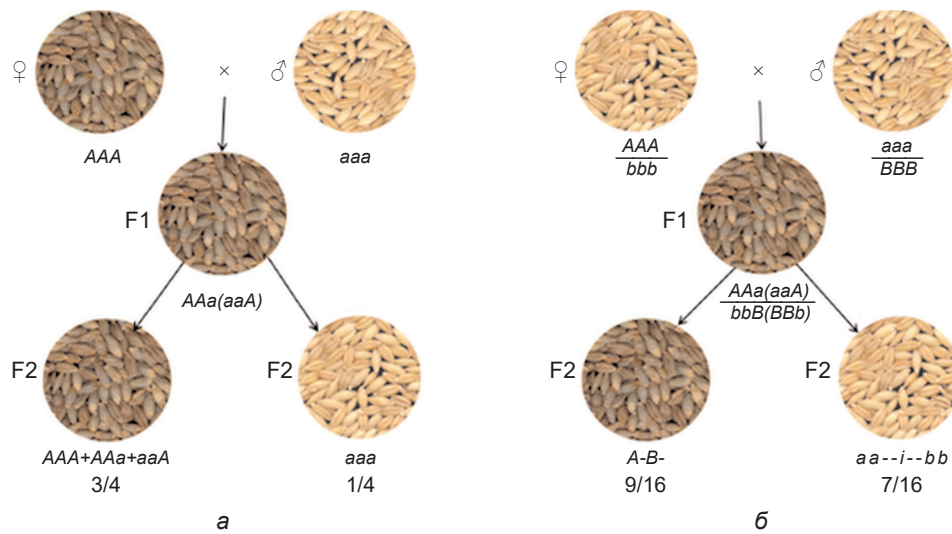


Рис. 6. Успадкування синього забарвлення зерна ячменю за типом моногібридного схрещування з домінантним ефектом гена (*а*), та за типом дигібридного схрещування з комплементарним ефектом двох домінантних генів (*б*) [47]

локусів з яких три тісно зчеплені й зосереджені на хромосомі 4HL (*Blx1*, *Blx3*, *Blx4*) і два — на хромосомі 7HL (*Blx2*, *Blx5*) [44, 45]. У локусі *Blx1* ячменю ідентифіковано тригенний кластер MbHF35, що займає на хромосомі 4HL інтервал у ~1,13 Mb і містить гени *HvMYB4H*, *HvMYC4H* та *HvF35H*. Подібний генетичний базис домінантного локусу *Ba1* у пшениці, де ідентифіковано такі ж самі ортологічні гени: *TaMYB4H*, *TaMYC4H* та *TaF35H* [46].

Рис. 6, 7 ілюструють результати досліджень успадкування синього забарвлення зерна ячменю у двох бінарних комбінаціях схрещування. В одній комбінації (див. рис. 6, *а*) відмінність між компонентами схрещування за ознакою «синє зерно» контролює один



Рис. 7. Ксенійність ячменю за ознакою «синє зерно». В одному колосі рослини F_1 зернівки синього і жовтого кольорів [47]

домінантний ген, в іншій — два домінантні гени з комплементарним ефектом взаємодії (див. рис. 6, б). У другому випадку синє забарвлення зерна виявляється лише тоді, коли обидва домінантні алелі двох генів знаходяться в одному генотипі одночасно. Окремо кожен домінантний алель не приводить до появи синього пігменту в алеїроновому шарі зернівки. У триплоїдному алеїроновому шарі зернівок F_2 рослини F_1 в одному й тому самому колосі спостерігається ксенійність (див. рис. 7).

Крім синього пігменту зерно ячменю містить також антоціаніни, що надають йому фіолетового і чорного забарвлення. Фіолетову пігментацію ячменю контролюють 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 відрізнятися [50].

Подібно до пшениці успадкування чорного і фіолетового кольорів зерна ячменю супроводжується материнським ефектом вияву відповідних генів у рослин F_1 (рис. 8), що свідчить про локалізацію експресії генів чорного і фіолетового забарвлення у диплоїдній тканині зернової оболонки [50].

Чорний колір як перикарпу зернівки, так і зернової плівки, контролює ген *Blp* (black lemma pericarp), розміщений на хромосомі 1HL [48, 49], причому чорна пігментація зернівки ячменю виявляється через наявність у клітинах перикарпу головно меланіноподібних пігментів [51]. Рослинні «меланіни» — це узагальнювальний термін для групи високомолекулярних чорно-коричневих пігментів як нерегулярних полімерних молекул, що утворюються внаслідок окиснення й полімеризації фенольних сполук. Хоча чорна пігментація зернівки ячменю є дуже важливою агрономічною ознакою, пов'язаною зі стійкістю рослин ячменю до стресових чинників середовища і грибних інфекцій, шляхи біосинтезу чорних пігментів зерна ячменю вив-

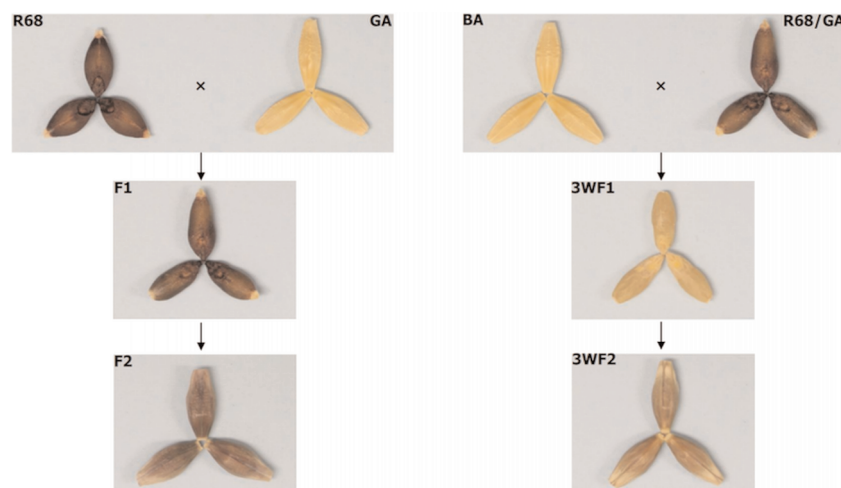


Рис. 8. Типовий «материнський» ефект в успадкуванні фіолетового забарвлення зернівки ячменю [50]

чені недостатньо. Багато авторів досліджень вважає, що чорний колір зерна ячменю є результатом наявності меланіноподібних пігментів у суміші з антоціанінами та іншими копігментами, які роблять істотний сумарний внесок до загального вмісту фенольних сполук у зерні ячменю [52, 53].

Кольорове зерно пшениці та ячменю останнім часом привертає особливу публічну увагу перш за все через його високу антиоксидантну активність і клінічно доведені безперечні переваги над зерном традиційних сортів цих культур за відповідним позитивним впливом на фізичне здоров'я людини. Крім того, підвищений вміст у зерні пшениці та ячменю кольорових пігментів має безпосереднє агрономічне значення, оскільки вони пов'язані зі стійкістю рослин до стресових чинників середовища вирощування та різноманітних інфекцій [54].

На сьогодні в різних лабораторіях світу накопичено і систематизовано достатньо експериментальних генетичних, фізіолого-біохімічних і клінічних даних, які свідчать про високий вміст у зерні кольорових сортів пшениці та ячменю пігментів антоціанів і фенольних сполук — стратегічно важливих чинників біофортificaції зерна, що забезпечують його функціональність як цінного харчового продукту. Особливо багато подібних досліджень виконано в лабораторіях таких країн, як Китай та Індія, де створенню кольорових пшениць і ячменів приділяють особливу увагу.

В одній із недавніх китайських публікацій наведено дані щодо визначення у зерні різних кольору, розміру і маси 180 сортів озимої пшениці вмісту загальних фенольних сполук, флавоноїдів, каротиноїдів і загальної антиоксидантної активності зерна [55]. Вміст у зерні загальних фенольних сполук варіював від 492 до 1313 мкмоль/100 г. Найвищий середній вміст фенольних сполук виявлений у шести досліджених сортів чорнозерної пшениці (909 мкмоль/100 г), достовірно нижчий (824 мкмоль/100 г) — у сортів червонозерної пшениці, найнижчий (724 мкмоль/100 г) у сортів білозерної пшениці.

Вміст у зерні флавоноїдів варіював у середньому від 14,7 до 39,7 мкг/г. Найвищий їх вміст у зерні (36,1 мкг/г) був у сортів пшениці з чорним зерном, середній (29,0 мкг/г) — у сортів із червоним зерном, найнижчий (24,1 мкг/г) — у зерні пшениці з білим зерном. Однак, незважаючи на різницю за середнім вмістом флавоноїдів, деякі сорти білозерної пшениці містили флавоноїдів більше, ніж червонозерні сорти.

За вмістом у зерні каротиноїдів (6,0 мкг/г) чорнозерні пшениці переважали білозерні (3,2 мкг/г) червонозерні (3,1 мкг/г).

Найвищу антиоксидантну активність ($8,3 \text{ ммоль/дм}^3 \cdot 100 \text{ г}$) мало зерно у чорнозерних сортів, найнижчу ($3,1 \text{ ммоль/дм}^3 \cdot 100 \text{ г}$) — зерно червонозерних сортів.

Цікавим виявився зв'язок між масою зерна і дослідженими компонентами його харчової цінності. Достовірну негативну залежність виявлено між масою зерна, вмістом у ньому каротиноїдів та антиоксидантною активністю (відповідно $r = -0,979$ і $r = -0,861$) [55].

В іншій роботі китайські вчені досліджували вміст фенольних сполук, флавоноїдів та антиоксидантну активність у зерні й борошні

різного помелу та продуктах переробки зерна трьох сортів пшениці з кольоровим зерном порівняно з білозерним сортом. Сорт із чорним зерном Heibaoshi 1 містив найбільше фенольних сполук (659,8 мкг-екв галової кислоти на 1 г), загальних флавоноїдів (319,3 мкг-екв рутину на 1 г) і мав найвищу антиоксидантну активність. Антиоксидантна активність оббивного (цілозмеленого) борошна чонозерної пшениці виявилась істотно вищою, ніж рафінованого білого борошна й частково обеззоленого борошна цього ж сорту, як і продуктів, виготовлених із такого борошна. Автори дійшли висновку, що найвищу біологічну цінність мають продукти, виготовлені із цілозмеленого зерна чорнозерної пшениці [56].

Співробітники чотирьох університетів Китаю досліджували комплекс питань, пов'язаних із харчовою цінністю китайських сортів пшениці Zhouheimai 1, Shandongzimai 1 із фіолетовим зерном, порівняно з сортами пшениці з червоним і білим зерном [9]. Вони вивчали накопичення фенольних сполук у зерні в процесі його розвитку, експресію профілів фенольних кислот та активність генів, що кодують біосинтез фенольних кислот у зерні різного кольору.

Фіолетове забарвлення зерна пшениці чітко виявлялось вже на 21-шу добу після цвітіння (рис. 9), тоді як забарвлення білого і червоного зерна ставало помітним на 28-му добу після цвітіння. В дослідженні встановлено, що найбільший вміст у зерні фенольних сполук і найвищу антиоксидантну активність зерна порівняно із сортами з білим і червоним зерном мали обидва сорти пшениці з фіолетовим зерном. Рівень зв'язаних фенольних кислот (ферулової, ванільної, кофеїнової) був істотно вищим у сорту з фіолетовим зерном, ніж у червоному й білому зерні, тоді як рівень загальних розчинних ферулової і ванільної кислот був значно вищим у фіолетовому і червоному зерні порівняно з білим.

Дев'ять досліджених генів, відповідальних за метаболічні шляхи біосинтезу фенольних кислот (*TaPAL1*, *TaPAL2*, *TaC3H1*, *TaC3H2*, *TaC4H*, *Ta4CL1*, *Ta4CL2*, *TaCOMT1*, *TaCOMT2*), виявлялися у процесі наливання зерна як три чітко різні фази експресії, що пов'язано з накопиченням різних фенольних кислот. Білозерні сорти характе-

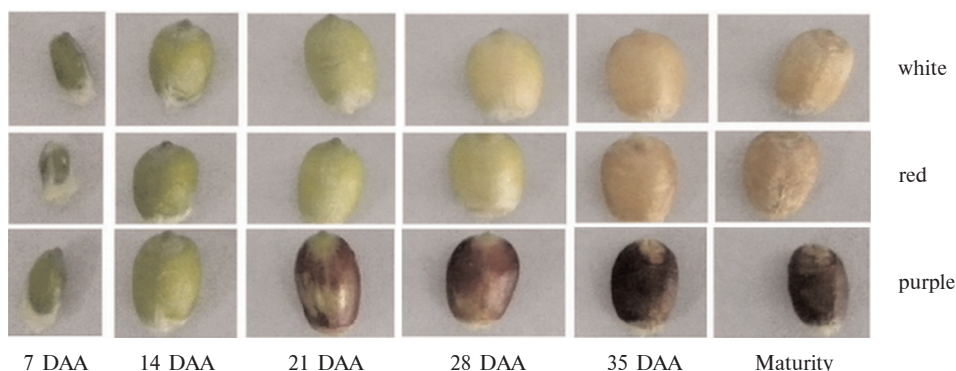


Рис. 9. Вияв пігментації фіолетового (purple), червоного (red) і білого (white) забарвлення зерна пшениці через 7 діб після цвітіння (7 DAA) до повного дозрівання (maturity) [9]

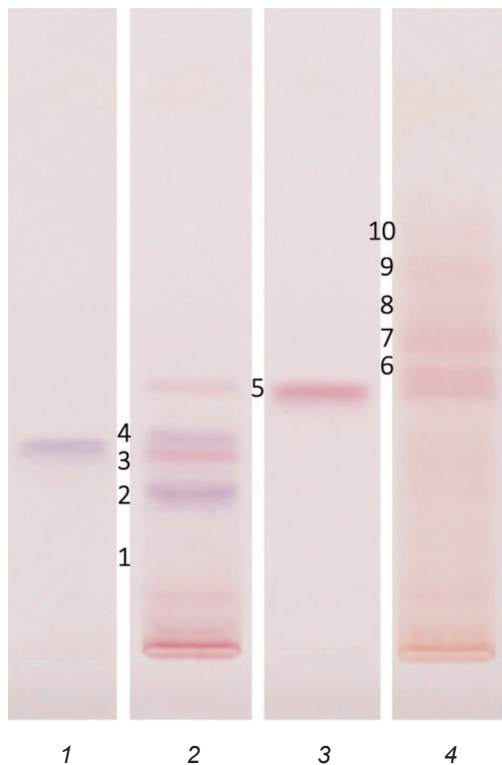


Рис. 10. HPTLC хроматограма антоціанінів висівок пшениці:

a — міртилін (дельфінідин-3-О-глюкозид)хлорид — стандарт; *b* — синій алейроновий шар; *c* — куро-манін (ціанідин-3-О-глюкозид)хлорид — стандарт; *d* — фіолетовий перикарп. Десять цільових зон позначено цифрами [57]

ризувалися вищим рівнем експресії досліджуваних генів у ранні фази наливання зерна, тоді як сорти з фіолетовим зерном мали найвищий вміст фенольних кислот і відповідно вищу активність експресії генів у пізні фази наливання зерна. Автори наголосили на чіткій відповідності між рівнем експресії генів біосинтезу фенольних кислот і рівнем накопичення фенольних кислот у зерні [9].

Одним із завдань селекції пшениці, яке активно включили у програми створення сортів культури з кольоровим зерном, є підвищення вмісту в зерні антоціанінів і фенольних сполук. Серед селекційно орієнтованих досліджень на цю тему як приклад можна навести оригінальну роботу австрійських учених із Віденського університету природних ресурсів та науки про життя (відділ рослинництва) [58]. Автори цієї праці досліджували серію перспективних

селекційних ліній пшениці, дібраних із популяцій від бінарних схрещувань типу синє зерно × фіолетове зерно, за участю кількох сортів пшениці з кольоровим зерном: Amethyst, Charcoal, Indigo, Konini, Otello, Rosso.

Для ідентифікації генотипів пшениці з комбінацією різних антоціанінів, автори скористались високопродуктивним методом аналізу — тонкошаровою хроматографією (HPTLC, high-performance thin-layer chromatography), яку вони вважали найпридатнішою для оцінювання селекційного матеріалу в процесі створення сортів пшениці з кольоровим зерном і підвищеним вмістом у зерні антоціанінів (рис. 10). Для опрацювання методу HPTLC була спеціально виконана дисертаційна робота [57]. У результаті авторам вдалося виділити перспективні селекційні лінії пшениці, що комбінували гени *Ba* + *Pp* (рис. 11), із вмістом у висівках антоціанінів до 1289,6 мкг/г, що істотно перевищувало значення вихідних сортів пшениці Amethyst (132,2 мкг/г), Charcoal (74,0), Indigo (174,8), Konini (79,3), Otello (93,8), Rosso (47,5), задіяних у схрещуваннях [58].

Подібне завдання, а саме, комбінування генів *Ba* і *Pp* з метою підвищення вмісту в зерні пшениці антоціанінів, вирішували інші



Рис. 11. Зміна кольору зерна пшениці в результаті комбінування антоціанінів у різних шарах зернівки:

a — біле зерно без антоціанінів; *б* — фіолетовий перикарп (ген *Pp*); *в* — синій алеїроновий шар (ген *Ba*); *г* — інтенсивний фіолетовий (чорний) (ген *Pp* + ген *Ba*) [58]

австрійські вчені за участю співробітників трьох університетів. Аналіз доборів у кількох популяціях від бінарних схрещувань показав, що більшість виділених генотипів містила антоціаніни в межах значень вихідних компонентів схрещування. Однак було виділено кілька генотипів типу *Ba* + *Pp*, які за вмістом у зерні антоціанінів істотно перевищували батьківські сорти. Склад індивідуальних антоціанінів у цих генотипів було досліджено комбінуванням високоефективної рідинної хроматографії та мас-спектрометрії (HPLC-MS) [59].

Канада як один із провідних світових виробників і експортерів пшениці також є лідером у дослідженні та створенні сортів кольорової пшениці. Як приклад наведемо селекційно орієнтовані дослідження, виконані вченими дослідних центрів Канади у співробітництві з фахівцями Інституту генетики злаків Китаю [19]. Автори цієї праці досліджували успадкування чорного, фіолетового та синього забарвлення зерна в кількох комбінаціях схрещування кольорових сортів і селекційних ліній пшениці Китаю з комерційними сортами пшениці Канади та опрацьовували метод NIR (Near Infrared) спектроскопії для ідентифікації типів зерна за його кольором при здійсненні індивідуальних доборів у селекційних популяціях. Із цією метою був успішно використаний інфрачервоний аналізатор Foss моделі 6500 (Foss NIRSystems Inc. Silver Spring, USA), за допомогою якого можна розділити класи зерна селекційних ліній пшениці з нечіткими візуальними відмінностями за відтінками та дібрати стабільні за кольором зерна селекційні лінії [19].

В іншій праці ці ж автори на основі NIR спектроскопії запропонували генетичну модель успадкування в F_2 чорного, фіолетового і синього кольорів зерна в шести популяціях від схрещування китайських кольорових сортів пшениці з ярими канадськими сортами. Отримані селекційні лінії кольорової пшениці схарактеризовані за комплексом показників харчової цінності зерна. Автори також дійшли висновку, що препарати кольорових пігментів антоціанінів, виділені із зерна пшениці, мають важливу перспективу використання у харчовій промисловості як натуральні замінники широковживаних нині синтетичних барвників, несумісних із функціональним статусом продуктів харчування [60].

Створення сортів пшениці з функціональним статусом є одним із важливих пріоритетів селекціонерів Чехії [35, 118—120]. Генетичне джерело гена *Pp* (фіолетовий перикарп) у програмах чеських селекціонерів — інтрогресивні лінії пшениці, в яких ген *Pp* походить від тетраплоїдної пшениці *Triticum turgidum* L. subsp. *abyssinicum* Vavilov із регіону Абіссинія, що в Ефіопії. Ця пшениця містить антоціаніни у перикарпі зернівки. Антоціаніни ціанідин-3-глюкозид, ціанідин-3-рутинозид та сукцинілглюкозид становлять основну масу антоціанінів зернівки цієї пшениці. Середній вміст антоціанінів у зерні 104 мг/кг, у висівках — 251 мг/кг [39]. На базі цього джерела чеські селекціонери створили два сорти пшениці з фіолетовим зерном: Purple Feed (гени *Pp1*, *Pp2* на хромосомах 7B, 7A) і Purple (*Pp1* і *Pp3*). Ген *Pp3* містить два алелі *Pp3a* і *Pp3b*, локалізований у прицентромерному регіоні хромосоми 2A. Гени *Pp1* і *Pp3* чинять комплементарний ефект [61]. Цікаво, що при годівлі курей пшеницею з фіолетовим зерном було отримано приріст маси м'яса на 6,2 % та більшу кількість яєць на 3,4 % [62].

Чеські селекціонери також активно працюють над створенням сортів пшениці з синім зерном [35]. Як джерело гена *Ba1* у селекційних програмах вони використовують сорт Sebesta Blue з хромосомною транслокацією 4BS-4eL₂ у хромосомі 4B від пирію *Thinopyrum ponticum* Pdp. Генетичним джерелом гена *Ba2* слугує сорт Thatcher Blue, який отримав цей ген від дикорослої пшениці *T. boeoticum* у хромосомі 4A^mL. Ще один, менш відомий ген синього кольору алейрону, у китайського сорту пшениці Xiao Yian локалізований у хромосомі 4D і походить від пирію *Agropyron elongatum*. Домінуючими антоціанінами синього алейрону є дельфінідин-3-глюкозид та дельфінідин-3-рутинозид зі слідами ціанідин-3-глюкозиду і ціанідин-3-рутинозиду. Оббивне борошно пшениці із синім алейроном містить у середньому 157 мг/кг антоціанінів, висівки — 458 мг/кг. Загалом зерно із синім алейроном містить антоціанінів дещо більше, ніж зерно з фіолетовим перикарпом [63]. Донори синього алейрону види пирію *Ag. elongatum* та *Th. ponticum* є генетично гетерогенною групою декаплоїдів із хромосомною конституцією $2n = 10x = 70$ (StStEeEbEx) і потенційним джерелом нових для селекції генів *Ba* [35]. Створений чеськими селекціонерами сорт пшениці Skorpion із синім алейроновим шаром зернівки районований у 2011 р. в Австрії і занесений до Каталогу сортів ЄС, хоча він дещо поступається за урожайністю зерна сортам-стандартам ЄС [31].

На сьогодні відомо багато селекційно орієнтованих досліджень, спрямованих на створення сортів пшениці з кольоровим зерном, оглянути всі їх практично неможливо. Однак не звернути увагу на справді фундаментальні праці у цьому напрямі, буде значним упущенням. Такою фундаментальною працею є дослідження індійських авторів із Національного агробіотехнологічного інституту (NABI, Індія, штат Пенджаб) [8]. Метою цього дослідження 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 виконання програми було створено перспективні селекційні лінії пшениці з кольоровим зерном, які дещо поступалися вихідним сортам пшениці за врожайністю зерна, не поступалися стандартам за комплексом інших агрономічно цінних ознак та істотно переважали останні за вмістом антоціанінів і цинку. Найвищий вміст антоціанінів зафіксовано в селекційних лініях із чорним зерном, нижчий — у ліній із синім зерном, ще нижчий — у ліній із фіолетовим зерном. Селекційні лінії схарактеризовані також за вмістом індивідуальних антоціанінів за допомогою методу сучасної мас-спектрометрії TOF-MS і TOF-MS/MS. У результаті ідентифіковано і визначено кількість індивідуальних антоціанінів в ліній із чорним зерном — 26, у ліній із синім зерном — 22, у ліній із фіолетовим зерном — 23 [8].

Отримані селекційні лінії схарактеризовані цитологічно за допомогою кріосекціонування зерна на кріомікромом/кріостаті ультратонких (20 мкм) зрізів зернівки (рис. 12).

Отримані селекційні лінії з чорним зерном комбінують синій алейрон з чорним перикарпом, а лінії з синім зерном мають інтенсивний синій колір алейрону (див. рис. 12).

Сорти кольорових пшениць в Індії стають дуже популярними, недарма відоме індійське видання «The Economic Times Magazine» від 02 серпня 2019 р. опублікувало резонансну статтю «How Purple is My Roti» за результатами досліджень зерна кольорових пшениць кількох університетів Індії, в тому числі NABI. Roti (Roti) — найпопулярніший різновид плоского хліба в Індії, частину якого вже випікають із чорнозерної пшениці. У статті прогнозувалось стрімке зростання в Індії площ посіву сортів кольорової пшениці і встановлення преміум

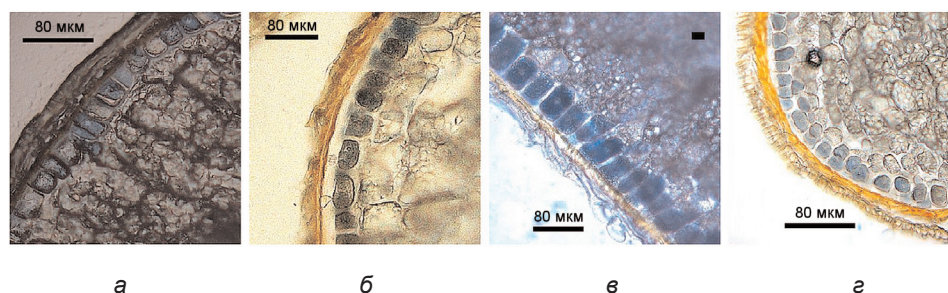


Рис. 12. Ультратонкі зрізи зернівок із чорним перикарпом (а — селекційна лінія, б — донор чорного перикарпу) і синім алейроновим шаром (в — селекційна лінія, г — донор синього алейрону) [8]

ціни на її зерно. У перспективі можливо, що досить значна частка сортів пшениці Індії (якщо не всі) матиме кольорове зерно [64].

Візуальний контроль забарвлення зерна у процесі селекції сортів кольорової пшениці не є достатньо надійним, оскільки синій, фіолетовий чи чорний колір супроводжується перехідними відтінками. З метою підвищення результативності селекції пшениці з кольоровим зерном візуальний контроль забарвлення зерна може бути доповнений NIR-аналізом, поліморфними мікросателітними маркерами або цитологічним контролем хромосом. Приклад використання мікросателітних ДНК-маркерів для контролю генів забарвлення перикарпу (*Pp*), фіолетової луски (*Pg*), фіолетового стебла (*Pc*), фіолетової листової піхви (*Pls*) і фіолетової листової пластинки (*Plb*) наведено у формі генетичної карти, сконструйованої для твердої пшениці *T. durum* на рис. 13 [65].

Як приклад ефективного використання цитологічного контролю цільового генетичного матеріалу в селекційних програмах створення сортів пшениці з кольоровим зерном можна навести спільне дослідження селекціонерів і цитогенетиків трьох науково-дослідних установ Чехії. У праці використано метод геномної *in situ* гібридизації ДНК (GISH/FISH) для контролю в селекційних лініях пшениці транслокаційних фрагментів хромосоми 4Ag пирію *Th. ponticum*, який слугував донором синього забарвлення алейронового шару зернівки пшениці (рис. 14) [66].

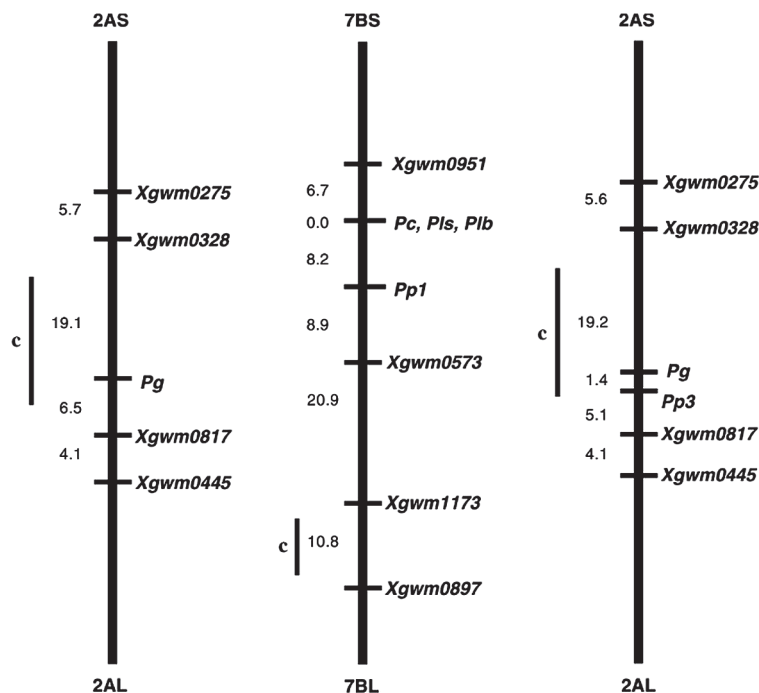


Рис. 13. Генетична карта розміщення генів фіолетового забарвлення перикарпу зернівки пшениці (*Pp*), фіолетової луски (*Pg*), фіолетового стебла (*Pc*), фіолетової листової піхви (*Pls*) та фіолетової листової пластинки (*Plb*) відносно маркерних мікросателітних локусів *Xgwm*. Відстані між локусами на генетичній карті подані у сантиморганах (сМ) [65]

Багатий на антоціаніни ячмінь із кольоровим зерном як функціональний продукт має також величезний потенціал для поліпшення фізичного здоров'я організму людини. Для успішної селекції сортів кольорового ячменю, як і пшениці, важливе значення мають дослідження генетичного контролю антоціанінів та локалізації в хромосомах генів, що детермінують біосинтез антоціанінів.

Прикладом фундаментального дослідження у цьому напрямі є спільна, вже цитована, праця двох колективів учених із CSIRO (Австралія) та Університету провінції Сичуань (Китай) [50]. Колективи авторів досліджували генетичний контроль індивідуальних антоціанінів у ячменю з фіолетовим зерном. Із десяти відомих у ячменю з фіолетовим зерном антоціанінів кількісно домінували два: пеонідин-3-глюкозид (P3G) і ціанідин-3-глюкозид (C3G). Картування хромосом за допомогою QTL показало, що обидва антоціаніни є інтерактивним продуктом двох локусів: один у хромосомі 2HL, інший — у хромосомі 7HS. Однак схоже, що два різних антоціаніни контролюються за наявності взаємодії між цими двома локусами. Ефект локусу *PBG.ant-7H* хромосоми 7HS на P3G і C3G було складно визначити на фоні експресії локусу *PBG.ant-2H* хромосоми 2HL. Щонайменше однієї копії локусу 2HL достатньо для синтезу P3G. Однак, це не стосується антоціаніну C3G, для біосинтезу якого потрібні різні комбінації алелів цих двох локусів. При успадкуванні локусів 7HS і 2HL чітко виявлявся материнський ефект на колір фіолетового перикарпу зернівки ячменю. Автори дійшли висновку, що для успішної селекції на вміст антоціанінів ячменю з фіолетовим зерном важливо виконувати цільовий контроль індивідуальних антоціанінів [50].

На підставі результатів дослідження авторів цитованої праці сконструйовано генетичну карту для QTL-залежної детекції на хромосомах 7HS і 2HL локусів *PBG.ant*, що кодують біосинтез антоціанінів (рис. 15). У дібраних за допомогою QTL генотипів ячменю з фіолетовим зерном вміст C3G становив 20,6 мкг/г, P3G — 5,3 мкг/г за слідових вмістів цих антоціанінів у звичайному зерні ячменю [50].

Чорна пігментація перикарпу зернівки і квіткової плівки ячменю на відміну від фіолетової зумовлена не флавоноїдами антоціанінами, а фітомеланінами (окисненими й полімеризованими

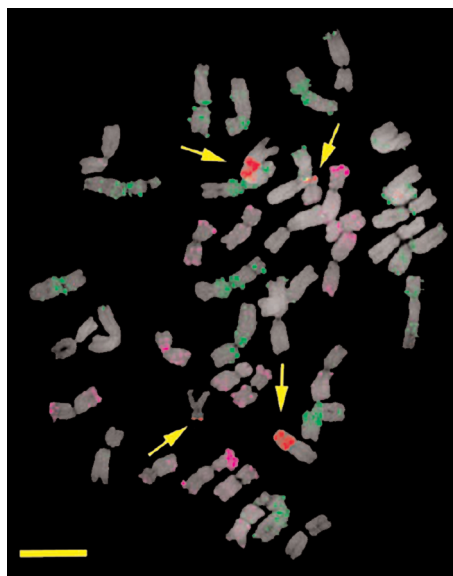


Рис. 14. Результат цитологічного аналізу генотипів пшениці із синім алейроновим шаром зернівки методом *in situ* гібридизації ДНК (GISH/FISH). Червоним кольором позначено сегменти хромосом *Th. ponticum* [66]

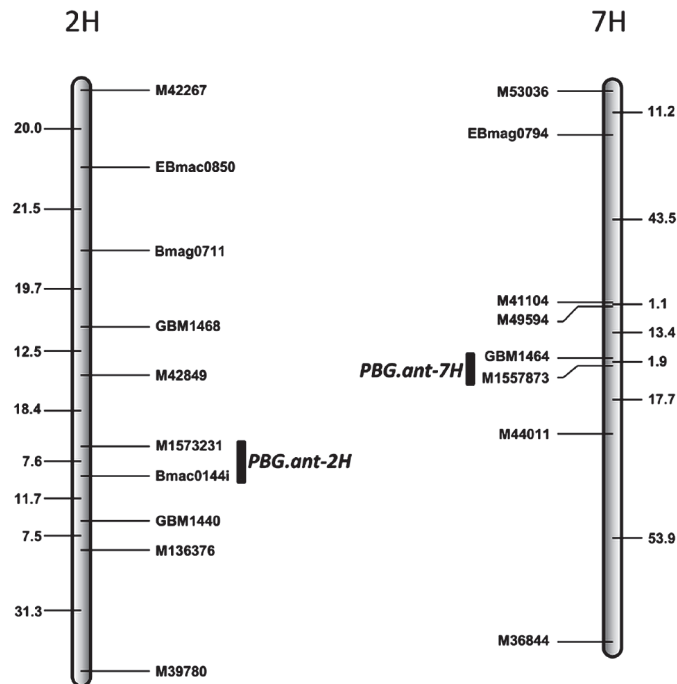


Рис. 15. Генетична карта QTL-залежного визначення положення локусів *PBG.ant* на хромосомах 7HS і 2HL ячменю. Відстані між локусами на генетичній карті наведені у санти-морганідах (сМ) [50]

фенольними сполуками) і контролюється *Blp* локусом [51], розміщеним на хромосомі 1HL [67, 68].

З метою ефективної ідентифікації гена *Blp* у селекційних популяціях колектив авторів із двох університетів Австралії і трьох дослідних установ Китаю виконав тонке картування локусу *Blp* на довгому плечі хромосоми 1HL (рис. 16) [69].

Майже ізогенні лінії ячменю, що відрізнялися за алельним складом локусів *Ant1* (хромосома 7HS) і *Ant2* (хромосома 2HL), які контролюють фіолетове забарвлення перикарпу зернівки, створені й досліджені співробітниками Сибірського відділення Російської академії наук [70]. У роботі використано молекулярні маркери для детекції в селекційних популяціях двох домінантних генів фіолетового забарвлення перикарпу *Ant1* (хромосома 7HS) та *Ant2* (хромосома 2HL) і їх хромосомної локалізації, чітко продемонстровано ефект комплементарної взаємодії цих генів. Фіолетове забарвлення зернівки ячменю виявилось лише за наявності в одному генотипі обох домінантних генів *Ant1* і *Ant2*, а вміст антоціанінів сягав майже 140 мкг/г сухої речовини зерна, тоді як за наявності одного з цих домінантних генів у гетерозиготі чи у стані рецесивної гомозиготи фіолетове забарвлення зернівки було відсутнє, а вміст антоціанінів не перевищував 18 мкг/г [70].

На сьогодні опубліковано результати сотень наукових досліджень, в яких наведено всебічну характеристику пшениці та ячменю з кольоровим зерном, починаючи від біохімічного складу зерна, клінічних досліджень впливу антоціанінів на піддослідні біологічні

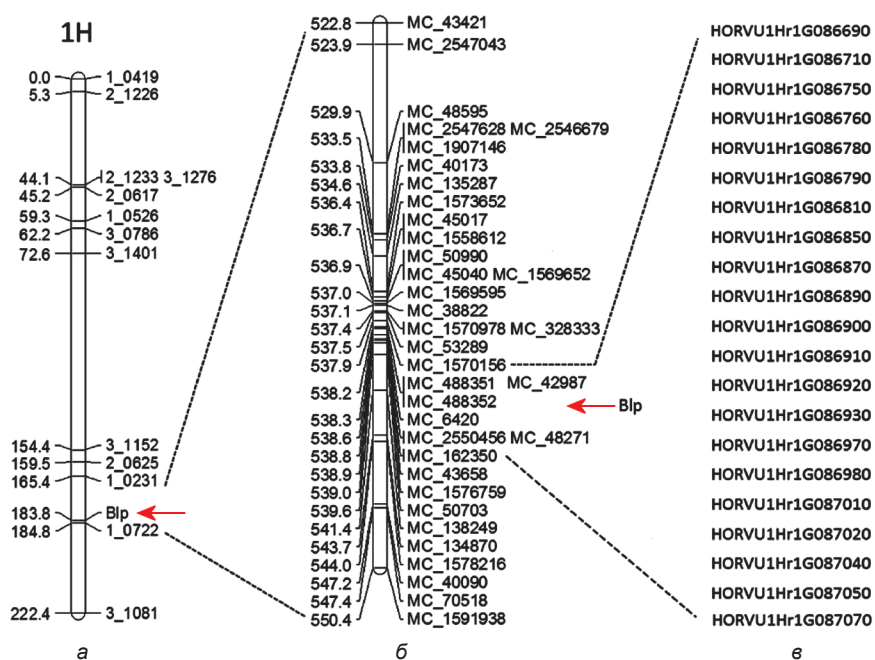


Рис. 16. SNP-маркерорієнтована позиція (а) локусу *Blp* на генетичній карті хромосоми 1HL ячменю [69]

об'єкти до агрономічних характеристик уже створених сортів пшениці та ячменю з кольоровим зерном. Оглянути весь наявний фактичний матеріал практично не можливо, а це означає, що кольорові пшениця та ячмінь приваблюють широке коло наукових колективів світу різних напрямів дослідження, цій темі приділяється належна увага, як стратегії створення нових продуктів функціонального харчування із зерна популярних злаків [71].

Головною відмінністю пшениць і ячменів із кольоровим зерном, як уже наголошувалось, є підвищений вміст у зерні біологічно активних антоціанінів, високий загальний вміст фенольних сполук і висока антиоксидантна активність зерна порівняно зі звичайним зерном без синього, фіолетового чи чорного забарвлення.

Закцентуємо увагу лише на окремих найґрунтовніших дослідженнях. Як приклад наведемо дані типового фундаментального сучасного дослідження, опублікованого у 2018 р. авторами Національного агробіотехнологічного інституту Індії (штат Пенджаб), у якому схарактеризовано перспективні кольорові селекційні лінії пшениці за комплексом ознак харчової цінності зерна [72].

Результати визначення антоціанінів і розчинних фенольних сполук у зерні перспективних селекційних ліній пшениці з різним забарвленням наведено в таблиці. Як бачимо, зразки кольорового зерна пшениці переважають білозерні за всіма дослідженими параметрами — вмістом у зерні антоціанінів, фенольних сполук та антиоксидантною активністю зерна, визначеною з використанням трьох різних лабораторних процедур. Важливо наголосити також, що з підвищенням вмісту антоціанінів у зразках кольорового зерна пшениці зростає також загальний вміст фенольних сполук, які сумарно

Вміст фітохімічних сполук та антиоксидантна активність зерна перспективних селекційних ліній пшениці із зерном різного кольору [72]

Колір зерна ліній пшениці	Сполуки		Антиоксидантна активність					
	TAC, ppm	SPC, ppm	DPPH		ABTS		PCL	
			IN, %	TROx, ppm	IN, %	TROx, ppm	IN, %	Acs, ppm
Білий	13,0	955	69,4	9,4	6,4	58,8	48,3	139
Синій	120,6	1203	77,0	14,2	28,2	97,5	161	775
Фіолетовий	122,5	1102	77,8	14,8	17,3	78,1	120	572
Чорний	135,8	1187	79,8	16,0	22,2	86,7	181	930

Примітка: TAC — загальний вміст антоціанінів; SPC — вміст розчинних фенольних сполук; DPPH, ABTS, PCL — різні тести на антиоксидантну активність; IN — відсоток інгібування; TROx — тролокс-еквівалент; Acs — еквівалент аскорбінової кислоти.

позитивно корелюють із загальною антиоксидантною активністю зерна (див. таблицю).

Автори праці [72] дослідили в культурі клітин *in vitro* протизапальну дію антоціанінів чорнозерної пшениці, а також їх вплив на життєздатність клітин макрофагів крові лабораторних мишей лінії RAW 264.7. Життєдіяльність клітин визначали за допомогою тесту МТТ, принцип якого полягає у трансформації метаболічно активними клітинами водорозчинної фарби МТТ у нерозчинний формазан. Тест виконували за наявності ліпополісахариду (LPS) як О-антигену. На клітини діяли свіжим екстрактом антоціанінів із чорнозерної і білозерної пшениці за його концентрацій 200, 400 і 800 мкг/мл (рис. 17).

Як за наявності, так і за відсутності LPS екстракти білозерної пшениці з підвищенням концентрації діючої речовини виявляли цитотоксичність і максимально знижували життєздатність клітин макрофагів до 80—90 %, тоді як за дії екстрактів антоціанінів чорнозерної пшениці життєздатність клітин зберігалась до рівня понад 80 %. Концентрація 300 мкг/мл була обрана оптимальною для оцінювання *in vitro* протизапальної активності екстрактів антоціанінів чорнозерної пшениці. В наступному досліді ці ж автори продемонстрували, що екстракти антоціанінів чорнозерної пшениці за їх концентрації 300 мкг/мл чинили інгібіторний ефект на LPS-індуковане утворення прозапальних цитокінів TNF- α й IL-1 β [72]. Аналогічні дані отримано при дослідженні екстрактів антоціанінів пшениці з фіолетовим і синім зерном.

На підставі даних власних та інших подібних досліджень автори дійшли висновку про величезний комерційний потенціал біофортифікованої пшениці з кольоровим зерном як цінної сировини для індустріального виробництва продуктів харчування із функціональним статусом [72].

В іншій цікавій роботі, виконаній за участю вчених трьох університетів Словаччини, Польщі і Німеччини, досліджували вміст біоактивних фітохімічних сполук таких як поліфеноли, флавоноїди, антоціаніни й антоціанідини (пеларгонідин, пеонідин, ціанідин, дельфінідин), та антиоксидантну активність зерна і 10-добових проростків зразків пшениці з кольоровим зерном. Дослідження проводи-

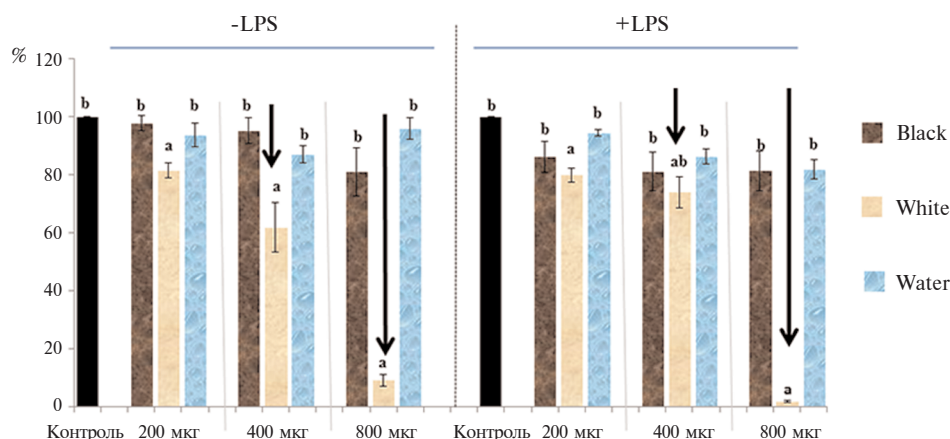


Рис. 17. Оцінка життєздатності клітин макрофагів крові мишей МТТ методом. Black — екстракти чорнозерної пшениці, White — екстракти білозерної пшениці, Water — контроль (чиста вода). Літерами позначено істотні відмінності [72]

ли на сортах пшениці з кольоровим зерном, створених у Науково-дослідному інституті сільського господарства Республіки Чехія (Kromeriz): КМ 53-14 (синє зерно), КМ 178-14 (фіолетове зерно), Skorpion (синє зерно), Karkulka (фіолетове зерно). Встановлено, що в зелених проростках зразків пшениці з кольоровим зерном вміст досліджуваних фітохімічних сполук, а також антиоксидантна активність були істотно вищими порівняно зі зразками традиційних сортів пшениці з жовтим зерном, причому вміст загальних антоціанінів, кверцетину і пеларгонідину в проростках зразків із фіолетовим зерном був значно вищим, ніж у зразках із синім і жовтим зерном. Загалом проростки зразків пшениці із фіолетовим зерном містили найбільше серед усіх досліджених зразків пеларгонідину, ціанідину і кверцетину, тому вони є потенційно цінною сировиною для виготовлення функціональних продуктів [73].

Учені Університету Менделя (Брно, Республіка Чехія) поставили за мету визначити антиоксидантну активність тканин печінки групи лабораторних щурів, які споживали корм із 100 % зерна пшениці сорту Konini з фіолетовим зерном, порівняно зі щурами, які споживали корм із 100 % зерна звичайної пшениці. Антиоксидантну активність тканин печінки щурів визначали чотирма різними лабораторними методами: DPPH, FR, FRAP та ABTS. Усі чотири методи показали істотне перевищення антиоксидантної активності тканин печінки тварин, яких годували пшеницею сорту Konini ($10,06 \pm 0,26$; $543,88 \pm 23,61$; $39,56 \pm 1,01$; $458,76 \pm 3,58$) порівняно з раціоном із зерна звичайної пшениці ($9,20 \pm 0,31$; $482,46 \pm 15,56$; $36,73 \pm 0,72$; $445,38 \pm 3,13$) [74].

Група співробітників двох університетів Німеччини (Університет Гейдельберга та Університет Кайзерслаутерна) досліджувала вплив екстрактів антоціанінів пшениці з фіолетовим зерном на тривалість життя модельного об'єкта личинок нематоди *Caenorhabditis elegans*. За джерело антоціанінів було обрано селекційну лінію фіолетової пшениці, створену селекціонером із Чилі. Ця лінія пшениці мала такий склад антоціанінів: ціанідин-3-О-глюкозид (42,6 %), пеонідин-3-О-

глюкозид (39,9 %), мальвідин-3-О-галактозид (17,4 %). Екстракт антоціанінів фіолетового зерна сповільнював старіння і сприяв подовженню тривалості життя личинок нематоди як дикого типу, так і її мутантної лінії *tev-1(hn1)*, дуже чутливої до оксидативного стресу, відповідно на 10,5 і 9,2 %. Автори дослідження пояснили відкритий феномен тим, що екстракт антоціанінів фіолетового зерна активує фактор транскрипції нематоди DAF-16/FOXO внаслідок інгібування в метаболічному шляху інсулін/IGF-1-подібного сигналу, що включає інсулін-рецептор DAF-2. Більше того, екстракт із зерна фіолетової пшениці підвищував стресостійкість нематоди й ослаблював наслідки оксидативного стресу. Автори вважають, що подібний ефект антоціаніни зерна фіолетової пшениці можуть чинити і в аналогічному метаболічному шляху організму людини [75].

Цілу серію досліджень було присвячено вивченню функціональності та позитивного впливу на здоров'я синього зерна різних селекційних ліній і сортів пшениці [76]. Автори цих досліджень рекомендували для щоденного вжитку дорослій людині до 215 мг антоціанінів на день [77]. Синє зерно пшениці порівняно з фіолетовим і звичайним червоним має вищий вміст та унікальний склад антоціанінів: у висівках — 460 мг/кг, у білому борошні — 200, в оббивному борошні — 160 мг/кг [49]. Синє зерно містить п'ять—вісім основних антоціанінів, тоді як фіолетове і червоне — лише три. Це означає, що й антиоксидантна активність синього зерна пшениці вища, ніж фіолетового і червоного. Вміст антоціанінів у синьому зерні пшениці менш варіює залежно від року та умов вирощування порівняно з фіолетовим і червоним, що пояснюється локалізацією антоціанінів у зернівці синьої пшениці в алейроновому шарі, а у фіолетової і червоної — в перикарпі [49].

Спеціальні біохімічні дослідження підтвердили, що антиоксидантний потенціал антоціанінів зумовлений особливостями фенольної структури їх молекули. На структуру молекули антоціанінів впливає низка чинників, таких як кількість гідроксильних груп у молекулі, ацилування, глікозилювання та метилювання молекули [78]. Найвищу антиоксидантну активність зафіксовано для дельфінідину, вона знижується в ряду ціанідин—петунідин—мальвідин—пеонідин—пеларгонідин [79].

Дослідження злоякісних пухлин вказують на те, що дельфінідин серед відомих антоціанінів є найпотужнішим ангіогенним інгібітором, ефективним у запобіганні і терапії злоякісного пухлинного росту [80]. Він запобігає утворенню пухлини внаслідок блокування ініціації мітоген-активованої кінази [81].

Чорнозерна пшениця останнім часом стала вкрай популярною серед населення Китаю. Китайські вчені різних напрямів фахової спеціалізації включно з медиками і дієтологами з чотирьох науково-дослідних інститутів Китаю на групі зі 120 волонтерів, хворих на діабет типу 2, протягом п'яти тижнів досліджували вплив дієти, яка включала у щоденному вжитку від 30 до 140 г продуктів (залежно від маси тіла), виготовлених із цілого зерна чорнозерної пшениці. У волонтерів істотно знижувались рівні глікованого альбуміну і гемоглобіну, причому режим харчування, що включав продукти із чорно-

зерної пшениці, був ефективнішим за стандартну дієту для діабетиків. Знижувався також вміст прозапальних лейкінів, таких як (TNF)- α та (IL)-6. Автори дослідження дійшли висновку, що продукти із зерна чорнозерної пшениці здатні поліпшувати стан гліcemії та запальний профіль у пацієнтів, хворих на діабет типу 2 [82].

Численні біохімічні, фізіологічні і клінічні дослідження виконано також на ячмені з кольоровим (чорним, фіолетовим, синім) зерном. Фундаментальний огляд цих досліджень наведено у статті співробітників кількох науково-дослідних центрів США [83].

Характеризуючи пігменти пшениці антоціаніни, не можна не згадати хоча б мимохідь про каротиноїди пшениці, що зумовлюють жовтий колір борошна і мають таке ж важливе функціональне значення, як і ціанідини. Жовтий колір ендосперму пшениці контролюють два головні локуси — *Psy1* і *Psy2*, локалізовані на хромосомах гомеологічних груп 7 і 5 [84]. Ці локуси контролюють біосинтез каротиноїдів через ключовий фермент фітоенсинтазу. Найбільш дослідженими локусами є *Psy1-A1(7AL)*, *Psy1-B1(7BL)*, *Psy1-D1(7DL)*, *Psy2-A1(5A)*, *Psy2-B1(5B)* [85]. Селекція сортів пшениці, особливо твердої, на високий вміст каротиноїдів сьогодні також є одним із пріоритетних напрямів світової селекції пшениці [35].

Результати досліджень позитивного впливу антоціанінів як функціональних інгредієнтів їжі на організми різних біологічних об'єктів, у тому числі й людини, викладено також у сотнях публікацій і фундаментальних наукових оглядах [13, 86—88]. Закцентаємо увагу на найважливіших положеннях цих досліджень.

Біодоступність антоціанінів або їх частка, що перетравилась, всмокталась кишківником і метаболізувалась, не має жодних обмежень. Більшість досліджень вказують на те, що біоабсорбція (засвоєння) антоціанінів кишківником відбувається досить швидко — протягом 15—90 хвилин [89].

Антиоксидантний ефект антоціанінів з нейтралізації активних форм кисню — це реальний механізм зниження ризику, особливо хронічних захворювань, таких як коронарна хвороба серця, деякі види раку [90]. Антоціаніни як антиоксиданти переважають за цією властивістю добре відомі антиоксиданти, такі як бутилгідроксіанізол (BHA), альфа-токоферол, тролокс, катехін, кверцетин [91]. Антиоксидантний ефект антоціанінів включає здатність нейтралізувати вільні радикали, радикал-катіони, пригнічувати окиснення ліпідів, таких як ліпопротеїди низької щільності (LDL), окиснення метиллінолеату (MeLo), жирів. Як уже наголошувалось, найвищу антиоксидантну активність мають такі антоціаніни, як дельфінідин, ціанідин, ціанідин-3-глюкозид, які активніші за згадані вище відомі антиоксиданти включно з аскорбіновою кислотою [92].

Інгібування окиснення LDL людини. LDL у неокисненому стані не утворюють атеросклеротичних бляшок, які призводять до тяжких патологій серцево-судинної системи і смерті. Отже, вживання антиоксидантів антоціанінів сприяє зниженню ризику серцево-судинних патологій, особливо атеросклерозу [91, 93].

Зниження вмісту ліпідів та оксидативний стрес. Однією з причин розвитку цукрового діабету типу 2 є синдром стійкості до інсу-

ліну. Підвищений рівень тригліцеридів у крові (гіпертригліцеридемія) — головна причина цього синдрому. Антоціаніни сприяють зниженню вмісту в крові LDL тригліцеридів, протидіють розвитку синдрому стійкості до інсуліну внаслідок блокування ранніх запальних процесів у жировій тканині. Отже, вони є превентивним харчовим чинником розвитку цукрового діабету типу 2 [94, 95]. Антоціаніни як ефективні антиоксиданти захищають бета-клітини підшлункової залози, які продукують інсулін, від індукованого глюкозою крові оксидативного стресу і тим самим усувають одну з важливих причин діабету типу 2 [96].

Антиканцерогенний ефект. Серед багатьох відомих хемопревентивних агентів проти раку антоціаніни потенційно є найціннішими, оскільки вони здатні впливати на диференціацію та апоптоз (генетично програмовану загибель) ракових клітин. Показано роль антоціанінів як агентів-інгібіторів ангиогенезу — утворення нових судин у ракових пухлинах, що приводить до блокування доступу кисню і поживних речовин до злоякісної пухлини та усунення можливості міграції ракових клітин (метастази) в інші органи тіла [97, 98].

Здоров'я очей і якість зору. Позитивний вплив антоціанінів на якість зору був одним із перших виявлених ефектів, пов'язаних з антоціанінами [99]. У результаті порівняння вмісту антоціанінів у тканинах печінки, мозку й очей було виявлено, що саме в тканинах ока вміст антоціанінів до 700 пкг/г сиров'язкової речовини був найвищим [100], причому антоціаніни настільки ефективно проникають у різні тканини й органи, що здатні долати навіть гематоенцефалічний бар'єр кров'яного русла. Суть позитивного впливу антоціанінів на якість зору полягає в їх здатності інгібувати фотоокиснення піридиндизретинної А2Е внаслідок пригнічення утворення синглетного кисню й запобігати розвитку залежної від віку макулярної (макула — частина сітківки) дегенерації сітківки, яка починається з руйнування пігменту епітеліальних клітин сітківки і дегенерації клітин, що містять фоторецептори [101].

Перелічені вище приклади далеко не всі серед відомих досліджених фактів позитивного впливу антоціанінів на здоров'я різних біологічних об'єктів, у тому числі й людини. Як чинник, що пригнічує запальний процес, антоціаніни здатні також захищати епітелій кишківника, зокрема від етаноліндукованого ушкодження, антоціаніни інгібують агрегацію тромбоцитів, забезпечують протирадіаційний захист біологічних об'єктів [102—104].

Із поширенням серед населення інформації про користь антоціанінів для здоров'я, останнім часом істотно активізувалось використання антоціаніновмісної рослинної сировини для виготовлення різноманітних харчових продуктів із функціональним статусом, таких як брендові продукти зі злаків, ферментовані напої, продукти дитячого харчування, молочні продукти тощо [86, 105, 106]. Оскільки на відміну від нестійких при зберіганні кольорових фруктів зерно злаків може зберігатися довго, воно має цілу низку технологічних переваг при виготовленні збагачених антоціанінами харчових продуктів [49]. Причому в таких країнах, як Китай та Індія, при виготовленні продуктів випічки кольорові пшениці починають витісняти звичайні ко-

мерційні сорти [76]. Досить давно відомі оригінальні сорти мультизернового хліба, поверхня якого щільно вкрита шаром великих часточок із зерна чорнозерної пшениці грубого помелу [109].

Нещодавно у продажу з'явився й одразу ж став популярним оригінальний антогрейний лікер (*anthograin liqueur*), що виготовляється ферментацією зерна чорнозерної пшениці без дистиляції. Вміст фенольних сполук і антиоксидантна активність цього лікеру істотно вищі, ніж в інших міцних алкогольних напоях [107].

Антоціаніни — водорозчинні сполуки, які легко екстрагуються з антоціаніновмісної сировини, їх починають широко використовувати у харчовій промисловості як натуральні барвники замість шкідливих для здоров'я синтетичних барвників. Синю, чорну і фіолетову пшениці та ячмінь нині розглядають як потенційні джерела для отримання натуральних антоціанінових барвників. Екстраговані антоціаніни починають використовувати як компонент при виготовленні косметичних кремів для захисту шкіри [90].

Антоціаніни відносно термостабільні особливо за низьких значень рН, однак вони деградують під дією ферменту поліфенолоксидази, яка навіть за легкого нагрівання інактивується [108].

З появою сортів пшениці та ячменю з кольоровим зерном посилюються вимоги до технологій переробки зерна, які мають бути націлені на виробництво цільнозернових продуктів харчування із функціональним статусом. Оскільки цінні для здоров'я біологічно активні антоціаніни (а також вітаміни і мінерали) зосереджені в периферійних шарах зернівки кольорових пшениці та ячменю, традиційні технології переробки такого зерна на високосортне рафіноване борошно з відсівом і видаленням висівок протирічать самій суті біологічної цінності зерна. Найцінніші анатомічні частини зерна — його оболонка і зародок — мають бути з повнотою, близькою до 100 % збережені у харчовому продукті, виготовленому із застосуванням мінімальної кількості технологічних операцій задля максимального забезпечення натуральності продукту [110].

Така логіка технологічної переробки зерна кольорових пшениці та ячменю цілковито збігається з нещодавно сформульованою новою гіпотезою захисного механізму цільнозернових злаків для здоров'я, опублікованою в авторитетному світовому виданні «*Nutrition Research Reviews*» французьким ученим Антоні Фарде з Національного інституту агрономічних досліджень (INRA). Ця фундаментальна праця викладена на 70 сторінках журнального тексту з цитуванням 1029 (!) літературних джерел [110]. Викласти навіть коротко суть цієї статті навряд чи можливо, бо це не просто фундаментальна аналітика зерна як джерела фізичного здоров'я людини, а й ґрунтовний довідник із переліком сотень найцінніших компонентів зерна злаків за їх функціональним значенням і впливом на здоров'я людини.

Автор статті особливо наголошує на тому, що ціле зерно злаків є багатим джерелом унікальної клітковини та біоактивних компонентів. Наприклад, ціле зерно пшениці містить близько 13 % дієтичної клітковини і 2 % біоактивних компонентів, які зосереджені у 15 % об'єму цілого зерна. У фракції зерна висівки + зародок близько 45 і 18 % дієтичної клітковини та відповідно близько 7 і щонайменше 6 %

біоактивних компонентів, які репрезентують близько 52 % і мінімум 24 % цих фракцій.

Звідси легко зрозуміти, що рафінований продукт технологічної переробки зерна пшениці — біле борошно без висівків і зародку — втрачає левову частку цих цінних для здоров'я захисних компонентів. Рафіноване біле борошно втрачає близько 58 % цінної клітковини, 83 % магнію, 79 % цинку, 92 % селену, 70 % нікотинової кислоти, 61 % фолатів, 79 % вітаміну Е, і це ще далеко не всі втрати, якщо згадати про антоціаніни, фенольні сполуки, *n-3* (або $\omega-3$) жирні кислоти, SH-вмісні амінокислоти, олігосахариди (стахіоза, рафіноза, фруктани), лігнін, інші мінерали та мікроелементи, вітаміни групи В, каротиноїди, поліфеноли, лігнани, алкілрезорциноли, фітати, бетаїн, холіновмісні компоненти, інозитол, фітостероли, полікозанол, мелатонін. Кожен із цих компонентів виконує численні фізіологічні функції і має визначені позитиви для здоров'я, які людина, на жаль, не отримує разом із втраченими висівками [111].

Отже, викладений у цій статті матеріал ми розглядаємо як наукове обґрунтування започаткованого нами нового для України напрямку селекції кольорових сортів пшениці і голозерного ячменю, як один із важливих шляхів біофортифікації зерна цих культур, поліпшення його харчової (біологічної) цінності. Ми акцентуємо особливу увагу на створенні кольорових сортів пшениці та ячменю круп'яного напрямку використання зерна. Зернові крупки, пластівці є продуктами переробки зерна, отриманими з використанням практично лише однієї технологічної операції — подрібнення чи плющення зерна з мінімальними втратами його анатомічних елементів. У кінцевому продукті крупах зберігаються всі цінні для здоров'я компоненти зерна.

Злаки є основою харчування населення світу. Грунтуючись на наведених у цій статті даних, що відбивають науково підтверджену позицію провідних світових учених-нутриціологів щодо біологічної цінності цілого зерна злаків, ми вважаємо, що в Україні має бути чітко сформульована і прийнята національна стратегія здорового (функціонального) харчування на основі цільозернових продуктів із зерна головних харчових злаків. Селекція має бути націлена на поліпшення біологічної цінності зерна цих культур, а технологічна переробка зерна має гарантувати максимальне збереження в кінцевому харчовому продукті усіх цінних для здоров'я нутрієнтів зерна.

Положення пропонованої стратегії мають бути у популярний спосіб на систематичній основі усіма засобами масової інформації доведені до свідомості кожного пересічного споживача продуктів із зерна злаків, до кожного українця. Щоденне вживання цільозернових продуктів із зерна злаків у рекомендованій нутриціологами кількості має стати основою Державної національної стратегії повноцінного здорового харчування, запорукою поліпшення фізичного і духовного здоров'я населення України, запобігання тяжким захворюванням і подовження активного життя української нації.

Ці положення давно вже стали національними стратегіями харчування у розвинутих країнах світу. Так, згідно із нормами харчування населення Великої Британії [112] і США [113], продукти із цілого зерна у раціоні мають становити за масою сухої речовини

не менш як 51 %. У Швеції і Данії частка продуктів із цільного зерна за масою сухої речовини має бути не меншою за 50 % [114, 115], у Німеччині частка хліба із цільного зерна — не менш як 90 % [116].

Усі нормативні документи стосовно рекомендацій, норм і безпеки харчування населення країн ЄС, щорічні звіти можна знайти на сайті Європейського агентства з безпеки продуктів харчування (The European Food Safety Authority, EFSA) [117].

REFERENCES

- Einbond, L., Reynertson, K., Luo, X-D., Margaret J. Basile M. & Kennelly, E. (2004). Anthocyanin antioxidants from edible fruits. *Food Chemistry*, 84, pp. 23-28.
- Aguilera, Y., Duenas, M., Estrella, I., Hernández, T., Benitez, V., Esteban, R. & Martin-Cabrejas, M. (2010). Evaluation of phenolic profile and antioxidant properties of *Pardina lentil* as affected by industrial dehydration. *J. Agric. Food Chem.*, 58 (18), pp. 10101-10108.
- Ravichanthiran, K., Zheng Feei Ma, Hongxia Zhang, Yang Cao, Chee Woon Wang, Shahzad Muhammad, Aglago, E., Yihe Zhang, Yifan Jin & Binyu Pan. (2018). Phytochemical Profile of Brown Rice and Its Nutrigenomic Implications. *Antioxidants*, 7 (71), pp. 1-16. <https://doi.org/10.3390/antiox706007>
- Dykes, L. & Rooney, L. (2006). Sorghum and millet phenols and antioxidants. *J. Cereal Sci.*, 44, pp. 236-251.
- Fei Lao, Sigurdson, G. & Giusti, M. (2017). Health benefits of purple corn (*Zea mays* L.) phenolic compounds. *Food Sci. and Food Safety*, 16, pp. 234-246.
- Bing Zhanga, Han Penga, Zeyuan Denga & Rong Tsao. (2018). Phytochemicals of lentil (*Lens culinaris*) and their antioxidant and anti-inflammatory effects. *J. Food Bioact.*, 1, pp. 93-103.
- Quinde-Axtell, Z. & Baik B. (2006). Phenolic compounds of barleygrain and their implication in food product discoloration. *J. Agric. Food Chem.*, 54, pp. 9978-9984.
- Garg, M., Chawla, M., Chunduri, V., Kumar, R., Sharma, S., Sharma, N., Kaur, N., Kumar, A., Mundey, J., Saini, M. & Singh, S. (2016). Transfer of grain colors to elite wheat cultivars and their characterization. *J. Cereal Sci.*, 71, pp. 138-144.
- Dongyun Ma, Yaoguang Li, Jian Zhang, Chenyang Wang, Haixia Qin, Huina Ding, Yingxin Xie & Tiancai Guo. (2016). Accumulation of phenolic compounds and expression profiles of phenolic acid biosynthesis-related genes in developing grains of white, purple, and red wheat. *Front. in Plant Sci.*, 7, pp. 1-11, article 528. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00528>
- Acosta-Estrada, B., Gutierrez-Urbe, J. & Serna-Saldivar, S. (2014). Bound phenolics in foods, a review. *Food Chem.* 152, pp. 46-55. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.093>
- Andersen, O. & Jordheim, M. (2006). The anthocyanins. In *Flavonoids: Chemistry, Biochemistry and Applications*, Andersen O.M., Markham K.R., Eds., pp. 471-552. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Jacobs, D. & Steffen, L. (2003). Nutrients, foods, and dietary patterns as exposures in research: A framework for food synergy. *Amer. J. Clin. Nutr.*, 78, pp. 508-513.
- Hock Eng Khoo, Azrina Azlan, Sou Teng Tang & See Meng Lim. (2017). Anthocyanidins and anthocyanins: colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits. *Food Nutr. Res.*, 61 (1). <https://doi.org/10.1080/16546628.2017.1361779>
- Liu, R.H. (2004). Potential synergy of phytochemicals in cancer prevention: mechanism of action. *J. Nutr.*, 134, pp. 3479-3485.
- Liu, R.H. (2007). Whole grain phytochemicals and health. *J. Cereal Sci.*, 46, pp. 207-219.
- Guo, Z.F., Zhang, Z.B., Xu, P. & Guo, Y.N. (2013). Analysis of nutrient composition of purple wheat. *Cereal Res. Commun.*, 41, pp. 293-303.
- Sherman, J., Souza, E., See, D. & Talbert, L.E. (2008). Microsatellite markers for kernel color genes in wheat. *Crop Sci.*, 48, pp. 1419-1424.

18. Himi, E. & Noda, K. (2004). Isolation and location of three homoeologous dihydro-favonol-4-reductase (DFR) genes of wheat and their tissue-dependent expression. *J. Exp. Bot.*, 55, pp. 365-375.
19. Sanjib Nandy, Qin Chen, Shan Cheng Sun, Faiz Ahmad, Robert Graf & Gerald Kereliuk. (2008). Nutritional analyses and their inheritance properties in colored wheat seed lines from different origins using near-infrared spectroscopy. *Amer. J. Plant Sci. Biotech.*, 2 (2), pp. 74-79.
20. Mi-Jung Kim, Jong-Nae Hyun, Jin-Ae Kim, Jong-Chul Park, Min-Young Kim, Jung-Gon Kim, Sun-Joo Lee, Se-Chul Chun & Ill-Min Chung. (2007). Relationship between phenolic compounds, anthocyanins content and antioxidant activity in colored barley germplasm. *J. Agric. Food Chem.*, 55, pp. 4802-4809.
21. Zeven, A.C. (1991). Wheats with purple and blue grains — a review. *Euphytica*, 56, pp. 243-258.
22. Li, Z., Mu, S., Jiang, L., Zhou, H., Wu, J. & Yu, L. (1982). A Study on blue-grained monosomic wheat. *Acta Genetica Sinica*, 9, pp. 431-439.
23. Zifeng Guo, Ping Xu, Zhengbin Zhang & Yunna Guo. (2012). Segregation ratios of colored grains in F1 hybrid wheat. *Crop Breed. Appl. Biotechnol.*, 12, pp.126-131.
24. Caporn, A.S. (1918). On a case of permanent variation in glume length of extracted parental types and the inheritance of purple color in the *Triticum polonicum* × *T. eibonni*. *J. Genet.*, 7, pp. 259-280.
25. Sharman, B.C. (1958). Purple wheat pericarp: a monofactorial character in wheat. *Nature*, 181, pp. 929-932.
26. Piech, J. & Evans, L.E. (1979). Monosomic analysis of purple grain colour in hexaploid wheat. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*, 82, pp. 212-217.
27. Gilchrist, J. & Sorrells, M.E. (1982). Inheritance of kernel color in 'Charcoal' wheat. *J. Hered.*, 73, pp. 457-460.
28. Kuspura, J., MacLagan, J., Bhambhani, R., Sadasivaiah, R. & Kim, N.-S. (1989). Genetic and cytogenetic analysis of the A genome of *Triticum monococcum* L. V. Inheritance and linkage relationships of genes determining the expression of 12 qualitative characters. *Genome*, 32, pp. 869-881.
29. Keppenne, V. & Baenziger, P. (1990). Inheritance of the blue aleurone trait in diverse wheat crosses. *Genome*, 33, pp. 525-529.
30. Lan, S., Li, X. & Liu, X.P. (2008). Genetic of seed pigment of blue kernel wheat. *Acta Agricult. Boreali Sinica*, 23, pp. 12-14.
31. Martinek, P., Skorpik, M., Chrpova, J. & Schweiger, J. (2013). Development of the new winter wheat variety Skorpion with blue grain. *Czech. J. Genet. Plant Breed.*, 49, pp. 90-94.
32. Morrison, L., Metzger, R. & Lukaszewski, A. (2004). Origin of the blue-aleurone gene in Sebesta blue wheat genetic stocks and a protocol for its use in apomixis screening. *Crop Sci.*, 44, pp. 2063-2067.
33. Qualset, C., Soliman, K., Jan, C., Dvorak, J., McGuire, P. & Vogt, H. (2005). Registration of UC66049 *Triticum aestivum* blue aleurone genetic stock. *Crop Sci.*, 45, pp. 432-435.
34. Zeller, E., Cermefio, M. & Miller, T. (1991). 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.*, 81, pp. 551-558.
35. Petr Martinek, Ondrej Jirsa, Katerina Vaculova, Jana Chrpova, Nobuyoshi Watanabe, Veronika Buresova, David Kopecky, Klara Stiasna, Tomas Vyhnanek & Vaclav Trojan. (2013). Use of wheat gene resources with different grain colour in breeding. 64. Tagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs, pp. 75-78.
36. Singh, K., Ghai, M., Garg, M., Chhuneja, P., Kaur, P., Schnurbusch, T., Keller, B. & Dhaliwal, H.S. (2007). An integrated molecular linkage map of diploid wheat based on a *Triticum boeoticum* × *T. monococcum* RIL population. *Theor. Appl. Genet.*, 115, pp. 301-312.
37. Knievel, 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.
38. Trojan, V., Musilova, M., Vyhnanek, T., Klejdus, B., Hanacek, P. & Havel, L. (2014). Chalcone synthase expression and pigments deposition in wheat with purple and blue colored caryopsis. *J. Cereal Sci.*, 59, pp. 48-52.

39. Abdel-Aal, E. & Hucl, P. (2003). Composition and stability of anthocyanins in blue-grained wheat. *J. Agric. Food Chem.*, 51, pp. 2174-2179.
40. Li, W., Shan, F., Sun, S., Corke, H. & Beta, T. (2005). Free radical scavenging properties and phenolic content of Chinese black-grained wheat. *J. Agric. Food Chem.*, 53, pp. 8533-8538.
41. Dubcovsky, J., Luo, M., Zhong, G., Bransteitter, R., Desai, A., Kilian, A., Kleinhofs, A. & Dvorak, J. (1966). Genetic map of diploid wheat, *Triticum monococcum* L., and its comparison with maps of *Hordeum vulgare* L. *Genetics*, 143, pp. 983-988.
42. Shen, Y., Shen, J., Dawadondup, Z., Wang, Y., Pu, J., Feng, Y., Chu, C., Wang, X. & Qi, Z. (2013). Physical localization of a novel blue-grained gene derived from *Thinopyrum bessarabicum*. *Mol. Breed.*, 31, pp. 195-200.
43. Rivas-Gonzalo, J.C. (2003). Analysis of anthocyanins. In *Method in Polyphenol*; Santos-Buelga, C., Williamson, G., Eds.; The Royal Society of Chemistry: London, U.K., pp. 338-358.
44. Finch, R. & Simpson, E. (1978). New colors and complementary color genes in barley. *Z. Pflanzenzucht*, 81, pp. 40-53.
45. Shim, J. & Suh S.J. (1986). Linkage relationship of blue aleurone genes in barley. In *Barley Genetics V. Proc. of the 5th Int. Barley Genet. Symp.* (Yasuda S. & Konishi T., Eds). Okayama, Japan: Sanyo Press Co., pp. 213-217.
46. Furukawa, J., Yamaji, N., Wang, H., Mitani, N., Murata, Y., Sato, K., Katsuhara, M., Takeda, K. & Ma, J.F. (2007). An aluminum-activated citrate transporter in barley. *Plant Cell Physiol.*, 48, pp. 1081-1091.
47. Rybalka, O., Morgun, B. & Polischuk, S. (2016). Barley as a product of functional nutrition. Kyiv: Logos [in Ukrainian].
48. Jia, Q., Wang, J., Zhu, J., Hua, W., Shang, Y. & Yang, J. (2017). Toward identification of black lemma and pericarp gene *Blp1* in barley combining bulked segregant analysis and specific-locus amplified fragment sequencing. *Front. Plant Sci.*, 8, p. 1414. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01414>
49. Abdel-Aal, E., Young, J. & Rabalski, I. (2006). Anthocyanin composition in black, blue, pink, purple and red cereal grains. *J. Agric. Food Chem.*, 54 (13), pp. 4696-704.
50. Xiao-Wei Zhang, Qian-Tao Jiang, Yu-Ming Wei & Chunji Liu. (2017). Inheritance analysis and mapping of quantitative trait loci (QTL) controlling individual anthocyanin compounds in purple barley (*Hordeum vulgare* L.) grains. *PIOS ONE*, 12 (8), pp. 1-12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183704>
51. Harlan, H.V. (2014). Some distinctions in our cultivated barleys with reference to their use in plant breeding. *US Dept. Agric. Bul.*, 137, p. 38. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.109258>
52. Kim, M., Hyun, J., Kim, J., Park, J., Kim, M. & Kim J. (2007). Relationship between phenolic compounds, anthocyanins content and antioxidant activity in colored barley germplasm. *J. Agric. Food Chem.*, 55 (12), pp. 4802-4809. <https://doi.org/10.1021/jf0701943> PMID: 17516656
53. Siebenhandl, S., Grausgruber, H., Pellegrini, N., Del Rio, D., Fogliano, V. & Pernice, R. (2007). Phytochemical profile of main antioxidants in different fractions of purple and blue wheat, and black barley. *J. Agric. Food Chem.*, 55 (21), pp. 8541-8547. <https://doi.org/10.1021/jf072021j> PMID: 17894457
54. Eticha, F., Grausgruber, H., Siebenhandl-Ehn, S. & Berghofer, E. (2011). Some agronomic and chemical traits of blue aleurone and purple pericarp wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Agric. Sci. Technol.*, B 1, pp. 48-58.
55. Ma Dong-yun, Sun De-xiang, Zuo Yi, Wang Chen-yang, Zhu Yun-ji & Guo Tian-cai. (2013). Diversity of antioxidant content and its relationship to grain color and morphological characteristics in winter wheat grains. *J. Integr. Agric.*, pp. 1-14. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60573-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60573-0)
56. Yaoguang Li, Dongyun Ma, Dexiang Sun, Chenyang Wang, Jian Zhang, Yingxin Xie & Tiancai Guo. (2015). Total phenolic, flavonoid content, and antioxidant activity of flour, noodles, and steamed bread made from different colored wheat grains by three milling methods. *Crop J.*, 3, pp. 328-334.
57. Fuchs, Ch. (2015). Characterization of anthocyanins in blue aleurone and purple pericarp wheat using HPTLC. Masterthesis for obtaining a Master's degree (Diplom Ingenieurin) at the University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, pp. 1-55.

58. Böhmdorfer, S., Oberlerchner, J., Fuchs, C., Rosenau, T. & Grausgruber, H. (2018). Profiling and quantification of grain anthocyanins in purple pericarp×blue aleurone wheat crosses by high-performance thin-layer chromatography and densitometry. *Plant Methods*, 14, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1186/s13007-018-0296-5>
59. Baron, J., Siebenhandl-Ehn, S., Jaafar, S., Böhmdorfer, S., Rosenau, T. & Grausgruber, H. (2012). Purpurweizen — geht's noch bunter? Steigerung des Anthocyangehaltes in Blaukorn-×Purpurweizen Kreuzungen Increase of the total amount of anthocyanins in progenies of blue aleurone×purple pericarp wheat crosses. 62. Tagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs, pp. 87-90.
60. Sanjib Nandy, Qin Chen, Hi Yan Li, Faiz Ahmad, Robert Graf, Gerald Kereliuk & Shan Cheng Sun. (2009). Inheritance of grain color controlling genes in divers wheat crosses using near-infrared spectroscopy. *Int. J. Plant Breed.*, 3 (1), pp. 52-57.
61. Dobrovolskaya, O., Arbuzova, V., Lohwasser, U., Röder, M. & Börner, A. (2006). Microsatellite mapping of complementary genes for purple grain color in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Euphytica*, 150, pp. 355-363.
62. Rückschloss, L., Matuskova, K., Hankova, A. & Jancik, D. (2010). Influence of winter wheat with purple colour of the corn on laying hens' efficiency and eggs quality. *Potravinarstvo* 4 (Special Issue), pp. 231-235.
63. Syed Jaafar, S., Baron, J., Siebenhandl-Ehn, S., Rosenau, T., Böhmdorfer, S. & Grausgruber, H. (2013). Increased anthocyanin content in purple pericarp x blue aleurone wheat crosses. *Plant Breed.*, 132, pp. 546-552.
64. Sharma, Sh. (2019). How purple is my roti. *The Economic Times Magazine* — Mumbai, pp. 18-19.
65. Khlestkina, E., Röder, M. & Börner, A. (2010). Mapping genes controlling anthocyanin pigmentation on the glume and pericarp in tetraploid wheat (*Triticum durum* L.). *Euphytica*, 171, pp. 65-69.
66. Buresova, V., Kopecky, D., Bartos, J., Martinek, P., Watanabe, N., Vyhnanek, T. & Dolezel, J. (2015). Variation in genome composition of blue-aleurone wheat. *Theor. Appl. Genet.*, 128, No. 2, pp. 273-282. <https://doi.org/10.1007/s00122-014-2427-3>
67. Franckowiak, J., Lundqvist, U. & Konishi, T. (1997). New and revised descriptions of barley genes. *Barley Genet. Newsl.*, 26, pp. 22-516.
68. Shoeva, O., Mock, H-P., Kukoeva, T., Börner, A. & Khlestkina, E. (2016). Regulation of the flavonoid biosynthesis pathway genes in purple and black grains of *Hordeum vulgare*. *PLOS ONE*, 11 (10) : e0163782. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163782>. eCollection 2016
69. Zhoukai Long, Yong Jia, Cong Tan, Xiao-Qi Zhang, Tefera Angessa, Sue Broughton, Sharon Westcott, Fei Dai, Guoping Zhang, Dongfa Sun, Yanhao Xu & Chengdao Li. (2019). Genetic mapping and evolutionary analyses of the black grain trait in barley. *Front. in Plant Sci.*, 9, pp. 1-11.
70. Gordeeva, E., Glagoleva, A., Kukoeva, T., Khlestkina, E. & Shoeva, O. (2019). Purple-grained barley (*Hordeum vulgare* L.): marker-assisted development of NILs for investigating peculiarities of the anthocyanin biosynthesis regulatory network. *BMC Plant Biol.*, 19 (1), pp. 55-57. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1638-9>
71. Havrlentova, M., Psenakova, I., Zofajova, A., Ruckschloss, L. & Kraic, J. (2014). Anthocyanins in wheat seed — a mini review. *Nova Biotechnologica et Chimica*, 13 (1), pp. 1-12. <https://doi.org/10.2478/nbec-2014-0001>
72. Sharma, S., Chunduri, V., Kumar, A., Kumar, R., Khare, P., Kiran, K., Bishnoi, M. & Garg, M. (2018). Anthocyanin bio-fortified colored wheat: Nutritional and functional characterization. *PLOS ONE*, 13 (4): e0194367. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194367>.
73. Sytar, O., Bosko, P., Zivcak, M., Brestic, M. & Smetanska, I. (2018). Bioactive phytochemicals and antioxidant properties of the grains and sprouts of colored wheat genotypes. *Molecules*, 23, p. 2282. <https://doi.org/10.3390/molecules23092282>
74. Karasek, F., Mrkvicova, E., Stastnik, O., Trojan, V., Vyhnanek, T., Hrivna, L. & Mrazkova, E. (2014). The influence of colored wheat Konini feeding on antioxidant activity parameters in rats. *MendelNet*, pp. 160-162.
75. Chen, W., Müller, D., Richling, E. & Wink, M. (2013). Anthocyanin-rich purple wheat prolongs the life span of *Caenorhabditis elegans* probably by activating the DAF-16/FOXO transcription factor. *J. Agric. Food Chem.*, 61, pp. 3047-3053. <https://doi.org/10.1021/jf3054643>

76. Jeewani, D. & Nishantha, M. (2018). Blue wheat: genetics, healthy value and food processing. *Sch. J. Agric. Vet. Sci.*, 5(4), pp. 230-235. <https://doi.org/10.21276/sjavs.2018.5.4.7>
77. Chun, O., Chung, S. & Song, W. (2007). Estimated dietary flavonoid intake and major food sources of U.S. adults. *J. Nutr.*, 137, p. 1244-1252.
78. Yang, M., Koo, S., Song, W. & Chun, O. (2011). Food matrix affecting anthocyanin bioavailability: review. *Curr. Med. Chem.*, 18, pp. 291-300.
79. Rahman, M., Ichiyanagi, T., Komiyama, T., Hatano, Y. & Konishi, T. (2006). Superoxide radical- and peroxynitrite-scavenging activity of anthocyanins; structure-activity relationship and their synergism. *Free Radic. Res.*, 40, pp. 993-939.
80. 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-phosphorylation. *Carcinogenesis*, 27, pp. 989-996.
81. Hou, D., Fujii, M., Terahara, N. & Yoshimoto, M. (2004). Molecular mechanisms behind the chemo preventive effects of anthocyanidins. *J. Biomed. Biotechnol.*, 20, pp. 321-325.
82. Liu, Y., Qiu, J., Yue, Y., Li, K. & Ren, G. (2018). Dietary black-grained wheat intake improves glycemic control and inflammatory profile in patients with type 2 diabetes: a randomized controlled trial. *Ther. Clin. Risk Manag.*, 14, pp. 247-256.
83. Idehen, E., Tang, Y. & Sang, Sh. (2017). Bioactive phytochemicals in barley. *J. of Food and Drug Analysis*, 25, pp. 148-161.
84. Poznaniak, C., Knox, R., Clarke, F. & Clarke, J. (2007). Identification of QTL and association of phytoene synthase gene with endosperm color in durum wheat. *Theor. Appl. Genet.*, 114, pp. 525-537.
85. Zhang, W. & Dubcovsky, J. (2008). Association between allelic variation at the phytoene synthase 1 gene and yellow pigment content in the wheat grain. *Theor. Appl. Genet.*, 116, pp. 635-645.
86. Shipp, J. & Abdel-Aal, E.-S.M. (2010). Food applications and physiological effects of anthocyanins as functional food ingredients. *Open Food Sci. J.*, 4, pp. 7-22.
87. Reis, J., Monteiro, V., Gomes, R., Moraes do Carmo, M., Vilhena da Costa, G., Ribera, P. & Monteiro, M. (2016). Action mechanism and cardiovascular effect of anthocyanins: a systematic review of animal and human studies. *J. Transl. Med.*, 14, pp. 1-16. <https://doi.org/10.1186/s12967-016-1076-5>
88. Mazza, G. (2007). Anthocyanins and heart health. *Ann. Ist Super Sanita*, 4, pp. 369-374.
89. Keppler, K. & Humpf, H.-U. (2005). Metabolism of anthocyanins and their phenolic degradation products by the intestinal microflora. *Bioorg. Med. Chem.*, 13, pp. 5195-5205.
90. Abdel-Aal, E.-S.M., Abou-Arab, A., Gamel, T., Hucl, P., Young, J. & Rabalski, I. (2008). Fractionation of blue wheat anthocyanin compounds and their contribution to antioxidant properties. *J. Agric. Food Chem.*, 56, pp. 11171-11177.
91. Kahkonen, M. & Heinonen, M. (2003). Antioxidant activity of anthocyanins and their aglycones. *J. Agric. Food Chem.*, 51, pp. 628-633.
92. Fukumoto, L. & Mazza, G. (2000). Assessing antioxidant and prooxidant activities of phenolic compounds. *J. Agric. Food Chem.*, 48, pp. 3597-3604.
93. Astadi, I., Astuti, M., Santoso, U. & Nugraheni, P. (2009). In vitro antioxidant activity of anthocyanins of black soybean seed coat in human low density lipoprotein (LDL). *Food Chem.*, 112, pp. 659-663.
94. DeFuria, J., Bennett, G. & Strissel, K. (2009). Dietary blueberry attenuates whole-body insulin resistance in high fat-fed mice by reducing adipocyte death and its inflammatory sequelae. *J. Nutr.*, 139, pp. 1-7.
95. Guo, H., Ling, W. & Wang, Q. (2007). 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.*, 62, pp. 1-6.
96. Jayaprakasam, B., Vareed, S., Olson, L. & Nair, M. (2005). Insulin secretion by bioactive anthocyanins and anthocyanidins present in fruits. *J. Agric. Food Chem.*, 53, pp. 28-31.
97. Fimognari, C., Berti, F., Nusse, M., Cantelli-Forti, G. & Hrelia, P. (2004). 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.*, 67, pp. 2047-2056.
98. Kang, S., Seeram, N., Nair, M. & Bourquin, L. (2003). Tart cherry anthocyanins inhibit tumor development in Apc (Min) mice and reduce proliferation of human colon cancer cells. *Cancer Lett.*, 194, pp. 13-19.

99. Ghosh, D. & Konishi, T. (2007). Anthocyanins and anthocyanin-rich extracts: role in diabetes and eye function. *Asia Pac. J. Clin. Nutr.*, 16, pp. 200-208.
100. Kalt, W., Blumberg, J. & McDonald, J. (2008). Identification of anthocyanins in the liver, eye and brain of blueberry-fed pigs. *J. Agric. Food Chem.*, 56, pp. 705-712.
101. Matsumoto, H., Nakamura, Y., Iida, H., Ito, K. & Ohguro, H. (2006). Comparative assessment of distribution of blackcurrant anthocyanins in rabbit and rat ocular tissues. *Exp. Eye Res.*, 83, pp. 348-356.
102. Matsumoto, M., Hara, H., Chiji, H. & Kasai T. (2004). Gastroprotective effect of red pigments in black chokeberry fruit (*Aronia melanocarpa* Elliot) on acute gastric hemorrhagic lesions in rats. *J. Agric. Food Chem.*, 52, pp. 2226-2229.
103. Morazzoni, P. & Magistretti, M. (1986). Effects of *Vaccinium myrtillus* anthocyanosides on postacyclin-like activity in rat arterial tissue. *Fitoterapia*, 57, pp. 11-14.
104. Akhmadieva, A., Zaichkina, S., Ruzieva, R. & Ganassi, E. (1993). The protective action of a natural preparation of anthocyanin (pelargonidin-3,5-diglucoside). *Radiobiologiya*, 33, pp. 433-435 [in Russian].
105. Herrero, J. & Frutos, M. (2014). Effect of concentrated plum juice on physicochemical and sensory properties of yoghurt made at bench-top scale. *Int. J. Dairy Technol.*, 67, pp. 123-128.
106. Bueno, J., Plaza, S., Escudero, R., Jimenez, A., Fett, R. & Asuero, A. (2012). Analysis and antioxidant capacity of anthocyanin pigments. Pt II: chemical structure, color, and intake of anthocyanins. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 42, pp. 126-151.
107. Li, W. & Beta, T. (2011). Evaluation of antioxidant capacity and aroma quality of anthograin liqueur. *Food Chem.*, 127, pp. 968-972.
108. Skrede, G., Wrolstad, R. & Durst, R. (2000). Changes in anthocyanins and polyphenolics during juice processing of highbush blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.). *J. Food Sci.*, 65, pp. 357-364.
109. Bezar, J. (1982). Konini, specialty bread wheat. *N.Z. Wheat Rev.*, 15, pp. 62-63.
110. Fardet, A. (2010). New hypotheses for the health-protective mechanisms of whole-grain cereals: what is beyond fibre? *Nutrition Research Reviews*, 23, pp. 65-134. <https://doi.org/10.1017/S0954422410000041>
111. Truswell, A. (2002). Cereal grains and coronary heart disease. *Eur. J. Clin. Nutr.*, 56, pp. 1-14.
112. JHCI (Joint Health Claims Initiative). (2002). Generic health claim for wholegrain foods and heart health. <https://www.jhci.org.uk/approv/wgrainh.htm>
113. FDA (Food and Drug Administration). (1999). Health Claim Notification for Whole Grain Foods.
114. SNF (Swedish Nutrition Foundation). (2004). Health claims in the labelling and marketing of food products. The food sector's code of practice.
115. Mejborn, H., Biloft-Jensen, A., Trolle, E. & Tetens, I. (2008). Fuldgrain. Definition og vidensgrundlag for anbefaling af fuldkornsindtag i Danmark [Wholegrain. Definition and scientific background for recommendations of wholegrain intake in Denmark]. Copenhagen, Denmark: Fodevareinstituttet, DTU, 103 p.
116. Deutsches Lebensmittelbuch. (1993). Leitsätze für Brot und Kleingebäck.
117. 2030www.efsa.europa.eu/efsajournal6. *EFSA Journal*, 2019, 17 (7): e170622.
118. Prokop, J., Anzenbacher, P., Mrkvicova, E., Pavlata, L., Zapletalova, I., Stastnik, O., Martinek, P., Kosina, P. & Anzenbacherova, E. (2018). In vivo evaluation of effect of anthocyanin-rich wheat on rat liver microsomal drug-metabolizing cytochromes P450 and on biochemical and antioxidant parameters in rats. *Food and Chem. Toxicol.*, 122, pp. 225-233.
119. Stastnik, O., Mrkvicova, E., Pavlata, L., Juzl, M., Roztocilova, A., Roman Pytel, R., Vyhnanek, T. & Martinek, P. (2018). Influence of feeding colored wheat varieties on selected quality parameters of broiler chicken's meat. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sci.*, 12, (1), pp. 729-734. <https://doi.org/10.5219/986>
120. Roztocilova, A., Stastnik, O., Mrkvicova, E. & Pavlata, L. (2018). Effect of purple wheat RU 687-12 on performance parameters of laying hens at the end of lay. In *NutriNet*, pp. 92-97.

Received 30.01.2020

COLORED GRAIN OF WHEAT AND BARLEY — A NEW BREEDING STRATEGY OF CROPS WITH GRAIN OF HIGH NUTRITIONAL VALUE

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

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 Akademika Zabolotnogo St., Kyiv, 03143, Ukraine

e-mail: molgen@icbge.org.ua

The article aimed on scientific justification of the new in Ukraine wheat and hull-less barley breeding direction with purpose of amelioration (biofortification) of nutritional (biological) value of those crops. Cereals are the base of staple food of the world's population. The cereals biofortification strategy called today as "the second green revolution". Black, violet and blue crops grain color determined with pigments anthocyanins and phytomelanins classified as flavonoids that belong to larger group of phytochemicals called as grain phenolic compounds. Anthocyanins of colored fruits, vegetables, legumes and colored grain cereals recognized as food ingredients providing of human health benefits and protects of human body from array of heavy pathologies such as oxidative stress causes the cardiovascular diseases, diabetes mellitus type II as well as different form of cancer. This is why the anthocyanin-rich food products becoming more and more popular and usable as functional food among developed nations. The paper presents many examples of biochemical, physiological and clinic research of color wheat and barley, performed in the authorized laboratories, evidencing the high nutritional value of wheat and barley with colored grain. This paper's authors is the first in Ukraine scientific team who developed and listed in Ukraine first varieties of black wheat with high nutritional value and who initiated in Ukraine the new breeding strategy — development of colored wheat and hull-less barley varieties as a base for production on the Ukrainian food market new different food products with functional status. The paper's authors proposed following after the developed countries to work out in Ukraine the national functional nutrition and food safety strategy aimed on the maximal (not less than 50 %) increase of the whole cereal grain (whole meal) products share in the daily recommended diet of Ukrainian population.

Key words: colored grain, wheat, barley, breeding, biofortification, antocyanins, antioxidants, functional food products.