

<https://doi.org/10.15407/frg2021.06.463>

УДК 575.113.2:577.112.82

## ФІЗІОЛОГО-БІОХІМІЧНІ ТА ГЕНЕТИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ЯЧМЕНЮ ЯК ПРОДУКТУ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ХАРЧУВАННЯ

В.Б. КАТРІЙ<sup>1</sup>, О.І. РИБАЛКА<sup>1,2</sup>, Б.В. МОРГУН<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Інститут фізіології рослин і генетики Національної академії наук України  
03022 Київ, вул. Васильківська, 31/17

<sup>2</sup>Селекційно-генетичний інститут—Національний центр насіннєзнавства та сортовивчення Національної академії аграрних наук України  
65036 Одеса, Овідіопольська дорога, 3

<sup>3</sup>Інститут клітинної біології та генетичної інженерії Національної академії наук України

03680 Київ, вул. Академіка Заболотного, 148

e-mail: katriy.vlad@gmail.com

В огляді наведено сучасні дані про фізіолого-біохімічні та генетичні особливості ячменю як продукту функціонального харчування. Увага до ячменю посилилась в останні 10—15 років у зв'язку з новітніми клінічними, дієтологічними і біохімічними дослідженнями продуктів із його зерна, що були виконані в лабораторіях провідних країн світу і довели винятково високу харчову цінність ячмінного зерна, насамперед його здатність слугувати профілактичним засобом проти таких найтяжчих недугів останнього століття, як коронарна хвороба серця, діабет та ін. Вкрай висока харчова цінність зерна ячменю пов'язана з вмістом у ньому унікальних некрохмалистих полісахаридів бета-глюканів, цілого комплексу речовин із широким спектром антиоксидантної активності (токоли, фітостероли, флавоноїди, фітофеноли), комплексу вітамінів групи В, ніотинової кислоти, цінних мінералів, таких як залізо, цинк, манган, селен. Приділено увагу технології селекції голозерного ячменю, що включає цілу низку специфічних завдань, пов'язаних із фізичними характеристиками зерна без плівки, його біохімічними й технологічними властивостями. Висвітлено новітні тенденції генетичних досліджень, спрямованих на поліпшення зерна ячменю за складом крохмалю, якістю білка, вмістом вітамінів, мінералів та антиоксидантів. Показано перспективність використання для поліпшення харчових ознак ячменю молекулярно-біологічних методів, які дадуть змогу за допомогою специфічних молекулярних маркерів скерувати генетичну мінливість цих ознак у потрібному для селекціонера напрямі. Описано новий для України напрям селекції злакових культур із кольоровим зерном з метою підвищення харчової цінності зерна, що є основою для появи на продовольчому ринку нашої держави нових продуктів функціонального харчування.

**Ключові слова:** ячмінь, глютен, амілоза, фітати, антиоксидантна активність, антоціани, генетичні дослідження, молекулярні маркери.

Ячмінь разом із пшеницею був першою одомашненою культурою і вирощувався для харчового використання вже понад 10 000 років тому. Як продукт харчування він був популярним ще за часів Древнього

Єгипту, Греції та Риму. Римських гладіаторів, відомих своїми силою, мужністю і витривалістю, називали *hordearii*, або гордеаріями (родова назва ячменю *Hordeum*), через те, що їхнім основним харчем був ячмінь. У багатьох регіонах світу, таких як Африка, Тибет, Китай, Корея, Японія, ячмінь як харчовий продукт взагалі ніколи не втрачав свого значення [1, 2].

Особливо велику увагу ячменю почали приділяти в останні 10—15 років після проведення в лабораторіях провідних країн світу новітніх клінічних, дієтологічних і біохімічних досліджень продуктів із його зерна. Доведено винятково високу харчову цінність ячмінного зерна, воно може слугувати профілактичним засобом проти таких найтяжчих недугів, як коронарна хвороба серця, діабет та ін. [3, 4]. Надзвичайно високу харчову цінність зерна ячменю визначає вміст у ньому унікальних некрохмалистих полісахаридів глюканів, цілого комплексу речовин із широким спектром антиоксидантної активності (токоли, фітостероли, флавоноїди, фітофеноли), комплексу вітамінів групи В, ніотинової кислоти, цінних мінералів [5].

У розвинених країнах світу ячмінь почали активно використовувати як харчовий продукт у чистому вигляді (крупи, пластівці, вироби з борошна та шроту) та в суміші з борошном пшениці [6]. Особливо популярним як продукт харчового напряму стає голозерний ячмінь, який набагато зручніший для технологічної переробки. На відміну від плівчастого ячменю голозерний ячмінь під час технологічної переробки втрачає значно менше біологічно цінних речовин, оскільки вони містяться в оболонці зерна і зародку. В республіках колишнього Радянського Союзу, в тому числі й в Україні, на жаль, було мало досліджено унікальну харчову цінність зерна ячменю. Не поліпшилась ситуація і сьогодні. Наукові дослідження в цьому напрямі майже не проводяться, а сортів спеціального харчового призначення (насамперед голозерного ячменю) в Україні фактично немає. Технологія селекції голозерного ячменю охоплює не лише проблеми селекції плівчастого ячменю, а й цілу низку специфічних завдань, які пов'язані з фізичними характеристиками зерна без плівки, його біохімічними й технологічними властивостями.

Однією з важливих складових харчової цінності зерна голозерного ячменю є вміст олії та її жирнокислотний склад, що залежить від генотипу. Однак загальна закономірність — істотне переважання в олії лінолевої кислоти. У результаті різних досліджень було визначено вміст в олії зерна ячменю жирних кислот, %: лінолевої — 51,74, олеїнової — 19,94, пальмітинової — 18,53 [7], лінолевої — 39,49—53,40, ліноленової — 4,65—25,07, пальмітинової — 17,72—23,7, олеїнової — 13,96—22,40 [8], лінолевої — 51,55—55,41, олеїнової — 14,77—21,11, ліноленової — 3,91—5,49 % [9]. При цьому є дані щодо незначного впливу на жирнокислотний склад олії зерна ячменю його сортової належності та умов вирощування.

Іншою особливістю є унікальні дієтичні властивості, пов'язані з наявністю фенольних сполук. У результаті дослідження голозерного ячменю, а саме — його участі в регулюванні антиоксидантного захисту було виявлено потужні захисні функції від окиснювального процесу та потенційну роль ячменю в перешкоджанні хронічному

запаленню при серцево-судинних захворюваннях [99]. Більшість фенольних сполук зосереджена в периферійних шарах зернівки, тому при виготовленні продуктів із плівчастого ячменю під час шліфування із зерна видаляється частина цінних для здоров'я нутрієнтів. Через це дедалі більшу увагу виробників привертає голозерний ячмінь, оскільки відпадає потреба в його шліфуванні й усі цінні компоненти зберігаються в зерні та продуктах, які з нього виготовлені [10].

У харчуванні людини важливу роль відіграють клітковина й мінерали, які потребує людський організм, і ячмінь може бути джерелом цих елементів. У харчовому аспекті однією з найцінніших фракцій зерна ячменю є некрохмалисті полісахариди, які містяться в алейроновому шарі та ендоспермі, цю фракцію називають загальною дієтичною клітковиною. Вона не перетравлюється травною системою, але має дієтичну цінність. Загальна клітковина як цінний харчовий комплекс складається з нерозчинної та розчинної фракцій, обидві складові мають велике значення для процесів травлення. Після спалювання зерна ячменю залишається вільна від органічного вуглецю зола, яка є концентратом мінералів, що містяться в зернівці [11].

Найважливішою частиною рослини як із погляду технологічного використання, так і репродуктивної функції ячменю, є зерно. Зерно ячменю, як і багатьох інших злаків, утворюється в результаті подвійного запліднення, яке іноді ще називають амфіміксісом. Зернівка ячменю складається з кількох основних, чітко визначених анатомічних частин: зародок та ендосперм, плівка (не у всіх сортів), алейроновий шар, субалейроновий шар. Хімічний склад цих частин зернівки відрізняється і відображає їхні функціональні особливості.

Білки зерна визначають поживні властивості харчового та кормового ячменю, саме вони впливають на солодові характеристики пива [12]. Власне кількісні характеристики, що визначають якість зерна та солоду, стимулювали розвиток біохімії, генетики й молекулярної біології білків зерна, особливо запасних білків ендосперму. Білки ячменю становлять близько 8–20 % маси зернівки [13].

*Хімічний склад плівки:* високополімерні нерозчинні вуглеводи, такі як целюлоза, лігнін, геміцелюлоза. Вміст целюлози > 40 % маси сухої речовини плівки, лігніну ~5 %, нерозчинних білків та азотистих сполук 7–16 %, шкідливих високомолекулярних насичених жирних кислот (стеаринової і пальмітинової) ~2,0 %, решта — кремній, хлор, сірка та інші шкідливі мінеральні речовини [14]. Загалом плівка становить 6–15 % маси зернівки.

Алейроновий шар сучасних сортів ячменю складається з 2–5 рядів клітин завтовшки 76–95 мкм. *Хімічний склад:* альбумінові та глобулінові фракції, багаті на незамінні амінокислоти, >25 % маси зернівки; корисні ненасичені жирні кислоти — олеїнова, лінолева, ліноленова; ~67 % стінок клітин формують арабіноксилани і ~26 % — β-глюкани; містяться токоли, фітостероли, водорозчинні вітаміни, антиоксиданти, мікроелементи [15]. До складу алейронового шару входять також цінні мінеральні мікроелементи: мідь, залізо, цинк, селен, магній та ін. В алейроновому шарі і в зародку ячменю міститься найбільше заліза (36,0–85,0 мг/кг сухої речовини), цинку (19,0–35,0 мг/кг), магнію (10,5–27,5 мг/кг). У зерні пшениці сучасних

сортів заліза не більш як 32,0 мг/кг, цинку — 28,0 мг/кг [16, 17]. В сучасних сортах лісостепового екотипу алейроновий шар зерна становить ~13,2 % маси зернівки, у сортах степового екотипу — 17,3—20,5 %. Загалом на алейроновий шар припадає 13,0—20,5 % маси зернівки.

Субалейроновим шаром називають клітинну структуру, що безпосередньо прилягає до алейронового шару, формується з 2—4 рядів клітин завтовшки 80—100 мкм. За хімічним складом вона більш подібна до крохмалистого ендосперму, ніж до алейрону. За недостатньої кількості вологи в період дозрівання зерна в клітинах субалейронового шару повністю відсутній крохмаль, зерно зморшкувате, зменшується маса зернівок, знижується врожайність. Між кількістю білка в зерні і кількістю незаповнених крохмалем клітин у субалейроновому шарі помічено високу зворотну кореляцію ( $r = -0,71$ ). У період посухи зерно нежаростійких півчастих сортів наливається з недобором крохмалю, що, у свою чергу, супроводжується збільшенням кількостей нерозчинної клітковини та протеїну [18, 19].

*Хімічний склад зародка:* >35 % — розчинні білки (альбуміни і глобуліни); ~20 % — ненасичені жирні кислоти (ліноленова, ліолева, олеїнова); 1,4—6,8 % — рафіноза та інші моно- й олігосахариди; жиророзчинні вітаміни — Е, F, К; мікроелементи. На зародок припадає 2,8—5,5 % маси зернівки [41].

*Хімічний склад ендосперму:* частка крохмалю становить 44—65 %, запасних нерозчинних білків (гордеїнів і глютелінів) — 12—8 %, жирних кислот ~2,0 %, целюлози і геміцелюлози ~40 %; стінки клітин ендосперму складаються з  $\beta$ -глюканів (~70 %) й арабіноксиланів (~20 %). На ендосперм припадає 70—80 % маси зернівки [20].

Розчинність білків у неорганічних та органічних розчинниках у 1924 р. дослідив Т.Б. Осборн. Відтоді білки, розчинні у воді, називають альбумінами, у розчинах солей — глобулінами, у розбавлених спиртах — гордеїнами, кінцеву фракцію, розчинну в луках — глютелінами. Як було встановлено в подальших дослідженнях, така класифікація білків за їхньою розчинністю є досить умовною, до того ж деякі білки можуть екстрагуватися разом з іншими фракціями [21, 22]. Наприклад, частина поліпептидів гордеїнів і глютелінів, які відрізняються за амінокислотним складом, міцно з'єднані водневими зв'язками, і виділити глютелінові білки, не забруднені гордеїнами, дуже складно. Неоднорідною є й альбумінова фракція, до якої належать поліпептиди «пасивних», запасних білків (протеїн Z), ферменти, 19 фізіологічно активних білків ( $\alpha$ - і  $\beta$ -амілази, інгібітори  $\alpha$ -амілази та хемотрипсину). Варто зазначити, що рослини ячменю різних екотипів різняться широким різноманіттям білкових фракцій, %: альбуміни — 7,5—28,8, глобуліни — 7,0—21,9, гордеїни — 15,6—46,4, глютеліни — 18,0—47,5 [23, 24].

Сорти степового екотипу за вирощування в оптимальних умовах містять менше альбумінів і глобулінів, ніж сорти лісостепового екотипу. В умовах посухи в степу України рослини ячменю накопичують більше гордеїнів і глютелінів, тому зростає кількість клейковини, яка може сягати 30 %, однак за фізичними властивостями клейковина пшениці істотно гірша за клейковину ячменю, яка має сірий колір, туга й нееластична [25, 26].

Суміш спирторозчинних білків гордеїнів, що є фракцією запасних білків ендосперму зерна ячменю, досліджена добре, їх вміст становить ~45 % вмісту сумарного білка в зерні. За даними електрофорезу, в поліакриламідному гелі за наявності додецилсульфату натрію гордеїни ячменю розділяються на чотири основні групи поліпептидів, що отримали назви А, В, С, D гордеїнів [27].

Молекулярна маса «гіллястого» амілопектину сягає ~108 Д. Амілоза більш розчинна у воді, але розчини її нестійкі, швидко утворюють кристалічний осад. Амілопектин формує в'язкі, вкрай стійкі розчини. Амілоза й амілопектин у різних пропорціях входять до складу крохмальних зерен, унаслідок чого у сортів неоднакові швидкість і температура оцукрювання крохмалю. Співвідношення амілози й амілопектину змінює стійкість крохмалю до солей і кислот. Встановлено негативну кореляцію між кількістю крохмалю в зерні та амілози у крохмалі. Збільшення вмісту амілози до 35 % сповільнює швидкість гідролізу крохмалю, а зменшення, навпаки, підвищує її [28]. За цим показником розрізняють резистентний крохмаль — RS і RS1, який зовсім не гідролізується, RDS-крохмаль, який повільно гідролізується за температури 37 °С протягом 20—120 хв, і SDS-крохмаль, який швидко гідролізується [29].

Відомі сорти, в яких крохмаль майже на 100 % складається з амілопектину, прикладом таких сортів є ваксі. Варто зазначити, що амілопектин значно повніше, ніж амілоза, перетравлюється в організмі людини. Таку ознаку ваксі контролює ген *wax*, що розміщений в 7HS хромосомі. Перші сорти ячменю ваксі були створені в Японії (1995), Канаді (1997) і Швеції (2005) [30]. На відміну від звичайних сортів ваксі вони мають підвищений вміст простих цукрів: глюкози, фруктози, цукрози і розчинної клітковини у формі β-глюканів. Вважають, що цей сорт ячменю має підвищений вміст β-глюканів у зв'язку з тим, що в нього генетично заблокований процес трансформації глюкози в крохмаль, і метаболізм за участю глюкози частково спрямовується на біосинтез β-глюканів. Порівняно з іншими сортами ячмінь із геном *wax* містить на ~40 % більше β-глюканів, крім того, ваксі має в середньому на 25 % вищий вміст олії.

У деяких мутантних формах голозерного ячменю, створених у Канаді, виявлено до 15—16 % β-глюканів [31]. β-Глюкани ((1→3;1→4)-β-D-глюкани) входять до складу клітинних стінок ендосперму, їх молекули доволі великі (~100—110 Д), негіллясті за структурою, стійкі до амілолітичних ферментів і створюють бар'єр для гідролітичних ферментів. Однак β-глюкани відіграють негативну роль у пивоварінні. За високого вмісту їхніх молекул у зерні швидкість оцукрювання крохмалю істотно сповільнюється, збільшуються в'язкість і термін фільтрації суслу. Серед широкого набору зернових культур лише у двох із них, а саме в зернівках ячменю (3—11 %) і вівса (2—5 %), виявлено найвищий вміст β-глюканів. У вівса вони сконцентровані в периферійній частині зернівки, в ячменю — в алейроновому шарі (~20 %) та в ендоспермі (~70 %) [32, 33].

Частково розчинні у воді β-глюкани утворюють стійкі розчини з високою в'язкістю. β-Глюкани не перетравлюються травною систе-

мою людського організму, однак мають дієтичну цінність. Під дією мікрофлори кишківника вони деградують і утворюють низку корисних та важливих коротколанцюгових органічних кислот, таких як оцтова, пропіонова та бутилова [34]. Ліпідам (жирам) у зерні ячменю до останнього часу приділялось менше уваги, ніж вуглеводам і білкам. Огляд інформації щодо класифікації ліпідів, їх взаємодії з іншими сполуками, сортових відмінностей зробив Г. Федак [35].

Ліпіди поділяють на дві основні фракції: крохмалисті, які концентруються в клітинах ендосперму серед гранул крохмалю, та некрохмалисті, які вільно рухаються. Кількість крохмалистих ліпідів (фосфоліпідів) пропорційна вмісту амілози. Залежно від розчинності й молекулярної структури ліпіди поділяють на полярні і неполярні. Серед 115 колекційних сортозразків ячменю залежно від маси зернівки сумарна кількість ліпідів варіювала у межах 2,2–3,7 % [36]. Найбільшу їх концентрацію виявлено в зародку зернівки (~20 %), хоча зародок — це лише ~3 % маси зернівки. Основні жирні кислоти в зернівці розподілені так: пальмітинова (16:0) ~23 %, олеїнова (18:1) ~13 %, лінолева (18:2) ~56 %, ліноленова (18:3) ~8 %. Показано також, що співвідношення жирних кислот у зерні ячменю не залежить від умов його вирощування, рівня азотних добрив та інших абіотичних чинників середовища [37, 38].

На відміну від зерна пшениці ячмінне зерно багате на хімічні нутрієнти, які забезпечують значну цінність ячменю як продукту функціонального харчування. Водорозчинні вітаміни містяться переважно в алейроновому шарі зернівки. Важливими водорозчинними вітамінами є тіамін ( $B_1$ ), рибофлавін ( $B_2$ ), нікотинова кислота ( $B_3$ ), піридоксин ( $B_6$ ), кобаламін ( $B_{12}$ ), біотин, холін, міоїнозитол, пантотенова, фолієва та аскорбінова (вітамін С) кислоти. Вітамін Е — це комплекс із чотирьох ізомерів токоферолів і чотирьох токотриєнолів. Вміст  $\alpha$ -токоферолів та  $\alpha$ -токотриєнолів в олії зерна ячменю відповідно в 24 та 17 разів вищий, ніж в олії кукурудзи. Продемонстровано, що вміст токолінів і мінливість за цією ознакою становить 46,7–67,6 мг/кг і залежить не тільки від генотипу сорту, а й від умов вирощування [39–41].

Однією з найважливіших груп біологічно цінних нутрієнтів ячменю є жиророзчинні токофероли і токотриєноли під загальною назвою токоли. Токоли — попередники важливого для організму людини вітаміну Е, який також має потужну антиоксидантну активність, захищає клітини від пошкоджень та уповільнює старіння [42]. Токоли пов'язані з вмістом ліпідів, а їх концентрація позитивно корелює з вмістом олії. Токофероли та токотриєноли по-різному розподіляються в зернівці ячменю. Токофероли переважно знаходяться в зародку — 93,7 %, алейроновому шарі — 5,4 % та ендоспермі — 0,6 %. Токотриєноли розподілені майже рівномірно в усіх частинах зернівки: в алейроновому шарі — 25,9 %, ендоспермі — 45,7 % та зародку — 28,5 % [38]. Ліноленова кислота майже зовсім відсутня в олії кукурудзи, соняшнику, оливок, пшениці та вівса, однак ячмінь вирізняється високим вмістом ліноленової ( $\omega$ -3) жирної кислоти, якій сучасна дієтологія відводить важливу роль у жировому обміні організму людини.

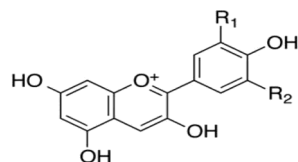
Забарвлені продукти харчування, такі, як овочі, фрукти [43], коричневий рис, сорго, просо [44], кукурудза, сочевиця [45], ячмінь, пшениця [46], багаті на важливі біоактивні фітохімічні сполуки — антоціани та фенольні кислоти, які корисні для здоров'я людини. Водорозчинні пігменти, що належать до родини флавоноїдів, які є частиною ще більшої групи біологічно активних сполук — поліфенолів, називають антоціанінами [47].

Згідно з результатами клінічних досліджень, харчові продукти, багаті на антоціани і поліфеноли, мають профілактичну дію проти таких хвороб, як серцево-судинні, запалення органів, деякі види раку, діабет, гіпертонія, ожиріння. Вони сприяють уповільненню старіння, захищають організм від УФ-випромінювання. Дослідження останніх років продемонстрували, що потужні рослинні антиоксиданти — антоціани і поліфеноли — здатні нейтралізувати шкідливі для організму людини вільні радикали і тим самим знизити ризик появи захворювань, які можуть виникати внаслідок окиснювального стресу [48].

Через наявність мікронутрієнтів у злаках із кольоровим зерном їх розглядають як частину світової стратегії створення продуктів функціонального харчування. Колір продуктів визначають антоціаніни, які є природними водорозчинними флавоноїдами рослинного походження. Антоціаніни добре відомі під поширенішою назвою — пігменти, і відповідають за червоне, фіолетове, помаранчеве, синє та інші забарвлення органів, тканин, плодів. Нині відомо понад 600 природних антоціанів. Найпоширеніші з них шість: ціанідини (cyanidins), дельфінідини (delphinins), мальвінідини (malvinidins), пеларгонідини (pelargonidins), петунідини (petunidins) і піонідини (peonidins). Вони мають наведену нижче молекулярну структуру [50].

Антоціаніни фактично є фенольними фітохімічними сполуками, що класифікуються в межах ряду флавоноїдів разом із флавонолами, флавонами, флавононами та ізофлавоноїдами. За особливостями своєї структури антоціаніни належать до класу глікозидів і мають складний молекулярний скелет у формі В-кільця (B-ring) з бічними метильними та гідроксильними групами.

Структурне варіювання молекули антоціанів значно розширюється через утворення молекулярних комплексів В-кільця з цукра-



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

Молекулярна структура антоціанів [50]

ми (найчастіше з пентозами, аліфатичними й ароматичними кислотами). 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 червону/оранжеву, темно-червону і фіолетову/синю пігментації відповідно [48, 49].

На відміну від овочів і фруктів злаки не є типовим джерелом антоціанів, однак злакові рослини і продукти їхньої переробки — джерело щоденного масового харчування людей. Зважаючи на високу біологічну цінність злаків із кольоровим зерном, насамперед таких, як рис, пшениця, ячмінь, вони дедалі більше приваблюють споживачів, переробників зерна, виробників продуктів функціонального харчування і селекціонерів у багатьох країнах світу [51—53].

Ячмінь, як і пшениця, має подібні типи пігментації зерна за участю природних антоціанів. Встановлено, що антиоксидантна активність антоціанінів пшениці та ячменю навіть вища за антиоксидантну активність популярних вітамінів С та Е.

Окрім пігментів синього кольору зерно ячменю містить пігменти фіолетового та чорного забарвлення. Фіолетову пігментацію ячменю контролюють гени *Ant1* на 7HS хромосомі зі слабкою експресією та *Ant2*, що знаходяться на 2HL хромосомі. Залежно від генетичної основи, яка контролює фіолетове забарвлення, кількісний вміст антоціанів у зерні ячменю може істотно відрізнятися [54]. Успадкування чорного і фіолетового кольорів зерна ячменю подібне до їх успадкування у пшениці та супроводжується материнським ефектом вияву генів. Ген *Blp* (black lemma pericarp), що розміщений на хромосомі 1HL, контролює чорний колір півки і перикарпу [55]. Через наявність меланіноподібних пігментів у клітинах перикарпу виявляється чорна пігментація зернівки [56]. Меланіни — група високомолекулярних чорно-коричневих пігментів, що утворюються внаслідок окиснення і полімеризації фенольних сполук [57].

Наразі у лабораторіях світу накопичено і систематизовано достатньо експериментальних фізіолого-біохімічних, генетичних та клінічних даних, які свідчать про високий вміст у кольоровому зерні злаків фенольних сполук та антоціанінів, які є стратегічно важливими чинниками біофортифікації зерна, що забезпечують його функціональність як важливого харчового продукту. Кольорове зерно злакових рослин привертає дедалі більшу увагу насамперед через його високу антиоксидантну активність. Крім того, підвищений вміст кольорових пігментів у зерні пшениці та ячменю має важливе агрономічне значення, оскільки вони пов'язані зі стійкістю рослин до інфекцій та стресових чинників середовища вирощування [58]. Отже, головною відмінністю в кольорового зерна пшениці та ячменю є високий загальний вміст фенольних сполук, підвищений вміст біологічно активних антоціанів і висока антиоксидантна активність порівняно зі звичайним зерном.

Біодоступність антоціанів або їх частини, що перетравлена, всмоктана кишківником і метаболізована, не має жодних обмежень. Результати більшості досліджень вказують на те, що антоціаніни у кишківнику засвоюються досить швидко, а саме протягом 0,25—1,5 години [59].



Антиоксидантний ефект антоціанів полягає в здатності нейтралізувати вільні радикали, радикал-катиони, пригнічувати окиснення ліпопротеїдів низької щільності (LDL), метиллінолеату (MeLo) та жирів.

Як уже зазначалось, найвищу антиоксидантну активність мають дельфінідин, ціанідин та ціанідин-3-глюкозид, вони активніші за згадані вище відомі антиоксиданти та аскорбінову кислоту [60]. Антиокиснювальний ефект щодо нейтралізації вільних радикалів є механізмом зниження ризику хронічних захворювань, таких, як коронарна хвороба серця та деякі види раку [61]. Антоціаніни, як і антиоксиданти, зокрема бутилгідроксіанізол, альфа-токоферол, тролокс, катехін і кверцетин, переважають за цією властивістю [62].

Однією з причин розвитку цукрового діабету другого типу є синдром стійкості до інсуліну, а підвищений рівень тригліцеридів у крові (гіпертригліцеридемія) — головна причина цього синдрому. Антоціаніни сприяють зниженню вмісту в крові LDL (low-density lipoprotein) тригліцеридів і протидіють розвитку синдрому стійкості до інсуліну внаслідок блокування ранніх запальних процесів у жировій тканині. У такий спосіб вони є превентивними харчовими чинниками розвитку цукрового діабету другого типу [63]. Захищають бета-клітини підшлункової залози, що продукують інсулін, від індукованого глюкозою крові оксидативного стресу саме антоціани, що мають антиоксидантну активність, і тим самим усувають одну з причин розвитку діабету другого типу [64].

Серед багатьох відомих хемопревентивних засобів проти раку антоціаніни потенційно є найціннішими, оскільки здатні впливати на диференціацію й апоптоз ракових клітин. Висвітлено роль антоціанінів як агентів-інгібіторів ангиогенезу (утворення нових судин у ракових пухлинах), що приводить до блокування доступу поживних речовин та кисню до злоякісної пухлини і тим самим унеможливає утворення метастазів в інших органах тіла [65].

Важливо наголосити, що одним із перших виявлених ефектів антоціанів був позитивний вплив на зір. Порівнявши вміст антоціанів у печінці, мозку та очах, учені виявили, що саме в тканинах ока вміст антоціанів був найвищим (до 700 пкг/г сирової речовини) [66]. Антоціаніни настільки ефективно проникають у різні тканини й органи, що здатні долати навіть гематоенцефалічний бар'єр кров'яного русла. Позитивний вплив антоціанів на якість зору забезпечується їхньою здатністю впливати на фотоокиснення піридиндизретинію А2Е пригніченням синглетного кисню та запобігати розвитку залежної від віку макулярної (макула — частина сітківки) деградації сітківки, що починається з руйнування пігменту епітеліальних клітин і дегенерації клітин, які містять фоторецептори [67].

*Генетика білків і крохмалю зерна ячменю.* На тлі зниження популярності пшениці як основної хлібної культури у світі популярність ячменю зростає. Біологічна цінність зерна пшениці за останні 20—30 років істотно погіршилась у зв'язку з успіхами сучасної селекції в напрямі підвищення її врожайності. Багато людей, які практикують здорове харчування, почало віддавати перевагу не білому пшеничному хлібу з борошна сучасних сортів пшениці, а хлібу з примітивної низьковрожайної культури полби. Хліб із зерна полби або спельти за

своєю біологічною цінністю в разі переважає хліб із сучасних високотрожайних сортів пшениці. Іншою альтернативою пшениці є ячмінь. У зв'язку з набуттям виготовлених з ячменю продуктів статусу продуктів функціонального харчування в розвинутих країнах світу ячмінь почали використовувати або для поліпшення харчової цінності продуктів із зерна пшениці, або як харчову альтернативу.

Головним вуглеводним енергоємним компонентом зерна є крохмаль, який визначає його енергетичну та біологічну цінність за важливими для здоров'я характеристиками: GI (glycemic index) — глікемічний індекс та GL (glycemic load) — глікемічне навантаження. GI характеризується швидкістю, з якою крохмаль харчового продукту конвертується у шлунково-кишковому тракті (ШКТ) людини в глюкозу, а GL є похідною величиною від значення GI продукту та його спожитої кількості [68]. Що вищий GI, то вища швидкість перетворення крохмалю на глюкозу, й відповідно, нижча біологічна цінність продукту, яка тісно пов'язана з ризиком розвитку метаболічного синдрому та цукрового діабету другого типу [69]. З моменту впровадження у 1981 р. GI став ключовим показником, що його використовують для характеристики фізіологічної реакції організму, пов'язаної із вживанням вуглеводних харчових продуктів [70]. GI значною мірою залежить від біохімічного складу крохмалю, а саме від співвідношення його компонентів: амілози (біополімер *D*-глюкози з лінійною молекулярною структурою) та амілопектину (біополімер *D*-глюкози з розгалуженою молекулярною структурою). У нормі крохмаль ячмінного зерна містить 25—30 % амілози, решта — амілопектин.

Амілоза значно повільніше за амілопектин піддається ензиматичній деградації у ШКТ людини до кінцевого продукту глюкози, а недеградована частка амілози утворює резистентний RS-крохмаль. Отже, чим вищий вміст у крохмалі амілози, то нижче GI вуглеводного продукту, нижче GL, і відповідно, вища його біологічна цінність [71]. Крім того, з підвищенням вмісту в крохмалі амілози зростає вміст у зерні RS-крохмалю, який надзвичайно стійкий до ферментів травлення у тонкому кишківнику людини і є цінною для здоров'я дієтичною клітковиною [72]. Отже, підвищення вмісту амілози в крохмалі зерна, що рівнозначне поліпшенню його харчової (біологічної) цінності, є важливим завданням селекції багатьох зернових культур, у тому числі й ячменю.

Зміни складу крохмалю в зерні рослин ячменю за вмістом амілози дослідила група австралійських учених Федерального агентства з наукових досліджень CSIRO [29]. У ході скринінгу генотипів зі зморщуватим зерном після обробки насіння сорту Himalaya мутагеном азидом натрію вони ідентифікували новий мутант голозерного ячменю з високим вмістом амілози [73]. Виділена мутантна лінія M292, що згодом стала комерційним сортом, отримала назву Himalaya 292, а відповідна мутація (G на A транзиція) була картована в локусі *sex6* (*shrunken endosperm xenia*). Вона знижувала вміст крохмалю в зерні до 27 % порівняно з 49 % у контролі і водночас підвищувала частку амілози в крохмалі до 71 %. У мутантної лінії ячменю ідентифікований стоп-кодон, який унеможлиблював трансляцію транскриптів для синтезу ферменту синтази крохмалю (SSIIa).

Світову ринкову вартість харчових продуктів, які не містять клейковини (безглютеніві, або *gluten-free products*), у 2018 р. було оцінено в 4,35 млрд дол. США. Згідно з прогнозом (7,7 % щорічний приріст за CAGR формулою), за оптимістичними даними вона зросте до 7,91 млрд дол. США у 2026 р. [74]. Отже, створення безклейковинних сортів зернових культур харчового призначення, безсумнівно, є економічно привабливою темою для наукових досліджень.

Клейковина, або глютен (*gluten*) — це білковий комплекс, вміст якого становить ~80 % загального вмісту білка в зерні, і є характерним для пшениці (гліадини, глютеніни), жита (секаліни), тритикале (гліадини, глютеніни, секаліни), ячменю (гордеїни) та деяких сортів вівса (авеніни). Особливістю білків глютену, насичених амінокислотами проліном і глутаміном, є їх резистентність до травних ферментів шлунково-кишкового тракту. В результаті нерозщеплені до амінокислот пептиди, а точніше епітопи (специфічні послідовності амінокислот) імунодомінантних пептидів, індукують у кишківнику людини патологічну аутоімунну ентеропатію.

Щонайменше три важливі патології пов'язані з вживанням харчових продуктів, які містять клейковину. Перша — це алергічна реакція на клейковину, яка охоплює лише 0,2—0,5 % людства, однак має різко виражений клінічний вияв [75]. Другою є аутоімунна патологія, що її називають целиакією (*coeliac disease*, скорочено CD), вона охоплює >1,6 % населення світу [76]. Третя нещодавно ідентифікована патологічна нецелиакійна чутливість до клейковини відома в англomовній літературі під абревіатурою NCGS (*non-celiac gluten sensitivity*), виявлена у 6 % населення США, а в деяких країнах досягає 10 % [77, 78]. До того ж більш як 90 % целиакійно чутливих осіб залишаються у світі не діагностованими [79].

У різних лабораторіях світу були використані методи генетичної модифікації білків клейковини пшениці із залученням гордеїн-дефіцитного мутантного гена *lys3a* ячменю гліадин-дефіцитних мутантів [80], нетрансгенної технології редагування геному CRISPR/Cas9 та трансгенної РНК-інтерференції [81], аби усунути токсичність клейковинних білків у їжі для осіб із целиакійною та нецелиакійною чутливістю до глютену.

Мінерали можуть потрапити в організм людини виключно з їжею. У цьому полягає стратегічне значення мінерального складу щоденного харчового і кормового раціонів [82]. Серед п'яти найважливіших для нашого організму мінералів (кальцій, фосфор, калій, натрій, магній) фосфор є другим за функціональним значенням. Його вміст становить до 1 % загальної маси тіла, він міститься в кожній клітині, а максимальну його кількість виявлено в кістках і зубах. Фосфор відіграє стратегічну роль у клітинному метаболізмі. Цей елемент у структурі фосфоліпідів входить до складу клітинних мембран. Фітинова кислота має досить великий негативний заряд, що підтримується в широкому діапазоні рН [83]. У молекулі фітинової кислоти шість фосфатних груп утворюють солі (фітин або фітати) з різними катіонами металів, наприклад із  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ . Здебільшого фітати злакових рослин представлені  $K^-$ ,  $Mg^-$  солями, що можуть зв'язувати в органічну форму понад 50 %  $K$  і  $Mg$  загального їх

вмісту в зерні. Разом із фосфором фітатів ці катіони та міоїнозитол утворюють пул мінералів та метаболітів, які потрібні проростку на ранніх стадіях його розвитку.

*Генетика ячменю за ознаками харчової цінності зерна.* Лише два десятиліття тому генетичне дослідження ознак якості ячменю, які за класичним визначенням належать до складних кількісних ознак і мають полігенний контроль, було доволі складним завданням. Вирішувалося воно за допомогою традиційного статистичного аналізу генотипних і фенотипних варіантів із визначенням певних ефектів генів, успадкування яких неможливо було впевнено простежити в генетичних та селекційних популяціях міжсорткових схрещувань [84]. Відповідно, залишались невизначеними ролі конкретних генів та їх функціональний зв'язок з ознаками якості зерна ячменю. Як наслідок, внесок генетичних досліджень у практичну селекцію ячменю був незначним і малопомітним.

У наш час генетичні дослідження ознак якості зерна ячменю мають принципово інші методичну й методологічну бази і спроможні не лише контролювати успадкування окремих генів, пов'язаних з ознаками якості зерна, досліджувати їхню функціональну роль, а й цілеспрямовано впливати на рекомбінаційні процеси, процеси біосинтезу білків і ферментів, інтеграцію генів у хромосоми, заміщення небажаних генів, маніпулювання генами з метою цілеспрямованого формування ознак якості зерна з бажаними для селекціонера та переробника зерна характеристиками [85].

Важливий розділ сучасної генетики ознак ячменю отримав назву функціональна геноміка. Це технологія, за допомогою якої велика кількість генів, що контролюють селекційні ознаки ячменю, в тому числі і його якість, можуть бути ідентифіковані, ізольовані та за допомогою діагностичних маркерів зі 100 %-ю вірогідністю передбачені у складі бажаних генотипів рослин [86]. Функціональну геноміку поділяють на кілька дисциплін, таких як власне геноміка, метаболоміка та протеоміка, які оперують відповідно на рівнях генної структури та функції, біосинтезу білків, ферментів, метаболічних реакцій та взаємодії метаболітів, що беруть участь у реалізації конкретних ознак якості зерна.

Геноміка ячменю базується виключно на використанні в дослідженнях молекулярно-генетичних маркерів хромосом ячменю. Реєстрація генетичних колекцій і генних ресурсів ячменю, дослідження гібридних популяцій, селекційних ліній, комерційних сортів ячменю здійснюються виключно за схемами, що регламентують використання певних типів молекулярних маркерів, здебільшого таких, як SSR (simple sequence repeats, або мікросателіти, що представлені простими короткими послідовностями нуклеотидів, характеризуються великим поліморфізмом і значно поширені в рослин, у тому числі й ячменю), SNP (single nucleotide polymorphism), EST (expressed sequence tag) [87, 88]. Кожна із цих систем діагностичних маркерів має свої технологічні особливості та переваги, але всі вони забезпечують можливість молекулярного скринінгу генетичного поліморфізму, надійної ідентифікації певних цільових локусів чи тісно зчеплених із ними генів або фрагментів послідовностей ДНК цих генів із

використанням ефективних сучасних технологій, що базуються на полімеразній ланцюговій реакції (ПЛР).

На сьогодні вже сформувався цілий розділ сучасної селекції ячменю, який отримав назву «селекція, що базується на використанні молекулярних маркерів», MMAS або MAS (molecular marker-assisted selection) [89]. Конкретні молекулярні маркери, що причетні до генетичного контролю певних кількісних ознак мають назву QTL (quantitative traits linkage). Найперспективнішими для використання в селекції ячменю вважають SSR-маркери. Вони тісно зчеплені з локусами, що контролюють важливі селекційні ознаки ячменю.

Наразі сконструйовано таку кількість SSR-маркерів, яка істотно перевищує число локусів, що їх необхідно контролювати в системі звичайної селекції. Ці системи дають змогу сканувати весь геном ячменю. Сорти й генетичні лінії ячменю важливі для селекційного використання, за потреби їх можна схарактеризувати за системою SSR-маркерів, які максимально перевищують весь геном ячменю [90].

За USDA–IFAFS проектом, у Каліфорнійському університеті США створено ДНК-мікрочипи молекулярних маркерів, які репрезентують близько 22 000 генів ячменю. Їх база була створена на основі більш як 400 000 EST послідовностей ДНК ячменю у співробітництві з лабораторіями США, Шотландії, Німеччини, Японії, Фінляндії. База молекулярних маркерів за спеціальним міжнародним проектом SAGE (Serial Analysis of Gene Expression) створена у Великій Британії, вона дає можливість вивчати експресію окремих генів (близько 14 500) у клітинах тканин різних органів у процесі диференційованого розвитку ячменю [91].

Використання молекулярних маркерів у селекції ячменю стало сьогодні не лише системним явищем, а й навіть сформувався новий сучасний метод селекції ячменю, запропонований Танкслі і Нельсоном у 1996 р. [92]. Як приклад розглянемо досягнення функціональної геноміки в дослідженні пивоварних ознак зерна ячменю. Ця якість є однією з найскладніших ознак, з якими працює селекціонер. Якість пива, як і якість солоду, пов'язана з фізичними, біохімічними та фізіологічними особливостями зерна. Ячмінне зерно характеризують багатьма десятками показників, які контролюються системами генних кластерів, окремими генами та їхніми алелями. Найбільшого прогресу було досягнуто за останнє десятиліття в ідентифікації та характеристиці щонайменше 25 QTL, асоційованих із ключовими показниками якості ячмінного солоду, такими, як параметри модифікації клітин, екстрактивність солоду, діастатична активність та білковий комплекс у процесі солодування.

В одному з дослідів австралійські вчені добирали ліпші за пивоварними показниками лінії ячменю виключно з використанням MMAS. У результаті отримані селекційні лінії виявилися найліпшими за показниками пивоварної якості [93]. В досліді було локалізовано QTL, що пов'язаний з діастатичною активністю, у хромосомі 5HL, а QTL, що асоційований з одним із найсильніших локусів, відповідальним за ознаку екстрактивності солоду — у хромосомі 2HS. Інші важливі щодо пивоварної якості QTL були локалізовані в хромосомах 7H (QTL1) та 4H (QTL2).

Серед локусів, пов'язаних із пивоварною якістю ячменю, важливим є локус *Bmy1*, локалізований на 4Н хромосомі, що контролює активність ферменту  $\beta$ -амілази зерна, термостабільність цього ферменту, його ізоформи та співвідношення вільна/зв'язана  $\beta$ -амілаза. Цей ензим має два типи: Sd1 та Sd2 із субгрупою Sd2–H з підвищеною термостабільністю. Для локусу *Bmy1* за результатами секвенування послідовності його ДНК було сконструйовано алелеспецифічні PCR-маркери, що відповідають послідовності шести амінокислот у структурі молекули  $\beta$ -амілази [94]. До цього локусу також було сконструйовано PCR-маркери, що детектують поліморфізм у мікросателітному регіоні третього інтрону, розміщеному в цьому ж локусі.

Отже, всі необхідні варіанти  $\beta$ -амілази (термостабільні й термолабільні) зерна ячменю легко ідентифікуються за допомогою подвійної системи молекулярних маркерів, їх можна використовувати як для добору пар сортів ячменю для схрещування, так і для добору селекційних ліній із термостабільним генетичним варіантом цього ферменту. Японські вчені знайшли QTL, що розміщені на 5HL хромосомі ячменю і чинять значний вплив на показники пивоварної якості, такі, як індекс Кольбаха та активність протеїнази в солоді [95].

Детально досліджено генетику фізіологічного спокою насіння щодо пивоварної якості ячменю. Стосовно харчової цінності найважливішими компонентами ячмінного зерна є  $\beta$ -глюкани або розчинна клітковина. Високий вміст  $\beta$ -глюканів у зерні ячменю негативно впливає на пивоварні якості солоду, однак  $\beta$ -глюкани мають надзвичайно важливе дієтичне значення у харчуванні людини. Молекулярні маркери хромосом були успішно використані для вивчення успадкування вмісту  $\beta$ -глюканів у зерні ячменю та їх локалізації в хромосомах. Для цього було вивчено 88 генетичних маркерів для картування QTL. Знайдено 12 важливих маркерів, що мали відношення до контролю вмісту  $\beta$ -глюканів. Щонайменше три QTL вдалося картувати у хромосомах 1H та 4H, які загалом пояснюють до 22 % варіабельності за цією ознакою. Майже 17 % варіабельності за вмістом  $\beta$ -глюканів пов'язані з ваксігеном, що розміщений у 7H хромосомі ячменю [96, 97].

Досягнуто значного прогресу у вивченні генетики ознаки загальної ферментабельності солоду за використання молекулярних маркерів. Ферментабельність солоду негативно пов'язана з вмістом ферменту мальтотріози. Найважливіший QTL для цього ферменту збігся з QTL, що маркує термостабільний варіант  $\beta$ -амілази Sd2–H. Знайдено QTL для генетичного фактора, що контролює трансформацію (гідроліз) частини розчинних  $\beta$ -глюканів до глюкози, і який також позитивно корелює з ознакою ферментабельності солоду. Ключовий QTL ідентифіковано і для маркування гена, що контролює біосинтез фруктози, та локалізований у тому ж сегменті хромосоми 3H, що й ген *sdw*, який контролює ознаку напівкарликовості рослин ячменю [179].

Молекулярні маркери хромосом успішно використовують для поліпшення пивоварної якості і при віддаленій гібридизації ячменю з використанням одного з найпопулярніших дикорослих родичів культурного ячменю *Hordeum spontaneum*. Ця рослина містить ген, що контролює біосинтез активної й термостабільної форми  $\beta$ -амілази (варіант *Sd3*).

Із використанням системи молекулярних маркерів SNP, SSR, CAPS ген *Sd3* перенесено в культурний ячмінь і отримано рослини із задовільними агрономічними показниками й істотно підвищеними характеристиками активності та термостабільності β-амілази зерна ячменю. Рівні загальної активності та термостабільності β-амілази солоду підвищилися відповідно в середньому на 30 і 77 % лише внаслідок інтрогресії в культурний ячмінь гена *Sd3* від *Hordeum spontaneum* [98].

Молекулярні маркери застосовують також для дослідження генетичного контролю інших складових компонентів ячмінного зерна, які належать до показників кормової та харчової якості. Так, ячмінь голозерний за наявності гена *waxy* (який контролює нульовий вміст амілози в крохмалі) має високу харчову дієтичну цінність, оскільки містить більше корисних для здоров'я людини β-глюканів, ніж плівчастий ячмінь. Тому при селекції голозерного ячменю харчового використання, який би комбінував в одному генотипі рецесивний ген голозерності та ген *waxy*, важливо контролювати одночасно успадкування обох генів. Ген *waxy* на відміну від гена *nud* (голозерність) не має морфологічних ознак, тому його можна контролювати лише біохімічними методами. Молекулярні SSR-маркери сьогодні розроблені й успішно використовуються для контролю як рецесивного алеля *nud* (довге плече хромосоми 7Н), так і гена *waxy* в рутинній роботі із селекційними популяціями ячменю. Маркер sKT3 (AFLP фрагмент) настільки міцно зчеплений з алелем *nud* (лише 0,2 сМ рекомбінації), що його майже безпомилково можна використовувати для надійного контролю останнього в селекційних популяціях.

Підсумовуючи опрацьовані літературні дані, слід зазначити, що за останні роки було доведено катастрофічну нестачу в раціоні людини важливих поживних речовин, джерелом яких може бути ячмінь. До складу зерна останнього входить значна кількість клітковини, крохмалю, амінокислот і білків, тому він дуже корисний для здоров'я людини. Крім того, ячмінь багатий на вітаміни Е, А, D, вітаміни групи В та мікроелементи — калій, кальцій, магній, йод, кремнієву кислоту, залізо, цинк, нікель, бром, манган.

Завдяки великому вмісту клітковини ячмінь сприяє ефективному очищенню кишківника, а також усього організму в цілому від токсичних речовин. З урахуванням унікальних властивостей ячменю є всі підстави вважати, що дослідження, спрямовані на виведення нових сортів і селекційних ліній з поліпшеними харчовими властивостями за складом крохмалю, якістю білка, вмістом вітамінів, мінералів і антиоксидантів, необхідні та актуальні.

#### REFERENCES

1. Kumar, P., Banjarey, P., Malik, R., Tikle, A.N. & Verma, R.P. (2020). Population structure and diversity assessment of barley (*Hordeum vulgare* L.) introduction from ICARDA. *Journal of Genetics*, 99(70), pp. 70-79. <https://doi.org/10.1007/s12041-020-01226-6>
2. Karoui-Kharrat, D., Kaddour, H., Hamdi, Y., Mokni, M., Amri, M. & Mezghani, S. (2017). Response of antioxidant enzymes to cadmium-induced cytotoxicity in rat cerebellar granule neurons. *Open Life Sci.*, 12, pp. 113-119. <https://doi.org/10.1515/biol-2017-0013>
3. 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. *Therapeutic and Clinical Risk Management*, 14, pp. 247-256. <https://doi.org/10.2147/TCRM.S151424>
4. Idehen, E., Tang, Y. & Sang, Sh. (2017). Bioactive phytochemicals in barley. *J. of Food and Drug Analysis*, 25, pp. 148-161. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.08.002>
  5. Yaoguang, L., Dongyun, M., Dexiang, S. & Chenyang, W. (2015). Total phenolic, flavonoid content, and antioxidant activity of flour, noodles, and steamed bread made from different colored wheat grains by three milling methods. *The Crop J.*, 3, pp. 328-334. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2015.04.004>
  6. Sherman, J., Souza, E., See, D. & Talbert, L.E. (2008). Microsatellite markers for kernel color genes in wheat. *Crop Science*, 48, pp. 1419-1424. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.10.0561>
  7. Abraham, Z., Iglesias-Fernandez, R., Martinez, M., Rubio-Somoza, I., Diaz, I., Carbonero, P. & Vicente-Carbajosa, J. (2016). A developmental switch of gene expression in the barley seed mediated by HvVP1 (Viviparous-1) and HvGAMYB interactions. *Plant Physiol.*, 170, pp. 2146-2158. <https://doi.org/10.1104/pp.16.00092>
  8. Bai, B., Peviani, A., Gamm, M., Snel, B., Bentsink, L. & Hanson, J. (2017). Extensive translational regulation during seed germination revealed by polysomal profiling. *New Phytol.*, 214, pp. 233-244. <https://doi.org/10.1111/nph.14355>
  9. Narsai, R., Gouil, Q., Secco, D., Srivastava, A., Karpievitch, Y.V., Liew, L.C., Lister, R., Lewsey, M.G. & Whelan, J. (2017). Extensive transcriptomic and epigenomic remodeling occurs during *Arabidopsis thaliana* germination. *Genome Biol.*, 18, p. 172. <https://doi.org/10.1186/s13059-017-1302-3>
  10. Resentini, F., Felipo-Benavent, A., Colombo, L., Blazquez, M.A., Alabadi, D. & Masiero, S. (2015). TCP14 and TCP15 mediate the promotion of seed germination by gibberellins in *Arabidopsis thaliana*. *Mol. Plant.*, 8, pp. 482-485. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2014.11.018>
  11. Zhu, Y., Li, T., Fu, X., Abbasi, A.M., Zheng, B. & Liu, R.H. (2015). Phenolics content, antioxidant and antiproliferative activities of dehulled highland barley (*Hordeum vulgare* L.). *J. Funct. Foods.*, 19, pp. 439-450. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.09.053>
  12. Krzysztoforska, K., Mirowska-Guzel, D. & Widy-Tyszkiewicz, E. (2019). Pharmacological effects of protocatechuic acid and its therapeutic potential in neurodegenerative diseases: Review on the basis of in vitro and in vivo studies in rodents and humans. *Nutr. Neurosci.*, 22, pp. 72-82. <https://doi.org/10.1080/1028415X.2017.1354543>
  13. Awasthi, R., Bhandari, K. & Nayyar, H. (2015). Temperature stress and redox homeostasis in agricultural crops. *Front. Environ. Sci.*, 3, p. 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2015.00011>
  14. Rybalka, O.I. (2011). *Yakist pshenytyci ta ii polipshennya*. Kyiv [in Ukrainian].
  15. Hammami, Z., Gauffreteau, A., BelhajFraj, M., Sahli, A., Jeuffroy, M.H., Rezgui, S., Bergaoui, K., McDonnell, R. & Trifa, Y. (2017). Predicting yield reduction in improved barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties and landraces under salinity using selected tolerance traits. *Field Crops Res.*, 211, pp. 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.018>
  16. Bohmdorfer, 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>
  17. Lan, S., Li, X. & Liu, X.P. (2008). Genetic of seed pigment of blue kernel wheat. *Acta Agriculturae Boreali Sinica*, 23, pp. 12-14.
  18. Qualset, C., Soliman, K., Jan, C., Dvorak, J., McGuire, P. & Vogt, H. (2005). *Triticum aestivum* blue aleurone genetic stock. *Crop Sci.*, 45, pp. 432-435.
  19. Liu, H.L., Chen, X.M., Zhang, D.W., Wang, J., Wang, S. & Sun, B.G. (2018). Effects of highland barley bran extract rich in phenolic acids on the formation of N $\epsilon$ -carboxymethyllysine in a biscuit model. *J. Agric. Food Chem.*, 66, pp. 1916-1922. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b04957>
  20. Ahmed, Z., Tetlow, I.J., Ahmed, R., Morell, M.K. & Emes, M.J. (2015). Protein-protein interactions among enzymes of starch biosynthesis in high-amylose barley genotypes reveal differential roles of heteromeric enzyme complexes in the synthesis of A and B granules. *Plant Sci.*, 233, pp. 95-106. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.12.016>
  21. Oliver, R.E., Islamovic, E., Obert, D.E., Wise, M.L. & Herrin, L.L. (2015). Comparative systems biology reveals allelic variation modulating tocopherol profiles



- in barley (*Hordeum vulgare* L.). PLoS One, 54, p. 9. e96276. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0106020>
22. Pasam, R.K., Sharma, R., Malosetti, M., Eeuwijk, F.A., Haseneyer, G., Kilian, B. & Graner, A. (2012). Genome-wide association studies for agronomical traits in a world wide spring barley collection. BMC Plant Biol., 12, p. 16. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-12-16>
  23. Sallam, A.H., Tyagi, P., Brown-Guedira, G., Muehlbauer, G.J., Hulse, A. & Steffenson, B.J. (2017). Genome-wide association mapping of stem rust resistance in *Hordeum vulgare* subsp. *spontaneum*. Genes Genomes Genetics, 7, pp. 3491-3507. <https://doi.org/10.1534/g3.117.300222>
  24. Zhang, C., Cahoon, R.E., Hunter, S.C., Chen, M., Han, J. & Cahoon, E.B. (2013). Genetic and biochemical basis for alternative routes of tocotrienol biosynthesis for enhanced vitamin E antioxidant production. The Plant Journal, 73, pp. 628-639. <https://doi.org/10.1111/tpj.12067>
  25. Sichcar, N.M. (1963). On the dependence of gluten formation on the total protein content and its alcohol-soluble fraction. Naych. tr. Kybanskoy st., 2, pp. 278-288 [in Ukrainian].
  26. Bader, U.I., Ain, H., Saeed, F., Ahmad, N., Imran, A., Niaz, B., Afzaal, M., Imran, M., Tufail, T. & Javed, A. (2018). Functional and health-endorsing properties of wheat and barley cell wall's non-starch polysaccharides. Int. J. Food Prop., 21, pp. 1463-1480. <https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1489837>
  27. Kruma, Z., Tomsone, L., Galoburda, R., Straumite, E., Kronberga, A. & Assveen, M. (2016). Total phenols and antioxidant capacity of hull-less barley and hull-less oats. Agronomy Research, 14, pp. 1361-1371.
  28. Rybalka, O., Morgun, B. & Polishchuk, S. (2016). Barley as a product of functional nutrition. Kyiv [in Ukrainian].
  29. Morell, M., Kosar-Hashemi, B., Cmiel, M., Samuel, M., Chandler, P., Rahman, S., Buleon, A., Batey, I. & Li, Z. (2003). Barley *sex6* mutants lack starch synthase IIa activity and contain a starch with novel properties. Plant J., 34, pp. 173-185. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313x.2003.01712.x>
  30. Elhassan, M.S., Emmambux, M.N., Hays, D.B., Peterson, G.C. & Taylor, J.N. (2015). Novel biofortified sorghum lines with combined waxy (high amylopectin) starch and high protein digestibility traits: Effects on endosperm and flour properties. J. Cereal Sci., 65, pp. 132-139. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.06.017>
  31. Zhu, Y., Li, T., Fu, X., Brennan, M., Abbasi, A.M., Zheng, B. & Liu, R.H. (2016). The use of an enzymatic extraction procedure for the enhancement of highland barley (*Hordeum vulgare* L.) phenolic and antioxidant compounds. Int. J. Food Sci. Technol., 51, pp. 1916-1924. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13165>
  32. Guariguata, L., Whiting, D.R., Hambleton, I.R., Beagle, J., Linnenkamp, U. & Shaw, J.E. (2014). Global estimates of diabetes prevalence for 2013 and projections for 2035. Diabetes Res. Clin. Pract., 103, pp. 137-149. <https://doi.org/10.1016/j.diabres.2013.11.002>
  33. Lockyer, S. & Nugent, A.P. (2017). Health effects of resistant starch. Nutr. Bull., 2, pp. 10-41. <https://doi.org/10.1111/nbu.12244>
  34. Bhattarai, R.R., Dhita, I.S., Mense, A., Gidley, M.J. & Shi, Y.-C. (2018). Intact cellular structure in cereal endosperm limits starch digestion in vitro. Food Hydrocoll., 81, pp. 139-148. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.02.027>
  35. Fedak, G. & Roche, I.A. (1997). Lipid and fatty acid composition of barley kernels. Can. J. Plant Sci., 57, pp. 257-260. <https://doi.org/10.4141/cjps77-035>
  36. Bhatti, R.S. & Rosnagel, B.B. (1979). Oil content of Riso 1508 barley. J. Cereal Chem., 56, p. 586.
  37. Baghalian, K., Hajirezaei, M.R. & Schreiber, F. (2015). Plant metabolic modeling: achieving new insight into metabolism and metabolic engineering. Plant Cell., 26(10), pp. 3847-3866. <https://doi.org/10.1105/tpc.114.130328>
  38. Carciofi, M., Blennow, A., Jensen, S.L., Shaik, S.S., Henriksen, A., Buléon, A., Holm, P.B. & Hebelstrup, K.H. (2012). Concerted suppression of all starch branching enzyme genes in barley produces amylose-only starch granules. BMC Plant Biol., 12, p. 223. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-12-223>
  39. Ehrenbergerova, J., Belcrediova, N., Pryma, J., Vaculova, K. & Newman, C.W. (2006). Effect of cultivar, year grown, and cropping system on the content of tocopherols and

- tocotrienols in grains of hulled and hullless barley. *J. Plant Foods Human Nutr.*, 61, pp. 145-150. <https://doi.org/10.1007/s11130-006-0024-6>.
40. Grafahrend-Belau, E., Schreiber, F., Koschützki, D. & Junker, B.H. (2009). Flux balance analysis of barley seeds: a computational approach to study systemic properties of central metabolism. *Plant Physiol.*, 149(1), pp. 585-598. <https://doi.org/10.1104/pp.108.129635>
  41. Vaculova, K., Ehrenbergerova, J., Nemejc, R. & Pryma, J. (2001). The variability and correlations between the content of vitamin E and its isomers in hybrids of the F2 generation of spring barley. *Acta Univ. Agric. et Silva. Mendel. Brun.*, 5, pp. 1-9.
  42. Borisjuk, L., Macherel, D., Benamar, A., Wobus, U. & Rolletschek, H. (2007). Low oxygen sensing and balancing in plant seeds — a role for nitric oxide. *New Phytol.*, 176(4), pp. 813-823. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02226.x>
  43. Einbonda, L., Reynertsona, K., Luoa, X.-D., Margaret, J., Basileb, M. & Kennelly, E. (2004). Anthocyanin antioxidants from edible fruits. *Food Chem.*, 8, pp. 23-28. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(03\)00162-6](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00162-6)
  44. Dykes, L. & Rooney, L. (2006). Sorghum and millet phenols and antioxidants. *J. Cereal Sci.*, 44, pp. 236-251. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.06.007>
  45. Cavallero, A. & Viva, M. (2000). Stanca Improvement of spaghetti and bread with beta-glucan and tocopherols from naked barley flour. *Proc. of the 8<sup>th</sup> Int. Barley Genet. Symp.*, 1, pp. 282-285.
  46. Li, L., Perret, J., Haris, M., Wilson, J. & Haley, S. (2003). Antioxidant Properties of Bran Extracts from «Akron» Wheat Grown at Different Locations. *J. Agric. Food Chem.*, 51, pp. 1566-1570. <https://doi.org/10.1021/jf020950z>
  47. Andersen, O. & Jordheim, M. (2006). The anthocyanins. In *Flavonoids: Chemistry, Biochemistry and Applications*. Boca Raton, FL: CRC Press, pp. 471-552.
  48. Julian, I., Gandullo, J., Santos-Silva, L.K., Diaz, I. & Martinez, M. (2013). Phylogenetically distant barley legumains have a role in both seed and vegetative tissues. *J. Exp. Bot.*, 64(10), pp. 2929-2941. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert132>
  48. Rolletschek, H., Melkus, G., Grafahrend-Belau, E., Fuchs, J., Heinzl, N., Schreiber, F., Jakob, P.M. & Borisjuk, L. (2011). Combined noninvasive imaging and modeling approaches reveal metabolic compartmentation in the barley endosperm. *Plant Cell.*, 23(8), pp. 3041-3054. <https://doi.org/10.1105/tpc.111.087015>
  49. Aman, P. & Newman, C.W. (1986). Chemical composition of some different types of barley grown in Montana, USA. *J. Cereal Sci.*, 4, pp. 133-141. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(86\)80016-9](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(86)80016-9)
  50. Liu, R.H. (2007). Potential synergy of phytochemicals in cancer prevention: mechanism of action. *J. Nut.*, 134, pp. 3479-3485. <https://doi.org/10.1093/jn/134.12.3479S>
  51. Rivas-Gonzalo, J.C., Santos-Buelga, C. & Williamson, G. (2003). Analysis of anthocyanins. In *Method in Polyphenol*. The Royal Society of Chemistry, 32, pp. 338-358.
  52. Finch, R. & Simpson, E. (1978). New colors and complementary color genes in barley. *Z. Pflanzenzucht*, 81, pp. 40-53.
  53. Adom, K.K. & Liu, R.H. (2013). Antioxidant Activity of Grains. *J. Agric. Food Chem.*, 50(21), pp. 6182-6187. <https://doi.org/10.1021/jf0205099>
  54. 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>
  55. Pasqualone, A., Bianco, A.M., Paradiso, V.M., Summo, C., Gambacorta, G., Caponio, F. & Blanco, A. (2015). Production and characterization of functional biscuits obtained from purple wheat. *Food Chem.*, 180, pp. 64-70. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.02.025>
  56. 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>
  57. 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>

58. Long, Z., Jia, Y., Tan, C., Zhang, X.-Q., Angessa, T., Broughton, S., Westcott, S., Dai, F., Zhang, G., Sun, D., Xu, Y. & Li, C. (2019). Genetic mapping and evolutionary analyses of the black grain trait in barley. *Front Plant Sci.*, 9, pp. 1-11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01921>
59. Kahkonen, M. & Heinonen, M. (2003). Antioxidant activity of anthocyanins and their aglycones. *J. Agric. Food Chem.*, 51, pp. 628-633. <https://doi.org/10.1021/jf025551i>
60. 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. <https://doi.org/10.3945/jn.109.105155>
61. Fukumoto, L. & Mazza, G. (2000). Assessing antioxidant and prooxidant activities of phenolic compounds. *J. Agric. Food Chem.*, 48, pp. 3597-3604. <https://doi.org/10.1021/jf000220w>
62. 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. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.06.034>
63. 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. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2004.02.021>
64. 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. [https://doi.org/10.1016/S0304-3835\(02\)00583-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3835(02)00583-9)
65. 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. <https://doi.org/10.6133/APJCN.2007.16.2.01>
66. Sajilata, M.G., Singhal, R.S. & Kulkarni, P.R. (2006). Resistant Starch-A Review. *Food Science and Food Safety*, 5, pp. 1-17. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2006.tb00076.x>
67. Ojo, O., Adebowale, F. & Wang, X.H. (2018). The effect of dietary glycaemic index on glycaemia in patients with type 2 diabetes: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Nutrients*, 10, p. 373. <https://doi.org/10.3390/nu10030373>
68. Englyst, K., Vinoy, S., Englyst, H. & Lang, V. (2003). Glycaemic index of cereal products explained by their content of rapidly and slowly available glucose. *Br. J. of Nutr.*, 89, pp. 329-339. <https://doi.org/10.1079/BJN2002786>
69. Sui, X., Yap, Yi. & Zhou, W. (2015). Anthocyanins During Baking: Their Degradation Kinetics and Impacts on Color and Antioxidant Capacity of Bread. *Food Bioprocess Technol.*, 8, pp. 983-994. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1464-x>
70. Wu, X., Beecher, G.R., Holden, J.M., Haytowitz, D.B., Gebhard, S.E. & Prior, R.L. (2004). Lipophilic and hydrophilic antioxidant capacities of common foods in the United States. *J. Agric. Food Chem.*, 52, pp. 4026-4037. <https://doi.org/10.1021/jf049696w>
71. Bashir, K.M. & Choi, J.S. (2017). Clinical and physiological perspectives of  $\beta$ -glucans: The past, present, and future. *Int. J. of Mol. S.*, 18(9), p. 1906. <https://doi.org/10.3390/ijms18091906>
72. Jabri, B. & Sollid, L.M. (2017). T cells in celiac disease. *J. Immunol.*, 198, pp. 3005-3014. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.1601693>
73. Niu, M. & Hou, G.G. (2018). Whole wheat noodle: Processing, quality improvement, and nutritional and health benefits. *Cereal Chem. J.*, 96, pp. 23-33. <https://doi.org/10.1002/cche.10095>
74. Rosell, C., Barro, F. & Sousa, C. (2014). Cereals for developing gluten-free products and analytical tools for gluten detection. *J. Cereal Sci.*, 59, pp. 354-364. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.10.001>
75. Zuidmeer, L., Goldhahn, K. & Rona, R. (2008). The prevalence of plant food allergies: a systematic review. *J. Allergy Clin. Immunol.*, 121, pp. 1210-1218. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2008.02.019>
76. Comino, I., Real, A. & Moreno, M. (2013). Immunological determination of gliadin 33-mer equivalent peptides in beers as a specific and practical analytical method to assess safety for celiac patients. *J. Sci. Food Agric.*, 15, pp. 933-943. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5830>
77. Zhang, K., Yang, J., Qia, Z., Cao, X., Luo, Q., Zhao, J., Wa, F. & Zhan, W. (2019). Assessment of  $\beta$ -glucans, phenols, flavor and volatile profiles of hullless barley wine ori-

- ginating from highland areas of China. *Food Chem.*, 293, pp. 32-40. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.04.053>
78. Jood, S. & Kalra, S. (2001). Chemical composition and nutritional characteristics of some hull less and hulled barley cultivars grown in India. *Nahrung*, 45, pp. 35-39. [https://doi.org/10.1002/1521-3803\(20010101\)45:1<35::AID-FOOD35>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/1521-3803(20010101)45:1<35::AID-FOOD35>3.0.CO;2-U)
79. Oboh, G., Ademiluyi, A.O., Akinyemi, A.J., Henle, T., Saliu, J.A. & Schwarzenbolz, U. (2012). Inhibitory effect of polyphenol-rich extracts of jute leaf (*Corchorus olitorius*) on key enzyme linked to type 2 diabetes ( $\alpha$ -amylase and  $\alpha$ -glucosidase) and hypertension (angiotensin I converting) in vitro. *J. Funct. Foods.*, 4, pp. 450-458. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2012.02.003>
80. Otman, E.M., Frid, A.H., Groop, L.C. & Bjorck, M.E. (2005). A dietary exchange of common bread for tailored bread of low glycaemic index and rich in dietary fibre improved insulin economy in young women with impaired glucose tolerance. *Eur. J. Clin. Nutr.*, 60, pp. 334-341. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1602319>
81. Vicentini, A., Liberatore, L. & Mastrocola, D. (2016). Functional foods: Trends and development of the global market. *Ital. J. Food Sci.*, 28, pp. 338-351. <https://doi.org/10.14674/1120-1770/ijfs.v211>
82. Yildiz, G. & Bigicli, N. (2012). Effects of whole buckwheat flour on physical, chemical and sensory properties of flat bread, *Lavas. Czech. J. Food Sci.*, 30(6), pp. 534-540. <https://doi.org/10.17221/10/2012-CJFS>
83. Zhou, G., Panozzo, J., Zhang, X.-Q., Cakir, M., Harasymow, S. & Li, C. (2016). QTL mapping reveals genetic architectures of malting quality between Australian and Canadian malting barley (*Hordeum vulgare* L.). *Mol. Breeding*, 36(6), pp. 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11032-016-0492-9>
84. Mattila, P., Pihlava, J.M. & Hellstrom, J. (2005). Contents of phenolic acids, alkyl- and alkenylresorcinols, and avenanthramides in commercial grain products. *J. Agric. Food Chem.*, 53, pp. 8290-8295. <https://doi.org/10.1021/jf051437z>
85. Newbiggin, E., Bacic, A., Langridge, P. & Fincher, G. (2004). Functional genomics in the productivity and-use quality of barley. *Czech. J. Genet. Plant Breed.*, 40, p. 107.
86. Onimawo, I.A. & Asug, S. (2004). Effects of germination on the nutrient content and functional properties of pigeon pea flour. *J. Food Sci. Technol.*, 41, pp. 170-174. <https://doi.org/10.3923/pjn.2009.737.744>
87. Dawson, I.K., Russell, J., Powell, W., Steffenson, B. & Waugh, R. (2015). Barley: a translational model for adaptation to climate change. *New Phytologist*, 206, pp. 913-931. <https://doi.org/10.1111/nph.13266>
88. Tanno, K. & Willcox, G. (2012). Distinguishing wild and domestic wheat and barley spikelets from early Holocene sites in the Near East. *Vegetation History and Archaeobotany*, 21, pp. 107-111. <https://doi.org/10.1007/s00334-011-0316-0>
89. Farzaneh, V., Ghodsvali, A., Bakhshabadi, H., Zare, Z. & Carvalho, I.S. (2017). The impact of germination time on the some selected parameters through malting process. *Int. J. Biol. Macromol.*, 94, pp. 663-668. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.10.052>
90. Dogan, Y., Kendal, E. & Oral, E. (2016). Identifying of relationship between traits and grain yield in spring Barley by GGE biplot analysis. *J. Agric. Forestry*, 62(4), pp. 239-252. <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.62.4.25>
91. Hafez, Y.M., Mourad, R.Y., Mansour, M. & Abdelaal, K.A. (2014). Impact of non-traditional compounds and fungicides on physiological and biochemical characters of barley infected with *Blumeria graminis* f. sp. *hordei* under field conditions. *J. Biol. Pest. Control*, 24, pp. 445-453.
92. Hepworth, C., Doheny-Adams, T., Hunt, L., Cameron, D.D. & Gray, J.E. (2015). Manipulating stomatal density enhances drought tolerance without deleterious effect on nutrient uptake. *New Phytol.*, 208, pp. 336-341. <https://doi.org/10.1111/nph.13598>
93. Tamang, P., Neupane, A., Mamidi, S., Friesen, T. & Brueggeman, R. (2015). Association mapping of seedling resistance to spot form net blotch in a worldwide collection of barley. *Phytopathology*, 105(4), pp. 500-508. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-14-0106-R>
94. Wang, W., Vinocur, B. & Altman, A. (2003). Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: Towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta*, 218, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1007/s00425-003-1105-5>
95. Bhargava, S. & Sawant, K. (2013). Drought stress adaptation: Metabolic adjustment and regulation of gene expression. *Plant Breed.*, 132, pp. 21-32.

96. Gao, J., Vasanthan, T. & Hoover, R. (2009). Isolation and Characterization of High-Purity Starch Isolates from Regular, Waxy, and High-Amylose Hulless Barley Grains. *Cereal Chemistry*, 86, pp. 157-163. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-86-2-0157>
97. Ahmed, I.M., Dai, H., Zheng, W., Cao, F., Zhang, G., Sun, D. & Wu, F. (2013). Genotypic differences in physiological characteristics in the tolerance to drought and salinity combined stress between Tibetan wild and cultivated barley. *Plant Physiol. Biochem.*, 63, pp. 49-60. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.11.004>
98. Polakova, K., Vaculova, K. & Kucera, L. (2004). Selection of barley lines with waxy endosperm and hulless grains: genotyping and phenotyping. *Czech. J. Genet. Plant Breed.*, 40, p. 114.
99. 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. <https://doi.org/10.1093/ajcn/78.3.508S>

Отримано 20.12.2021

PHYSIOLOGICAL-BIOCHEMICAL AND GENETIC FEATURES OF BARLEY AS A PRODUCT FOR FUNCTIONAL NUTRITION

*V.B. Katrii<sup>1</sup>, A.I. Rybalka<sup>1,2</sup>, B.V. Morgun<sup>1,3</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Plant Physiology and Genetics, National Academy of Sciences of Ukraine  
31/17 Vasylykivska St., Kyiv, 03022, Ukraine

<sup>2</sup>Plant Breeding and Genetics Institute—National Center of Seed and Cultivars Investigation, National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine

<sup>3</sup>Ovidiopol'ska Road, Odesa, 65036, Ukraine

<sup>3</sup>Institute of Cell Biology and Genetic Engineering, National Academy of Sciences of Ukraine

148 Akademika Zabolotnoho St., Kyiv, 03143, Ukraine

e-mail: katriy.vlad@gmail.com

The literature review presents current data on the physiological, biochemical and genetic characteristics of barley as a product for functional nutrition. Attention to barley increased especially in the last 10–15 years due to the latest clinical, dietary and biochemical studies of its grain products, performed in laboratories of leading countries, which proved the exceptionally high nutritional value of barley grain, especially its ability to serve prophylactic against such serious diseases of the last century as coronary heart disease, diabetes, etc. It is shown that the extremely high nutritional value of barley grain is due to the content of unique non-starch polysaccharides beta-glucans, a complex of substances with a wide range of antioxidant activity (tocol, phytosterols, flavonoids, phytophenols), vitamin B complex, nicotinic acid, nicotine minerals such as iron, zinc, manganese, selenium. Attention is paid to the technology of selection of hull-less barley, which includes a number of specific tasks related to the physical characteristics of grain without hull, its biochemical and technological properties. The latest trends in genetic research aimed at improving barley grain in terms of starch composition, protein quality, content of vitamins, minerals and antioxidants are highlighted. The prospects of using molecular-biological methods to improve the nutritional characteristics of barley are shown, which allow using specific molecular markers to direct the genetic variability of these characteristics in the direction necessary for the breeder. A new direction for Ukraine in the selection of cereals with colored grain in order to increase the nutritional value of grain, which is the basis for the emergence of new functional foods in the food market of our country, is described.

*Key words:* barley, gluten, amylose, phytates, antioxidant activity, anthocyanins, genetic research, molecular markers.