

УДК 633.16:631.527

Н.І. Васько*, Є.О. Михайленко

Якісні властивості голозерного ячменю та успадкування забарвлення зерна

Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН України, Харків, Україна

*E-mail: nvasko1964@gmail.com

UDC 633.16:631.527

N.I. Vasko*, Ye.O. Mykhailenko

Quality Properties of Naked Barley and Caryopsis Color Inheritance

Yuriev Plant Production Institute of NAAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

*E-mail: nvasko1964@gmail.com

Реферат: В Інституті рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН розгорнуто селекцію голозерного ячменю харчового напряму використання, в тому числі з кольоровим зерном та крохмалем зі зміненим складом (waxy). Вихідний матеріал одержано з Національного центру генетичних ресурсів рослин України – зразки різновиду *nudum* L., *daghestanicum* Vav. et Orl. із сіро-зеленим зерном, *viride* Vav. et Orl. із зеленим зерном, *violaceum* Koern. та *nudidubium* Koern. з фіолетовим зерном, *nigrinudum* Vav., *nudimelanocrithum* Giess. et al. з чорним зерном та лінія SGI 7024 з блакитним зерном селекції СГІ-НЦНС. Джерелами зміненого складу крохмалю були голозерні сорти канадської селекції CDC Alamo та Mebere (waxy) та CDC Hilose (high amylose). Установлено, що вміст фенольних сполук та антоціанидинів залежить від генотипу та умов вирощування, а стабільно високими ці показники були у лінії Віолет 18-1207 та сортів CDC Alamo, CDC Hilose. Створена нами цінна лінія Віолет 18-1207 (UA 0805977) різновиду *nudidubium* має не лише зерно фіолетового кольору, але і всі інші частини рослини мають яскраво фіолетове забарвлення у фазі колосіння–налив. Після дозрівання рослина набуває сіро-бузкового кольору. Вміст антоціанинів у зернівці складає 0,260 умов. од. D530/г, вміст фенолів теж високий – 1,04 мг/г за еквівалентом галової кислоти. За аналізом гібридних популяцій встановлено, що в F1 успадковується, як правило, темне забарвлення, а деякі зразки стабільно передають у поколіннях своє забарвлення зерна за участі в скрещуванні як за материнський, так і за батьківський компонент. У популяціях F2 відбувалося розщеплення за кольором зерна, успадкування забарвлення зернівки у ячменю можна пояснити взаємодією неалельних генів переважно за типом компліментарності. У деяких популяціях виявлено новоутворення, що є цінним для збагачення вихідного матеріалу для селекції.

Ключові слова: ярий голозерний ячмінь, кольорове зерно, селекція, фенольні сполуки, антоціанидини, розщеплення, успадкування.

Abstract: The Yuriev Plant Production Institute of NAAS breeds naked food barleys, including those with pigmented caryopses and waxy starch. The strating material was obtained from the National Center for Plant Genetic Resources of Ukraine: accessions of the varieties *nudum* L. and *daghestanicum* Vav. et Orl. with gray-green caryopses, of the variety *viride* Vav. et Orl. with green caryopses, of the varieties *violaceum* Koern. and *nudidubium* Koern. with purple caryopses, of the varieties *nigrinudum* Vav. and *nudimelanocrithum* Giess. et al. with black caryopses, and line SGI 7024 with blue caryopses bred at the Plant Breeding and Genetics Institute – National Center of Seed and Cultivar Investigations. The sources of changed starch composition were Canadian naked cultivars ‘CDC Alamo’ (waxy), ‘Mebere’ (waxy), and ‘CDC Hilose’ (high amylose). It was found that the contents of phenolic compounds and anthocyanins depended on genotype and growing conditions, and these characteristics were consistently high in line ‘Violet 18-1207’ and cvs. ‘CDC Alamo’ and ‘CDC Hilose’. In our valuable line ‘Violet 18-1207’ (UA 0805977) of the variety *nudidubium*, not only caryopses are purple, but also all other parts of the plant are bright purple in the “earring-filling” phase. After ripening, the plant turns gray-lilac. The content of anthocyanins in grain is 0.260 relative units D530/g; the content of phenols is also high (1.04 mg/g of gallic

acid equivalent). Analysis of hybrid populations showed that, as a rule, a dark color was inherited by F1 and some accessions stably transmitted their caryopsis color over generations when participating in crossing as both the female and male forms. In F2 populations, segregation occurred by caryopsis color; the inheritance of caryopsis color in barley can be explained by interactions of non-allelic genes mainly via complementarity. In some populations, traits that were not intrinsic to parents and valuable for enriching starting materials for breeding were detected.

Key words: spring naked barley, pigmented caryopses, breeding, phenolic compounds, anthocyanins, segregation, inheritance.

Україна є одним з провідних експортерів зерна ячменю в світі, але важливою проблемою на шляху покращення її позицій на світовому ринку є нестабільність обсягів виробництва зерна ячменю за роками, що в першу чергу зумовлено значною чутливістю сучасних сортів до погодних флуктуацій. Сільськогосподарське виробництво потребує високоадаптивних сортів ячменю, з високою врожайністю та якістю продукції. Ячмінь – стресостійка культура з великим потенціалом, але для його реалізації необхідним є дослідження стресостійкості разом з глибоким розумінням фізіологічної основи багатьох агрономічних ознак, зокрема ефективного використання води та поживних речовин [1].

Ячмінь має унікальні дієтичні властивості та є одним з найбагатших джерел фенольних сполук серед зернових культур. Останнім часом зростає інтерес до зерна ячменю як сировини для виготовлення продуктів дієтичного харчування. Такі продукти знижують вміст холестерину в крові, регулюють глікемічний індекс, виявляють антиоксидантну активність. Вони можуть бути складовою профілактики розвитку цукровому діабету, серцево-судинних та онкологічних захворювань. У 2006 р. Адміністрація США з питань харчів та лікарських засобів (US FDA) віднесла зерно ячменю до продуктів, які знижують ризик коронарної хвороби серця, тобто до продуктів функціонального харчування. Поняття «продукти функціонального призначення» як ті, що мають лікувально-профілактичний вплив на людський організм, тобто, окрім енергетичної цінності забезпечують нормальне фізіологічне функціонування систем людини з'явилося в Японії, де у 1991 р. законодавчо прийнято вимоги до виробництва харчових продуктів зі специфічною лікувальною дією FOSHU (Food of Specific Health Use) [1, 2, 3]. Ця програма стала прообразом для подібних програм у Німеччині, Франції, Фінляндії, Швеції, США, Канаді, Китаї, Кореї та багатьох інших країнах. [1, 2, 3, 4, 5].

Ukraine is one of the leading exporters of barley grain in the world, but the year-to-year instability of barley grain production, which is primarily caused by significant susceptibility of current cultivars to weather fluctuations, is an important obstacle on the way to improving Ukraine's position on the world market. Agricultural production requires highly adaptable and high-yielding barley cultivars with top-quality grain. Barley is a stress-resistant crop with great potential; however, for its fulfilment, it is necessary to study stress resistance along with a deep insight into the physiological bases of many agronomic traits, in particular, the efficient use of water and nutrients [1].

Barley has unique dietary properties and is one of the richest sources of phenolic compounds among cereals. Recently, there has been a growing interest in barley grain as a raw material for dietary food production. Such products reduce cholesterol levels in the blood, regulate the glycemic index, and have antioxidant activity. They can be a component of the prevention of the development of diabetes, cardiovascular and oncological diseases. In 2006, the US Food and Drug Administration (US FDA) classed barley grain as a product that reduces the risk of coronary heart disease, that is, as a functional food. The concept of functional products as those that have a therapeutic and preventive effects on the human body, i.e., in addition to energy, ensure the normal physiological functioning of human systems, appeared in Japan, where the requirements for the production of foods with specific therapeutic effects (Food of Specific Health Use [FOSHU]) were approved legislatively in 1991 [1, 2, 3]. This program has become a model for similar programs in Germany, France, Finland, Sweden, USA, Canada, China, Korea and many other countries. [1, 2, 3, 4, 5].

Відомо, що найбільша кількість сполук з антиоксидантною активністю зосереджена в периферійних шарах зернівки ячменю [6-8]. Але при виготовленні продуктів з плівчастого ячменю під час шліфування із зерна видаляється частина цінних для здоров'я нутрієнтів. Тому все більшу увагу виробників привертає голозерний ячмінь, у якого за відсутності операції шліфування всі цінні компоненти зберігаються в зерні та продукції, виготовленої з нього.

Антиоксидантна активність (АОА) є головним чинником, який визначає цінність продуктів харчування для здоров'я людини. Рівень цього показника у ячменю є одним з найвищих серед зернових культур, у чисельних дослідженнях спостерігали стійку залежність АОА від генотипу [9–22]. Біоактивні компоненти в різній кількості присутні в зерні злаків у залежності від генотипу. Антиоксидантні властивості фенольних компонентів зерна або одержаних з нього харчових добавок асоційовані з позитивним впливом на здоров'я людей [9, 15, 23, 24, 25].

Антиоксидантний потенціал зернових культур значною мірою корелює з вмістом у них поліфенолів. Цільнозернові продукти є джерелом багатьох антиоксидантів: вітаміну Е, фолієвої кислоти, фенольних сполук, каротиноїдів, фітинової кислоти, цинку, заліза, селену, міді, марганцю [26, 27]. Вміст фенольних сполук також залежить від генотипу та умов середовища. У дослідженні 13 сортів ячменю в Онтаріо цей показник варіював від 987 мкг/г до 3481 мкг/г [7]. Китайськими вченими досліджено антиоксидантну активність у 67 культурних та 156 тибетських генотипів ячменю. Визначено QTLs, які контролюють вміст фенольних сполук у тибетському ячменю. Також встановлено, що більшість маркерів, які пов'язані з вмістом фенолів, є різними у дикорослого та культурного ячменю [28]. Японськими вченими встановлено, що загальний вміст поліфенолів позитивно корелює з антирадикальною активністю, що визначається за реакцією дифенілпікрилгідразилом (DPPH) ($r = 0,875$, $P < 0,01$). Високий вміст фенольних кислот зумовлював високу антиоксидантну активність також і перлового ячменю [28]. У Боснії і Герцеговині було досліджено антиоксидантну активність різних зернових культур, у тому числі ячменю, та її залежність від вмісту фенольних сполук. У результаті було встановлено тісну

It is known that the largest amounts of compounds with antioxidant activity are concentrated in the peripheral layers of the barley caryopsis [6-8]. However, when making products from chaffy barley, during defuzzing, some of the nutrients valuable for health are removed from kernels. Therefore, more and more attention of producers is drawn to naked barley, as it does not require defuzzing and all valuable compounds are preserved in their kernels and products made such kernels.

Antioxidant activity (AOA) is one of the main factors that determine the value of food for human health. Antioxidant activity in barley is one of the highest among cereals; in numerous studies, a steady dependence of AOA on genotype was observed [9–22]. Bioactive components are present in different amounts in cereal kernels, depending on genotype. Antioxidant properties of phenolic compounds in grain or in food additives produced from it are associated with a positive effect on human health [9, 15, 23, 24, 25].

The antioxidant potential of cereals is largely correlated with their contents of polyphenols. Whole grain products are a source of many antioxidants: vitamin E, folic acid, phenolic compounds, carotenoids, phytic acid, zinc, iron, selenium, copper, manganese, etc. [26, 27]. The content of phenolic compounds also depends on genotype and environmental conditions. In a study of 13 barley cultivars conducted in Ontario, this parameter varied from 987 to 3,481 $\mu\text{g/g}$ [7]. Chinese scientists investigated the antioxidant activity of 67 domestic and 156 Tibetan barley genotypes. QTLs controlling the content of phenolic compounds in Tibetan barley were identified. It was also revealed that most of the markers associated with the phenol content were different in wild and domestic barleys [28]. Japanese scientists found that the total content of polyphenols was positively correlated with antiradical activity, as was shown in the reaction with 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) ($r = 0.875$, $P < 0.01$). The high content of phenolic acids determined the high antioxidant activity of pearl barley as well [28]. In Bosnia and Herzegovina, the antioxidant activity in different cereals, including barley, and its relationship with the content of phenolic compounds were investigated. As a result, a

кореляцію між двома дослідженими показниками ($r = 0,99$) [29].

Таким чином, ячмінь відомий високим вмістом біоактивних сполук, які сприяють його харчовій цінності та антиоксидантним властивостям. До них належать гідроксибензойні кислоти (галова, α -гідроксибензойна кислота), гідроксикоричні (ферулова кислота), ванілінова, бузкова, кумарова, кавова кислоти, флавоноїди (кверцитин, кемпферол) та лігнани. Зерно ячменю містить різноманітний спектр флавоноїдів, у тому числі флавоноли, флаванони та антоціани. Не лише зерно ячменю, а також плівки містять багато біоактивних сполук – фенольні речовини, танін, флавоноїди, токоферолі та алкілрезорцини [13, 31-33]. У різних дослідженнях повідомляється про вміст фенольних сполук – від 1,95 до 4,51 мг/г сухої речовини за еквівалентом галової кислоти [13, 20, 26, 34]. Окрім цього, зерно ячменю містить флавоноли міріцетин, катехін та проціанідин B3 [7]. Існують дані про вміст флавоноїдів від 1,38 до 2,24 мг/г сухої речовини, таніну – 1,38–2,24 [13, 31], таніну – 9–70 мг СЕ/100 г борошна [13, 35]. Склад фенольних сполук в ячмені може змінюватися залежно від температури, рН ґрунту, вологості, застосування добрив та стадії збирання врожаю [32, 35–37].

В Італії була ініційована селекційна програма для одержання зародкової плазми голозерного ячменю з кольоровим зерном, багатой на біологічно активні речовини фенольної природи. Встановлено, що вміст більшості біологічно активних сполук мав високу успадкованість, а врожайність зерна мала значиму позитивну кореляцію з величинами вмісту фенолів та антиоксидантної активності. Італійським ученим вдалося створити лінії ячменю, які характеризуються високими показниками скоростиглості, врожайності, натури зерна, маси 1000 зерен у поєднанні з високим вмістом фенолів, антоціанів, флавоноїдів, каротиноїдів, β -глюканів та високою антиоксидантною активністю [38].

Проводяться чисельні дослідження генетичного контролю забарвлення зерна ячменю. Встановлено, що фіолетову пігментацію зерна контролюють гени *Ant1* на хромосомі 7HS та *Ant2* на хромосомі 2HL. Ген *B1p* на хромосомі 1HL контролює чорне забарвлення лусок і перикарпу в ячменю. Успадкування чорного і фіолетового забарвлення відбувається за материнським компонентом [39, 40]. Dongdong

strong correlation was found between these parameters ($r = 0.99$) [29].

Thus, barley is known for its high content of bioactive compounds, which contribute to its nutritional value and antioxidant properties. These include hydroxybenzoic acids (gallic, α -hydroxybenzoic acid), hydroxycinnamic (ferulic, vanillic, syringic, coumaric, caffeic) acids, flavonoids (quercetin, kaempferol), and lignans. Barley grain contains a lot of different flavonoids, including flavonols, flavanones, and anthocyanins. Not only barley kernels but also chaff contain many bioactive compounds: phenolic substances, tannin, flavonoids, tocopherols, and alkylresorcinols [13, 31-33]. The content of phenolic compounds was reported in several studies: from 1.95 to 4.51 mg of gallic acid equivalent per g of dry matter [13, 20, 26, 34]. In addition, barley grain contains flavonols such as myricetin, catechin and procyanidin B3 [7]. There are data on the flavonoid content ranging 1.38 to 2.24 mg/g of dry matter [13, 31] and the tannin content ranging 9–70 mg CE/100 g of flour [13, 35]. The composition of phenolic compounds in barley can vary depending on temperature, soil pH, humidity, fertilization, and stage of harvest [32, 35, 36, 37].

In Italy, a breeding program was launched to obtain a germplasm of naked barley with pigmented caryopses in biologically active phenolic substances. It was demonstrated that the contents of most biologically active compounds were highly heritable features and grain yield was significantly positively correlated with the content of phenolic compounds and antioxidant activity. Italian scientists managed to create high-yielding, early-ripening barley lines with high test weight and thousand kernel weight in combination with high levels of phenols, anthocyanins, flavonoids, carotenoids, and β -glucans and high antioxidant activity [37].

Numerous studies of the genetic control of barley grain color are being conducted. The purple pigmentation of caryopses was revealed to be determined by the *Ant1* gene on chromosome 7HS and *Ant2* gene on chromosome 2HL. The *B1p* gene on chromosome 1HL determines the black color of glumes and pericarp in barley. The black and purple colors are inherited from female forms

Xu et al. [41] ідентифікували ген глутатіон-S-трансферази (HvGST), який відповідає за синє забарвлення алейронового шару в тибетському ячмені qingke. Аналіз мінливості та експресії генів показав, що HvGST також бере участь у транспорті та накопиченні антоціанів у пурпурному ячменю.

У програмах пре-бридингу широко досліджується вміст пігментів у ячменю в залежності від кольору зернівки. Так, встановлено, що пеларгонідини визначають червоне (оранжеве) забарвлення, ціанідини – темно-червоне, дельфінідини – фіолетове (синє) [39, 41]. Пігмент-3-глюкозид волошки був основним антоціанідом у синьому, жовтому та фіолетовому ячмені, в чорному – дельфінідин-3-глюкозид. Темне забарвлення свідчить про збагачений вміст антоціанів [42]. Результатами інших досліджень встановлено підвищену концентрацію β -глюканів та антоціанів у пурпурному та синьому ячмені, тоді як чорний ячмінь не мав таких властивостей [43]. Аналогічні дані щодо підвищеного вмісту антоціанів саме у фіолетового ячменю є у роботі Yao X. et al. [44].

Доведено вплив вмісту фенольних сполук на забарвлення зерна ячменю [7, 40, 42, 45–48]. Зокрема, встановлено, що вміст загальних фенолів та флавоноїдів був високим у пурпурному ячмені; основними фенольними кислотами в синьому ячмені були поліфеноли бензойної кислоти, основними типами флавоноїдів в чорному та синьому ячмені були халкони і флавонони відповідно, а в жовтому та пурпурному ячмені – флавонол [42]. Xiangzhen Ge et al. [49] визначили профіль фенольних сполук у кольорового голозерного ячменю (білого, жовтого, чорного та синього) та ідентифікували 156 фенольних речовин. Найбільш різноманітним був профіль у чорного ячменю, а вміст фенолів варіює залежно від забарвлення зерна. Встановлено, що маркери, асоційовані зі складом та вмістом фенольних сполук, відрізняються у диких та культурних ячменів [50, 51]. Іншими дослідниками підтверджено вищий вміст флавоноїдів у зернівках ячменю синього та фіолетового забарвлення [52], до того ж у фіолетового голозерного ячменю вміст флавоноїдів був вищим, ніж у фіолетового плівчастого та голозерного жовтозерного [53].

Інформація про антиоксидантні властивості зернових культур, у тому числі генотипів ячменю,

[38, 39]. Dongdong Xu et al. [40] identified the glutathione-S-transferase (HvGST) gene responsible for the blue color of the aleurone layer in Tibetan barley (qingke). Analysis of variability and gene expression revealed that HvGST was also involved in the transport and accumulation of anthocyanins in purple barley.

In pre-breeding programs, the pigment contents in barley are intensively studied in association with caryopsis color. Thus, pelargonidins were found to determine red (orange) color, cyanidins – dark-red, and delphinidins – purple (blue) [38, 40]. Cornflower pigment-3-glucoside was the major anthocyanidin in blue, yellow and purple barley and delphinidin-3-glucoside – in black barley. A dark color indicates an increased content of anthocyanins [41]. In other studies, increased concentrations of β -glucans and anthocyanins were detected in purple and blue barley, unlike black barley, which did not have such properties [42]. Similar data on the increased content of anthocyanins in purple barley were reported by Yao X. et al. [43].

The influence of phenolic compound levels on barley grain color was proven [7, 39, 41, 44–47]. In particular, the contents of total phenols and flavonoids were found to be high in purple barley; the major phenolic acids in blue barley were benzoic acid polyphenols; the major types of flavonoids in black and blue barley were chalcones and flavanones, respectively; and flavonol was the major flavonoid in yellow and purple barley [41]. Xiangzhen Ge et al. [48] determined the profile of phenolic compounds in pigmented barley (white, yellow, black, and blue) and identified 156 phenolic substances. The profile of black barley was the most diverse, and the content of phenols varied depending on caryopsis color. Markers that are associated with the composition and content of phenolic compounds were demonstrated to differ in wild and domestic barleys [49]. Other researchers confirmed higher contents of flavonoids in blue and purple barley caryopses [50]; besides, the content of flavonoids was higher in purple naked barley than in purple chaffy and yellow naked barleys [51].

There is very little information about the antioxidant properties of cereals, including barley genotypes used in the production in our

які використовуються у виробництві нашого регіону, практично відсутня, тоді як у більшості розвинутих країн світу подібні дослідження проводяться дуже інтенсивно. Таким чином, вивчення властивостей кольорового голозерного ячменю широко розповсюджено у світі, а селекція сортів з таким зерном є перспективною та має важливе значення для продовольчої безпеки та створення продуктів для дієтичного харчування.

Метою нашої роботи було в рамках пребридингу встановлення у зразків голозерного ячменю вмісту фенольних сполук та флавоноїдів, успадкування забарвлення зерна, пов'язаного із вмістом фенолів та флавоноїдів у аспекті залучення кращих зразків до селекційного процесу як батьківських компонентів для схрещування.

Методика

В Інституті рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН України широко розгорнуто селекцію голозерного ячменю харчового напрямку використання. Створено голозерні сорти різновиду *nudum* Явір, Орлан, Обрій та Гордій. Сорт Гордій внесено в Державний реєстр сортів рослин, придатних для поширення в Україні з 2024 року. Також проводиться селекція голозерного ячменю з кольоровим зерном та крохмалем зі змінним складом [55–57]. Вихідний матеріал одержано з Національного центру генетичних ресурсів рослин України. Це зразки різновиду *nudum* L., *daghestanicum* Vav. et Orl. із сіро-зеленим зерном, *viride* Vav. et Orl. із зеленим зерном, *violaceum* Koern. та *nudidubium* Koern. з фіолетовим зерном, *nigrinudum* Vav., *nudimelanocrithum* Giess. et al. з чорним зерном та лінія SGI 7024 з блакитним зерном селекції СГІ-НЦНС (автор Рибалка О.І.). Як джерела мутації ваху було взято голозерні сорти канадської селекції CDC Alamo та Mebere, джерелом підвищеного вмісту амілози в крохмалі – теж сорт канадської селекції CDC Hilose. Для гібридизації використано також зразки плівчастого ячменю, в т.ч. з кольоровим зерном як джерела підвищення адаптивності голозерного ячменю до умов середовища (табл. 1).

region, while in most of the developed countries worldwide, such studies are being conducted very intensively. Thus, research into properties of pigmented naked barleys is conducted all over the world and the breeding of cultivars with such grains is promising and important for food security and dietary nutrition.

Our purpose was, as part of pre-breeding, to determine the contents of phenolic compounds and flavonoids in naked barley accessions and to elucidate the inheritance of caryopsis color associated with contents of phenols and flavonoids in order to involve the best accessions in breeding as parents for crossings.

Methods

The Yuriev Plant Production Institute (YPPI) of NAAS of Ukraine intensively works to breed naked food barley cultivars. Cultivars 'Yavir', 'Orlan', 'Obrii', and 'Hordii' (the variety *nudum*) have been created. Cultivar 'Hordii' has been in the State Register of Plant Varieties Suitable for Dissemination in Ukraine since 2024. Naked barley cultivars with pigmented caryopses and starch with changed compositions are also being bred [52–56]. The starting material was obtained from the National Center for Plant Genetic Resources of Ukraine: accessions of the varieties *nudum* L. and *daghestanicum* Vav. et Orl. with gray-green caryopses, of the variety *viride* Vav. et Orl. with green caryopses, of the varieties *violaceum* Koern. and *nudidubium* Koern. with purple caryopses, of the varieties *nigrinudum* Vav. and *nudimelanocrithum* Giess. et al. with black caryopses, and line SGI 7024 with blue caryopses bred at the Plant Breeding and Genetics Institute – National Center of Seed and Cultivar Investigations (PBGI-NCSCI; the author – Rybalka O.I.). Canadian naked cvs. 'CDC Alamo' and 'Mebere' were taken as sources of the waxy mutation and Canadian cv. 'CDC Hilose' was used as a source of an increased content of amylose in starch. In hybridization, chaffy barley accessions, including those with pigmented caryopses, were also used as sources enhanced adaptability to make naked barley more adaptable to environmental conditions (Table 1).

Таблиця 1. Вихідний матеріал для гібридизації
Table 1. Starting material for hybridization

Зразок / Accession	Різнovid / Variety	Походження / Origin	Особливості / Features
Голозерні / Naked			
CDC / Alamo	<i>nudum</i>	Crop Development Centre (CDC), Canada	Ваху, дуже висока загальна антиоксидантна активність (АОА), вміст β -глюканів, олії та фенольних сполук / Waxu, very high total AOA, high contents of β -glucans, oil and phenolic compounds
Mebere	<i>nudum</i>	AAFC, Canada	Ваху, зерно округлої форми, висока АОА, високий вміст олії / Waxu, rounded kernels, high AOA, high content of oil
CDC Hilose	<i>nudum</i>	CDC, Canada	High amylose, дуже високий вміст олії (понад 4,70 %), дуже довгий колос / High-amylose, very high content of oil (>4.70 %), very long spikes
Явір / Yavir	<i>nudum</i>	IP, Україна / YPPI, Ukraine	Високий вміст олії, висока АОА / High content of oil, high AOA
Ґатунок / Gatunok	<i>nudum</i>	ІСГС, Україна / Institute of Steppe Agriculture, Ukraine	високий вміст поліненасиченої ω -3 ліноленової кислоти / High content of polyunsaturated ω -3 linolenic acid
Гордій / Hordii	<i>nudum</i>	IP, Україна / YPPI, Ukraine	Високий вміст фенольних сполук, кругле зерно / High content of phenolic compounds, round kernels
NSGJ-1	<i>nudum</i>	Сербія Serbia	Посухостійкий, стабільна врожайність / Drought-resistant, stable-yielding
Tercel	<i>nudum</i>	Canada	стабільна врожайність, округле зерно / Stable-yielding, rounded kernels
UA 5462	<i>daghestani-cum</i>		Сіро-зелене зерно, довгий колос, дуже високий вміст крохмалю (понад 65 %) та олії / Gray-green caryopses, long spikes, very high contents of starch (>65%) and oil
UA 0663	<i>viride</i>		Зелене зерно, дуже високий вміст білка (понад 17 %) / Green caryopses, very high content of protein (>17%)
Ноем	<i>violaceum</i>		Фіолетове зерно / Purple caryopses
Віолет 18-1207	<i>nudidubium</i>	IP, Україна / YPPI, Ukraine	Фіолетове зерно, дуже високий вміст крохмалю (понад 66 %) та олії / Purple caryopses, very high contents of starch (>66%) and oil
UA 0645	<i>nudimelano-crithum</i>		Чорне зерно, дуже високий вміст білка (понад 17 %) / Black caryopses, very high content of protein (>17 %)
UA 2220	<i>hymalaense</i>		Зелене зерно, шестирядний / Green caryopses, six-rowed plants
Плівчасті / Chaffy			
Взірець / Vzirets	<i>nutans</i>	IP, Україна / YPPI, Ukraine	Висока АОА, високий вміст фенольних сполук, поліненасиченої ω -3 ліноле-нової та мононенасиченої пальмітолеїнової кислоти / High AOA, high content of phenolic compounds, polyunsaturated ω -3 linolenic and monounsaturated palmitoleic acids
Троян / Troian	<i>nutans</i>	IP, Україна / YPPI, Ukraine	Високий вміст поліненасиченої ω -3 ліноленової кислоти / High content of polyunsaturated ω -3 linolenic acid
Парнас / Parnas	<i>nutans</i>	IP, Україна / YPPI, Ukraine	Високий вміст олії, висока перетравлюваність білка / High content of oil, high digestibility of protein

Дослідження проводили в 2022–2023 рр., зразки ячменю було посіяно в селекційному розсаднику, площа ділянки 2 м². Схрещування проводили примусово, із колоска в колосок.

Вміст білка та крохмалю в зерні визначали на ІнфраЛІОМ ФТ-10М 09495. Ваху-генотипи ідентифікували методом фарбування йодним розчином Люголя (модифікований метод Джуліана) [58]. Загальну антиоксидантну активність (АОА) зразків ячменю оцінювали за здатністю спиртових екстрактів нейтралізувати радикалі DPPH• (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl). Метод базується на знебарвленні спиртового розчину стабільного радикала DPPH у присутності спиртових екстрактів зернових продуктів, що містять антиоксиданти, які є донорами протонів, здатних нейтралізувати радикал DPPH та перевести його у знебарвлену відновлену форму. Визначення антирадикальної активності проводили за методом, описаним у роботі S. Arabshahi, A. Urooj [58].

Фенольні сполуки і антоціани екстрагували із розмеленого зерна 80% етанолом (співвідношення наважки і екстрагенту 1:20) за температури 2-4°C протягом 14-16 год, після чого фільтрували. Для аналізу вмісту фенольних сполук у реакційні пробірки вносили 0,5 мл фільтрату, 8 мл дистильованої води та 0,5 мл реактиву Фоліна, перемішували і через 3 хв додавали 1 мл 10%-го Na₂CO₃. Через 1 годину вимірювали абсорбцію реакційної суміші при 725 нм [60]. Вміст фенольних сполук виражали у мкмоль галлової кислоти на 1 г наважки. Перед визначенням вмісту антоціанів супернатант підкислювали HCl до кінцевої концентрації 1%. Поглинання визначали при 530 нм [61]. Результати виражені в умовних одиницях, як абсорбція у розрахунку на 1 г наважки.

Вміст олії визначали за вагою сухого знежиреного залишку за модифікованою методикою С.В. Рушковського (гравіметричний метод), аналіз жирнокислотного складу олії – методом газової хроматографії метилових ефірів жирних кислот на газовому хроматографі «Селмихром-1».

The study was conducted in 2022–2023. The barley accessions were sown in a breeding nursery. The plot area was 2 m². Crossings were controlled, from spikelet to spikelet.

The contents of protein and starch in grain were determined on an InfraLIUM FT-10M 09495 analyzer. Waxy genotypes were identified by staining with Lugol's iodine solution (modified Juliano's method) [57]. The total antioxidant activity in the barley accessions was evaluated by ability of ethanol extracts to neutralize DPPH• (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) radicals. The method is based on the decolorization of ethanol solution of the stable DPPH radical in the presence of antioxidant-containing ethanol extracts from kernels, as antioxidants are proton donors capable of neutralizing the DPPH radical and converting it into a decolorized reduced form. The antiradical activity was determined, as described by S. Arabshahi and A. Urooj [58].

Phenolic compounds and anthocyanins were extracted from ground kernels with 80% ethanol (the sample weight/extractant ratio was 1:20) at 2-4°C for 14-16 hours; then the extracts were filtered. To analyze the content of phenolic compounds, 0.5 mL of filtrate, 8 mL of distilled water, and 0.5 mL of Folin's reagent were added to the reaction tubes, mixed, and after 3 minutes, 1 mL of 10% Na₂CO₃ was added. After 1 hour, the absorbance of the reaction mixture was measured at 725 nm [59]. The content of phenolic compounds was expressed in μmol of gallic acid per 1 g of sample weight. Before determining the anthocyanin content, the supernatants were acidified with HCl to a final concentration of 1%. The absorbance was measured at 530 nm [60]. The results are expressed in relative units, as absorption per 1 g of sample weight.

The oil content was gravimetrically determined by weight of the dry, defatted residue using a modification of S.V. Rushkovsky's method (method). The fatty acid composition of oil was analyzed by gas chromatography of methyl esters of fatty acids on a Selmikhrom-1 gas chromatograph.

Результати та обговорення

В наших попередніх дослідженнях було визначено показники якості зерна у зразків, які обрано батьківськими компонентами. Зокрема, встановлено, що вміст білка у зразків UA 0645 var. daghestanicum (сіро-зелене зерно) та UA 0663 var. viride (зелене зерно) вищий за 17%, у інших зразків – 16–14%. Вміст крохмалю найвищим був у лінії Віолет 18-1207 var. nudidubium – 66,20 %, інші зразки – на рівні 65,35–61,67 %.

Олії в зерні ячменю міститься дуже мало, тому селекція за цією ознакою не поширена, але олія ячменю має високий вміст ω -3 поліненасиченої ліноленової кислоти, одного із найсильніших антиоксидантів. Деякі з наших зразків мали дуже високий (4,70 %, CDC Hilose з високоамілозним крохмалем) та високий (3,82–3,71 %, UA 5462 var. daghestanicum, CDC Lophy-1 та Mebere var. nudum) вміст олії. За вмістом в олії ω -3 ліноленової кислоти виділено сорти CDC Alamo, CDC Candle (5,12–6,05 % від загального вмісту олії) [54, 55, 61, 62]. Доречно відзначити, що створена нами цінна лінія Віолет 18-1207 (UA 0805977) різновиду nudidubium має не лише зерно фіолетового кольору, але і всі інші частини рослини мають яскраво фіолетове забарвлення у фазі колосіння–налив. У міру дозрівання рослина набуває сіро-бузкового кольору [56, 57]. Вміст антоціанів у неї складає 0,260 умов. од. D530/г, вміст фенолів теж високий – 1,04 мг/г за еквівалентом галлової кислоти (табл. 2). Взаємозв'язок темного забарвлення зернівки, зокрема фіолетового, як у Віолет 18-1207, та високого вмісту антоціанів також установлено Yao et al. [44]. В літературі відзначається також зв'язок темного забарвлення зернівок та високого вмісту фенолів [62].

Лінія Віолет 18-1207 характеризується високою стійкістю до сажкових і листкових хвороб та до посухи. Такі дані узгоджуються з твердженнями інших учених про важливе агрономічні значення підвищеного вмісту кольорових пігментів у ячменю, оскільки теж пов'язують це зі стійкістю до стресових чинників різної природи, а саме – темнозабарвлені зразки мають у зерні вищий вміст фенольних сполук, які в свою чергу є складовими антиоксидантного комплексу. Зразки з підвищеною АОА є більш стресостійкими [34, 50–52].

У лабораторії фізіології та біохімії рослин у зерні зразків ячменю було визначено вміст фенольних сполук та антоціанів (табл. 2). У результаті встановлено тісний лінійний зв'язок між цими ознаками ($r = 0,79$), що узгоджується з даними Yoshida [29], Hodzic [30], Ianucci [37].

Results and Discussion

In our previous studies, we determined grain quality parameters in the accessions that were selected as parents. In particular, we found that the protein content in var. daghestanicum accession 'UA 0645' (gray-green caryopses) and var. viride accession 'UA 0663' (green caryopses) exceeded 17%; in the other accessions. It was 16–14%. Var. nudidubium line 'Violet 18-1207' had the highest starch content of 66.20%; the other accessions contained 65.35–61.67% of starch.

Barley grain contains very little oil, so breeding for this trait is not common; however, barley oil has a high content of ω -3 polyunsaturated linolenic acid, one of the most potent antioxidants. Some of our accessions had very high (4.70 % in high-amylose cv. 'CDC Hilose') or high (3.82–3.71 % in var. daghestanicum accession 'UA 5462', var. nudum cv. 'CDC Lophy-1' and 'Mebere') oil levels. Cultivars 'CDC Alamo' and 'CDC Candle' were distinguished due to ω -3 linolenic acid content in oil (5.12–6.05% of the total oil content) [54, 55, 61, 62]. It is appropriate to note that our valuable var. nudidubium line 'Violet 18-1207' (UA 0805977) has not only purple caryopses, but also all other parts of the plant are bright purple in the "earring-filling" phase. As the plant matures, it turns gray-lilac [61, 62]. The anthocyanin content in it is 0.260 relative units D530/g; the phenol content is also high (1.04 mg of gallic acid equivalent/g (Table 2). The relationship between dark colors of caryopses, in particular purple, like in line 'Violet 18-1207', and high levels of anthocyanins was also demonstrated by Yao et al. [43]. It was also reported about the relationship between dark grain and high levels of phenols [63].

Line 'Violet 18-1207' is highly resistant to smuts and leaf diseases as well as to drought. These data are consistent with other scientists' findings on the agronomic importance of increased contents of pigments in barley, as they are also associated with resistance to different stressors, specifically, accessions with dark caryopses contained more phenolic compounds in grain, which are components of the antioxidant system. Accessions with increased AOA are more stress-resistant [34, 49, 50, 51].

In the Laboratory of Plant Physiology and Biochemistry, the contents of phenolic compounds and anthocyanins in barley grain were determined (Table 2). There was a strong linear correlation between these parameters ($r = 0.79$), which is consistent with data of Yoshida [29], Hodzic [30], and Ianucci [37].

Таблиця 2. Вміст фенольних сполук та антоціанидинів у зерні зразків голозерного яменю, 2022–2023 рр.
Table 2. Contents of phenolic compounds and anthocyanins in the naked barley accessions, 2022–2023

Зразок / Accession	Вміст фенольних сполук, мг/г за еквівалентом галової кислоти / Contents of phenolic compounds, mg of gallic acid equivalent/g		Вміст антоціанидинів, умов. од. D530/г / Content of anthocyanins, relative units D530/g	
	Урожай 2022 р. / Harvested in 2022	Урожай 2023 р. / Harvested in 2023	Урожай 2022 р. / Harvested in 2022	Урожай 2023 р. / Harvested in 2023
Violet 18-1207	1.04	1.35	0.26	0.22
CDC Alamo	0.94	1.36	–	0.23
CDC Hilose	0.81	1.04	–	0.18
Hordii	0.89	0.97	–	0.19
Orlan	–	0.95	–	0.16
Mebere	0.89	0.72	–	0.11
UA 2220	–	1.21	–	0.20
UA 0663	0.70	1.19	0.19	0.24
UA 5462	0.75	0.63	0.18	0.17
UA 0645	0.77	0.94	0.19	0.14
NSGJ-1	0.75	0.99	0.22	0.16
Tercel	0.78	0.87	0.23	0.15

Примітка. Жирним шрифтом виділено найвищі значення показників.
 Note: The highest values are highlighted in bold.

Установлено стабільно високі показники вмісту фенольних сполук та антоціанів у лінії Віолет 18-1207 та сортів CDC Alamo, CDC Hilose. В залежності від погодних умов вміст фенольних сполук був високим у зразків Гордій, Mebere, UA 2220, UA 0663, антоціанів – у зразків Гордій, UA 0663, NSGJ-1, Tercel. Наші дані щодо залежності вмісту фенольних сполук від генотипу та умов середовища узгоджуються з результатами дослідження сортів ячменю в Онтаріо Abdel-Aal et al. [7] та El-Sayed M. et al. [63], в Литві Legzdina L. et al. [63]. Іншими вченими також було зроблено висновки про вплив середовища, генотипу та їх взаємодії на рівень фенольних сполук, що підкреслює необхідність тестування генотипів в різних умовах для виділення зразків з високим вмістом цих метаболітів [65]. Аналогічні результати одержано Rao S. et al. [66] про значний вплив середовища на АОА та вміст фенолів, зокрема флавоноїдів та протоантоціанидинів, а різна реакція сортів на місце вирощування вказує на вплив генотипу.

В цілому, результатами чисельних досліджень доведено, що АОА тісно пов'язана з вмістом фенольних сполук у зерні ячменю [7, 9, 13, 15–18, 20–24, 27–34, 30–42, 47–50]. У наших попередніх дослідженнях у 2016–2017 рр. установлено істотну залежність рівня АОА від вмісту фенольних сполук у зерні сортів та ліній ярого ячменю різного походження, в тому числі півчастих та голозерних різновидів [55, 61, 62].

Consistently high levels of phenolic compounds and anthocyanins were detected in line 'Violet 18-1207' and cvs. 'CDC Alamo' and 'CDC Hilose'. Depending on the weather conditions, the content of phenolic compounds was high in accessions 'Hordii', 'Mebere', 'UA 2220', and 'UA 0663'; the content of anthocyanins was high in accessions 'Hordii', 'UA 0663', 'NSGJ-1', and 'Tercel'. Our data on the dependence of the content of phenolic compounds on genotype and environmental conditions are consistent with findings on barley cultivars in studies by Ontario by Abdel-Aal et al. [7], El-Sayed M. et al. [56], Legzdina L. et al. [64]. Other scientists also drew conclusions about the influence of environment, genotype and their interaction on levels of phenolic compounds, emphasizing the need to test genotypes in different conditions to select accessions with high contents of these metabolites [65]. Similar results were obtained by Rao S. et al. [66] about a significant influence of environment on AOA and content of phenols, in particular flavonoids and protoanthocyanidins, while different responses of cultivars to cultivation locations indicated the effect of genotype.

In general, in numerous studies, AOA was proven to be closely related to levels of phenolic compounds in barley grain [7, 9, 13, 15–18, 20–24, 27–34, 39–41, 46–49]. In our previous study in 2016-2017, there was a significant correlation between AOA and content of phenolic compounds in grain of spring barley cultivars and lines of

У результаті вивчення одержаних шляхом гібридизації зерен гібридних рослин F₁ встановлено, що деякі зразки стабільно передають у поколіннях своє забарвлення зерна. Так, за участі в скрещуванні лінії Віолет 18-1207 як за материнський, так і за батьківський компонент забарвлення зерна F₁ завжди було фіолетове. При цьому форма зерна у Віолет 18-1207 видовжено еліптична, а у F₁ за її участі – від округлої до видовжено еліптичної (табл. 3). Доцільно зауважити, що для голозерного ячменю округла форма зерна є цінною, тому що при обмолоті у такого зерна не відбивається зародок. А саме в зародку найвищий вміст корисних для функціонального харчування речовин – нутріцевтиків.

different origins, including chaffy and naked varieties [55, 61, 62].

Having investigated seeds of F₁ hybrid plants obtained by hybridization, we found that some accessions consistently transmitted their caryopsis color over generations. Thus, the F₁ offspring of line ‘Violet 18-1207’, regardless of how it was used in crossing, as the female form or as the male one, always had purple caryopses. At the same time, line ‘Violet 18-1207’ has elongated elliptical kernels, but its F₁ offspring had kernels of various shapes - from rounded to elongated elliptical (Table 3). It should be noted that the rounded shape of kernels is valuable for naked barley, because the germ is not removed from such grains when threshed and it is germs that contain the greatest amounts of substances useful for functional nutrition - nutraceuticals.

Таблиця 3. Забарвлення зерна гібридних рослин F₁

Table 3. Caryopsis color in F₁ hybrid plants

Гібридна комбінація F ₁ / F ₁ hybrid	Забарвлення зерна / Caryopsis color	Форма зерна, інші особливості / Kernel shape, other features
Violet 18-1207 x Yavir	Фіолетове / Purple	Зерно видовжено еліптичне, колос фіолетово-сірий / Elongated elliptic kernels, purple-gray spikes
Violet 18-1207 x CDC Hilose	Фіолетове / Purple	Зерно видовжено еліптичне, колос фіолетово-сірий / Elongated elliptic kernels, purple-gray spikes
Violet 18-1207 x Mebere	Фіолетове / Purple	Зерно видовжено еліптичне, колос фіолетово-сірий / Elongated elliptic kernels, purple-gray spikes
Violet 18-1207 x SGI 7024	Фіолетове / Purple	Зерно кругле / Rounded kernels
UA 0663 x Violet 18-1207	Фіолетове / Purple	Колос фіолетовий / Purple spikes
UA 0663 x Yavir	Зелене / Green	Зерно видовжено еліптичне / Elongated elliptic kernels
UA 0663 x SGI 7024	Блакитне / Blue	Зерно еліптичне / Elliptic kernels
UA 0645 x CDC Alamo	Чорне / Black	Зерно еліптичне, колос чорний, стрижень ламкий / Elliptic kernels, black spikes, brittle rachides
UA 0645 x Yavir	Чорне / Black	Зерно еліптичне, колос чорний / Elliptic kernels, black spikes
UA 0645 x UA 0663	Сіро-зелене / Gray-green	Зерно видовжено еліптичне / Elongated elliptic kernels
Mebere x UA 0663	Зелене / Green	Зерно еліптичне / Elliptic kernels
UA 5462 x SGI 7024	Сіро-зелене / Gray-green	Зерно видовжено еліптичне, колос сірий / Elongated elliptic kernels, gray spikes
Hoem x SGI 7024	Блакитне / Blue	Зерно еліптичне, рослини двохрядні / Elliptic kernels, two-rowed plants
Hoem x CDC Hilose	Фіолетове / Purple	Колос фіолетовий, зерно ромбічне, рослини інтермедіальні / Purple spikes, rhombic kernels, intermediate plants

При цьому в іншого зразка з фіолетовим зерном – Ноем подібна закономірність не встановлена. У гібридних рослин F₁ забарвлення зерна було як фіолетове, так і іншого кольору (блакитного при схрещуванні з SGI 7024).

У гібридних популяціях за участю в схрещуваннях колекційного чорнозерного зразка UA 0645 var. *nudimelanocrithum* одержано F₁ як з чорним, так і з іншого кольору зерном (сіро-зелене при схрещуванні з UA 0663). Особливістю зразка UA 0645 є те, що цей різновид еректоїдний. Гібридні рослини F₁ лише в комбінації UA 0645 x CDC Alamo були еректоїдного типу, а в інших – нормального типу, середньої висоти з нещільним колосом. Доречно зауважити, що еректоїдні рослини характеризуються дуже ламким стрижнем колоса, що є небажаним для селекції.

Наші дані лише частково узгоджуються з відлітками Jia et al. [39] та Kim et al. [40], згідно з якими успадкування чорного і фіолетового забарвлення відбувається за материнським компонентом.

При схрещуванні Ноем і CDC Hilose рослини F₁ були типу *intermedium*, зерно і колос фіолетового забарвлення, зерно ромбічне. Інтермедіальний тип гібридних рослин пояснюється належністю зразка Ноем до різновиду шестирядного ячменю *violaceae*, а при схрещуванні двохрядних і шестирядних різновидів часто з'являються саме такі інтермедіальні (проміжного типу) рослини.

Доцільно відзначити, що серед усіх популяцій F₁ було виділено популяцію Віолет 18-1207 x SGI 7024. У гібридних рослин зерно було фіолетового кольору, округлої форми. Саме така форма зерна є оптимальною для голозерного ячменю, оскільки при обмолоті та обробці зерна округлої форми менше втрачається чи пошкоджується зародок, багатий антиоксидантами (табл. 3).

У популяціях F₂ відбувалося розщеплення за кольором зерна, було встановлено, що успадкування забарвлення зернівки у ячменю можна пояснити взаємодією неалельних генів переважно за типом комплементарності (табл. 4).

At the same time, another accession with purple caryopses, 'Hoem', did not show a similar pattern. F₁ hybrid plants can have either purple caryopses or in a different color (blue when crossed with 'SGI 7024').

In F₁ hybrid populations from collection var. *nudimelanocrithum* accession 'UA 0645' with black caryopses, there were plants with either black caryopses or in a different color (gray-green when crossed with 'UA 0663'). The peculiarity of accession 'UA 0645' is that this variety is erectoid. F₁ hybrid plants were erectoid only in the combination 'UA 0645 x CDC Alamo', while in the others, plants were normal, medium-tall with loose spikes. It is noteworthy that erectoid plants have very brittle rachides, which are undesirable for breeding.

Our findings are only partially consistent with those of Jia et al. [35] and Kim et al. [36], as they reported that black and purple colors were inherited from female forms.

When 'Hoem' was crossed with 'CDC Hilose', F₁ plants were of the *intermedium* type, their caryopses and spikes were purple and kernels were rhombic. The intermediate type of hybrid plants is explained by the fact that accession 'Hoem' belongs to var. *violaceae* of six-rowed barley, and when two-rowed and six-rowed varieties are crossed, such intermediate plants often appear.

It should be noted that of all F₁ populations, population 'Violet 18-1207 x SGI 7024' was selected. In this population, hybrid plants had purple, rounded caryopses. It is this shape of kernels that is optimal for naked barley, since the germ, rich in antioxidants, is less probably lost or damaged during threshing and processing of rounded kernels (Table 3).

In F₂ populations, we observed segregation by caryopsis color and believe that the inheritance of caryopsis color in barley can be explained by interaction of non-allelic genes mainly via complementarity (Table 4).

Таблиця 4. Розщеплення в гібридних популяціях F₂ голозерного ячменю за забарвленням зернівки, 2024 р.
Table 4. Segregation in F₂ hybrid naked barley populations by caryopsis color, 2024

Комбінація схрещування / Crossing combination	Забарв-лення зернівки в F ₁ / Caryopsis pigmentation in F ₁	Співвідношення рослин за забарвленням зернівки, частка Proportion of plants with caryopses in corresponding color						χ^2	Тип успадкування / Inherutance type	
		жовте / Yellow	зелене / Green	сіро-зелене / Gray-green	блакитне / Blue	чорне / Black	фіолетове / Purple			
Violet 18-1207 / SGI 7024	Фіолетове / Purple	-	-	-	1	-	3	0.01	Повне домінування / Complete dominance	
Violet 18-1207 / Mebere	Фіолетове / Purple	1	-	-	-	-	2	1.42	Компліментарність / Complementarity	
Violet 18-1207 / CDC Hilose	Фіолетове / Purple	1	-	-	-	-	4	0.06	Домінантний епістаз / Dominant epistasis	
Violet 18-1207 / Явір	Фіолетове / Purple	1	-	-	-	-	1.8	1.97	Компліментарність / Complementarity	
UA 0663 / SGI 7024	Блакитне / Blue	-	1	-	1	-	-	0.14	Компліментарність / Complementarity	
UA 0663 / Yavir	Зелене / Green	1	1	-	-	-	-	0.28	Компліментарність / Complementarity	
UA 0663 / Violet 18-1207	Фіолетове / Purple	-	1	-	-	-	1.8	2.67	Компліментарність / Complementarity	
UA 5462 / SGI 7024	Сіро-зелене / Gray-green	-	-	1.5	1	-	-	0.82	Компліментарність / Complementarity	
UA 5462 / CDC Hilose	Жовте / Yellow	15	-	1	-	-	-	0.56	Кумулятивна полімерія / Cumulative polymery	
Ноем / SGI 7024	шестирядні / Six-rowed	Блакитне, двохрядні / Blue; two-rowed	-	-	-	2	-	1	0.09	Компліментарність / Complementarity
	інтермедіум / Intermedium		-	-	-	1	-	1		
Ноем / CDC Alamo	шестирядні / Six-rowed	Фіолетове / Purple	1	-	-	-	-	1	0.25	Компліментарність / Complementarity
	інтермедіум / Intermedium		1	-	-	-	-	1		
UA 2152 / UA 0663	Зелене / Green	1	2	-	-	-	-	3.17	Компліментарність / Complementarity	
UA 0645 / Yavir	звичайні / Normal	Чорне / Black	1	-	-	-	3	-	0.30	Повне домінування / Complete dominance
	еректоїди / Erectoid		1	-	-	-	1	-		
UA 0645 / CDC Alamo	Чорне / Black	1	-	-	-	7	-	0.49	Домінантний епістаз / Dominant epistasis	
Mebere / UA 0663	Жовте / Yellow	3	1	-	-	-	-	0.04	Повне домінування / Complete dominance	
UA 2152 / UA 0663	Зелене / Green	1	2	-	-	-	-	3.17	Компліментарність / Complementarity	

За такого типу успадкування домінантні гени не мають самостійного прояву і лише разом зумовлюють певне забарвлення зернівки. Окрім компліментарності, зустрічаються також повне домінування, домінантний епістаз (домінантний алель одного гена пригнічує прояв інших генів), кумулятивна полімерія (ступінь розвитку ознаки залежить від кількості полімерних генів, тобто генів, які діють в однаковому напрямі, підсилюючи один одного). Доречно зауважити, що в F2 домінує забарвлення зернівки таке ж, як було в F1. У деяких гібридних популяціях виявлено новоутворення, тобто компліментарна взаємодія генів супроводжувалася утворенням генотипів, які не були схожими ні на жоден з батьківських компонентів.

Так, в гібридних популяції Ноєм / SGI 7024 було виявлено рослини інтермедіального типу з фіолетовим і блакитним зерном та шестирядні рослини з блакитним зерном. У популяції Ноєм / CDC Alamo – рослини інтермедіального типу з фіолетовим і жовтим зерном та шестирядні з жовтим зерном.

У гібридній популяції UA 0645 / Явір виявлено рослини звичайні з чорним зерном та еректоїди з жовтим зерном; у популяції UA 0645 / CDC Alamo – чорнозерні рослини з сірим колосом.

Висновки

Таким чином, голозерний ячмінь, у тому числі з кольоровим зерном, є цінним вихідним матеріалом для створення різних сортів, придатних для виготовлення продукції функціонального харчування. В результаті наших досліджень підтверджено домінування в F1 ячменю фіолетового, чорного, зеленого, блакитного та сіро-зеленого забарвлення зерна над жовтим. У F2 відбувається розщеплення за кольором зерна переважно за типом компліментарності. В результаті рекомбінації генів отримано нові варіанти поєднання цінних ознак, виділено новоутворення з ознаками, нехарактерними для батьківських компонентів. За допомогою новоутворень можна одержати достатній обсяг вихідного матеріалу для доборів та створення інноваційних сортів харчового напрямку використання.

In this inheritance type, dominant genes are not expressed independently but only together determine a certain color of the caryopsis. In addition to complementarity, there were also complete dominance, dominant epistasis (the dominant allele of one gene inhibits the expression of other genes), and cumulative polymery (the trait degree depends on the number of polymeric genes, that is, genes that act in the same direction, enhancing one's another's expression). It is worth noting that in F2 the same caryopsis color dominated as in F1. Traits that were not intrinsic to parents were observed in some hybrid populations, that is, the complementary interaction of genes was associated with evolution of genotypes that were not similar to any of the parents.

Thus, in hybrid population 'Hoem / SGI 7024', intermediate plants with purple and blue caryopses and six-rowed plants with blue caryopses were found. Population 'Hoem / CDC Alamo' comprised intermediate plants with purple and yellow caryopses and six-rowed plants with yellow caryopses.

In hybrid population 'UA 0645 / Yavir', there were normal plants with black caryopses and erectoids with yellow caryopses; in population 'UA 0645 / CDC Alamo', we had plants with black caryopses and gray spikes.

Conclusions

Thus, naked barley, including accessions with pigmented caryopses, is a valuable starting material to breed different cultivars suitable for functional food production. Our study confirmed the dominance of purple, black, green, blue, and gray-green colors of caryopses over yellow in F1 barley. In F2, there was segregation by caryopsis color, mainly according to complementarity. As a result of gene recombinations, new combinations of valuable traits were obtained; traits that were not intrinsic to parents evolved. Using such traits one can create a large amount of starting materials for breeding and development of innovative food cultivars.

References

1. Newton A.C., Flavell A.J., George T.S., Leat P., Mullholland B., Ramsay L., Revoredo-Giha C., Russel J., Steffenson B.J., Swanston S., et al. Crops that feed world 4. Barley: a resilient crop? Strengths and weakness in the context of food security. *Food Security*. 2011. V. 3. P. 141–178. <https://doi.org/10.1007/s12571-011-0126-3>.
2. Toyo Shinyaku. Food for specified health use (FOSHU). <http://www.toyoshinyaku.co.jp>
3. Iwatani S., Yamamoto N. Functional food products in Japan. *Food Sciences and Human Wellness*. 2019. V. 8. P. 96. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2019.03.011>
4. Martirosyan D., Adany A., Kanya H. Japan's health food industry: An analysis of the efficacy of the FOSHU system. *Bioactive compounds in health and disease*. 2021. V. 4(4). <https://doi.org/10.31989/bchd.v4i4.795>
5. Ulrich S.E., editor. *Barley production, improvement, and uses*. Chichester, UK: Wiley-Blackwell, 2011. 637 p.
6. Abdel-Aal E.S.M., Young J.C., Rabalski I. Anthocyanin composition in black, blue, pink, purple, and red cereal grains. *J. Agric Food Chem*. 2006. V. 54. 4696e704.
7. Abdel-Aal E.S.M., Choo T.M., Dhillon S., Rabalski I. Free and bound phenolic acids and total phenolics in black, blue, and yellow barley and their contribution to free radical scavenging capacity. *Cereal Chem*. 2012. V. 89. 198e204. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-10-11-0116>
8. Idehen E., Tang Y., Sang S. Bioactive phytochemicals in barley. *Journal of Food and Drug Analysis*. 2016. V. 25(1). <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.08.002>
9. Rybalka O.I., Morhun B.V., Polishchuk S.S. *Yachmin yak produkt funktsionalnoho kharchuvannia [Barley as a product of functional nutrition]*. Kyiv: Logos, 2016.
10. Liao Zh., Cai H., Xu Z., Wang J., Qiu Ch., Xie J., Huang W., Sui Zh. Protective role of antioxidant huskless barley extracts of TNF- α -Induced endothelial dysfunction in human vascular endothelial cells. *Oxidative medicine and cellular longevity*. 2018. (10 pages). <https://doi.org/10.1155/2018/3846029>.
11. Polakova K., Vaculova K., Kucera L. Selection of barley lines with waxy endosperm and hullless grains: genotyping and phenotyping. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*. 2004. V. 40. P. 114.
12. Zhao S., Li X., Hu G., Liang X., Liu C., Liu Q. Rheological behaviors, structural properties and freeze–thaw stability of normal and waxy genotypes of barley starch: A comparative study with mung bean, potato, and corn starches. *Food Sci. Biotechnol*. 2021. V. 30. P. 1171–1181. <https://doi.org/10.007/s10068-021-00967-z>
13. Salar R.K., Purewal S.S., Sandhu K.S. Relationships between DNA damage protection activity, total phenolic content, condensed tannin content and antioxidant potential among Indian barley cultivars. *Biocatal. Agric. Biotechnol*. 2017. V. 11. P. 201–206. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.20217.07.006>
14. Baik B.K., Ullrich S.E. Barley for food: Characteristics, improvement, and renewed interest. *J. Cereal. Sci*. 2008. V. 48. P. 233–242. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2008.02.002>
15. Kaur A., Singh S., Yuthana P., Sneh P., Bangar P. Unraveling the hidden potential of barley (*Hordeum vulgare*): An important review. *Plants*. 2024. V. 13(17). P. 2421. <https://doi.org/10.3390/plants13172421>
16. Quinde-Axtelle Z., Baik B.K. Phenolic compounds of barley grain and their implication in food product discoloration. *J. Agric. Food Chem*. 2006. Vol. 54(26). P. 9978–9984. <https://doi.org/10.1021/jf060974w>.
17. Mahmoudi T., Oveisi M.R., Jannat B., Behzad M., Hajimahmoodi M., Sadeghi N. Antioxidant activity of Iranian barley grain cultivars and their malts. *African Journal of Food Science*. 2015. Vol. 9(11): 534–539. <https://doi.org/10.5897/AJFS2014.110>.
18. Punia S., Sandhu K.S. Functional and antioxidant properties of different milling fractions of Indian barley cultivars. *Carpathian J. Food Sci. Technol*. 2015. V. 7. P. 19–27.
19. Tehami W., Nani A., Khan N.A., Hichami A. New insights into the anticancer effects of p-coumaric acid: focus on colorectal cancer. *Dose Response*. 2023. V. 21.. <https://doi.org/10.1177/15593258221150704>
20. Maillard M.N., Boivin P., Soum M.H., Berset C. Antioxidant activity of barley and malt: relationship with phenolic content. *Food Science and Technology*. 1996. No 29(3). P. 238–244. <https://doi.org/10.1006/fst.1996.0035>.

21. Simic G., Horvat D., Dvojkovic K., Abicic J., Viljevac Vuletic M., Tucak M., Lalic A. Evaluation of total phenolic content and antioxidant activity of malting and hullless barley grain and malt extracts. *Czech. J. Food Sci.* 2017. No 35(1). P. 73–78. <https://doi.org/10.17221/144/2016-CJFS>.
22. Zhigang Han, Jingjie Zhang, Shengguan Cai, Xiaohui Chen, Xiaoyan Quan, Guoping Zhang. Association mapping for total polyphenol content, total flavonoid content and antioxidant activity in barley. *BMC Genomics.* 2018. No 19. P. 81–90. <https://doi.org/10.1186/S12864-018-4483-6>.
23. Raj R., Shams R., Pandey V.K., Dash K.K., Singh P., Bashir O. Barley phytochemicals and health promoting benefits: A comprehensive review. *J. Agric. Food Res.* 2023. V. 14. 100677. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100677>
24. Sun W., Shahrajabian M.H. Therapeutic potential of phenolic compounds in medicinal plants—natural health products for human health. *Molecules.* 2023. V. 28. P. 1845. <https://doi.org/10.3390/molecules28041845>
25. Rashid N.A., Abd-Halim S.A.S., Teoh S.L., Budin S.B., Hassan F., Adib-Ridzuan N.R., Abdul-Jalil N.A. The role of natural antioxidants in cisplatin-induced hepatotoxicity. *Biomed. Pharmacother.* 2021. V. 144. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.112328>
26. Tucakovich L., Colson N., Singh I. Relationship between common dietary polyphenols and obesity-induced inflammation. *Food Public Health.* 2015. No5(3). P. 84–91. <https://doi.org/10.5923/j.fph.20150503.04>.
27. Madhujith T., Shahidi F. Antioxidant potential of barley as affected by alkaline hydrolysis and release of soluble-bound phenolics. *Food Chem.* 2009. No 117. P. 615–620.
28. Dabina-Bicka I., Karklina D., Kruma Z. Polyphenols and vitamin E as potential antioxidants in barley and malt. *Proc. conf. FOODBALT 2011.* P. 121–126.
29. Yoshida A., Sonoda K., Nogata Y., Nagamine T., Sato M., Oki T., Hashimoto Sh., Ohta H. Determination of free and bound phenolic acid, and evaluation of antioxidant activities and total polyphenolic contents in selected pearled barley. *Food Sci. Technol. Res.* 2010. No 16(3). P. 215–224. <https://doi.org/10.3136/fstr.16.215>
30. Hodzic Z., Pasalic H., Memisevic A., Srabovic M., Saletovic M., Poljakovic M. The influence of total phenols content on antioxidant capacity in the whole grain extracts. *European Journal of Scientific Research.* 2009. Vol. 28. No 3. P. 471–477.
31. Sharma P., Gujral H.S. Effect of sand roasting and microwave cooking on antioxidant activity of barley. *Food Res. Int.* 2011. V. 44. P. 235–240. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.10.030>
32. Lin S., Guo H., Gong J.D., Lu M., Lu M.Y., Wang L., Zhang Q., Qin W., Wu D.T. Phenolic profiles, β -glucan contents, and antioxidant capacities of colored Qingke (Tibetan hullless barley) cultivars. *J. Cereal Sci.* 2018. V. 81. P. 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.04.001>
33. Zhao H., Dong J., Lu J., Chen J., Li Y., Shan L., Lin Y., Fan W., Gu G. Effects of extraction solvent mixtures on antioxidant activity evaluation and their extraction capacity and selectivity for free phenolic compounds in barley (*Hordeum vulgare* L.). *J. Agric. Food Chem.* 2006. V. 54. P. 7277–7286. <https://doi.org/10.1021/jf0610878w>
34. Sharma P., Gujral H.S. Antioxidant and polyphenol oxidase activity of germinated barley and its milling fractions. *Food Chem.* 2010. V. 120. P. 673–678. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.10.059>
35. Elouadi F., Amri A., El-Baouchi A., Zakaria K., Jilal A., Ibriz M. Genotypic and environmental effects on quality and nutritional attributes of Moroccan barley cultivars and elite breeding lines. *Front. Nutr.* 2023. V. 6. 1204572. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1204572> eCollection 2023
36. Tezara W., Mitchell V.J., Driscoll S.D., Lawlor D.W. Water stress inhibits plant photosynthesis by decreasing coupling factor and ATP. *Nature.* 1999. V. 401. P. 914–917. <https://doi.org/10.1038/44842>
37. Ianucci A., Suriano S, Codianni P. Genetic diversity for agronomic traits and phytochemical compounds in colored naked barley lines. *Plants.* 2021. V. 10(8). P. 1575. <https://doi.org/10.3390/plants10081575>
38. Jia Q., Wang J., Zhu J., Hua W., Shang Y., Yang J. Toward identification of black lemma and pericarp gene *Blp1* in barley combining bulked segregant analysis and specific locus amplified fragment sequencing. *Front. Plant Sci.* 2017. V. 8. P. 1414. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01414>.
39. Kim M., Hyun J., Kim J., Park J., Kim M., Kim J. Relationship between phenolic compounds, anthocyanins content and antioxidant activity in colored barley germplasm. *J. Agric. Food Chem.* 2007. V. 55(12). P. 4802–4809. <https://doi.org/10.1021/jf0701943>.

40. Xu D., Dondup D., Dou T., Wang C., Zhang R., Fan C., Aikui G., Lhundrup N., Ga Z., Liu M., Wu B., Gao J., Zhang J., Guo G. HvGST plays a key role in anthocyanin accumulation in colored barley. *Plant J.* 2023. V. 113(1). P. 47–59. <https://doi.org/10.1111/tpj.16033>.
41. Jin H.-M., Dang B., Zhang W.-G., Zheng W.-C., Yang X.-J. Polyphenol and anthocyanin composition and activity of highland barley with different colors. *Molecules.* 2022. V. 27(11). P. 3411. <https://doi.org/10.3390/molecules27113411>
42. Sicker N. Beta-glucans and anthocyanins in barley for human food. 2017. <https://scholarworks.montana.edu/xmlui/handle/1/13022>.
43. Yao X., Yao Y., An L., Li X., Bai Y., Cui Y., Wu K. Accumulation and regulation of anthocyanins in white and purple Tibetan Hulless Barley (*Hordeum vulgare* L. var. *nudum* Hook. F.) revealed by combined de novo transcriptomics and metabolomics. *BMC Plant Biology.* 2022. V. 22. P. 391. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-036992>.
44. Rybalka O.I., Polishchuk S.S., Kirdohlo Ye.K., Morhun B.V. Genetic and breeding criteria of hulless barley cultivars production for the food end-use. *Физиология и биохимия культурных растений.* 2013. Т. 45, № 3. С. 187–205.
45. Rybalka O.I., Morgun V.V., Morgun B.V. Colored grain of wheat and barley – a new breeding strategy of crops with grain of high nutritional value. *Fiziol. Rast. Genet.* 2020. V. 52(2). P. 95–127. <https://doi.org/10.15407/frg2020.02.095>
46. Suriano S., Ianucci A., Codianna P., Fares C., Russo M., Peccioni N., Marciellj U., Savino M. Phenolic acids profile, nutritional and phytochemical compounds, antioxidant properties in colored barley grown in southern Italy. *Food Res. Int.* 2018. V. 113. P. 221–233. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.06.072>.
47. Nignpense B.E., Latif S., Francis N., Blanchard, C.L. Bioaccessibility and antioxidant activity of polyphenols from pigmented barley and wheat. *Foods.* 2022. V. 11(22). P. 3697. <https://doi.org/10.3390/foods11223697>.
48. Ge X., Jing L., Zhao K., Su C., Zhang B., Zhang Q., Han L., Yu X., Li W. The phenolic compounds profile, quantitative analysis and antioxidant activity of four naked barley grains with different color. *Food Chem.* 2021. V. 335. P. 127655. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127655>
49. Han Z., Zhang J., Cai S., Chen X., Quan X., Zhang G. Association mapping for total polyphenol content, total flavonoid content and antioxidant activity in barley. *BMC Genomics.* 2018. V. 19. P:81–90. <https://doi.org/10.1186/S12864-018-4483-6>.
50. Liu Z., Liu Y., Pu Z., Wang J., Zheng Y., Li Y., Wei Y. Regulation, evolution, and functionality of flavonoids in cereal crops. *Biotechnol Lett.* 2013; 35: 1765e80.
51. Yang T., Duan C.L., Zeng Y.W., Du J., Yang S.M., Pu X.Y., Yang S..C. HPLC analysis of flavonoids compounds of purple, normal barley grain. *AMR.* 2013; 634: 1486e90.
52. Bleidere M., Grunte I. Grain chemical composition of spring barley genotypes. *Proc. of the Intern. scien. conf. «Research for rural development».* 2007. P. 36–41.
53. Long Z., Jia Y., Tan C., Hang X.-Q., Angessa T., Broughton S., Westcott S., Dai F., Zhang G., Sun D., Xu Y, Li, C. Genetic mapping and evolutionary analyses of the black grain trait in barley. *Front. Plant Sci.* 2019. V. 9. P. 1–11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01921>
54. Vasko N.I., Kozachenko M.R., Pozdniakov V.V., Naumov O.G., Solonechnyi P.M., Vazhenina O.E., Solonechna O.V., Zymogliad O.V., Sheliakina T.A, Ilchenko N.K., Antsyferova O.V., Suprun O.G., Serik M.L. Creation of naked varieties and lines of spring barley with high food qualities. *Sel. Nasinn.* 2018. Is. 114. P. 25–38. <https://doi.org/10.30835/2413-7510.2018.152128>.
55. Vasko N.I., Kozachenko M.R., Solonechnyi P.M., Naumov O.G., Zymogliad O.V., Mykhaylenko Ye.O. Naked barley varieties to ensure food security. *Visn. Agrarn. nauky.* 2023. V. 101. № 10. С. 34–40. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202310-05>
56. El-Sayed M., Abdel-Aal E.S.M., Choo T.M. Differences in compositional properties of a hulless barley cultivar grown in 23 environments in eastern Canada. *Canadian Journal of Plant Science.* 2014. No 94(5). P. 807–815. <https://doi.org/10.4141/cjps2013-301>.
57. Mac Gregor A., Fincher G. Carbohydrate of the barley grain. In: *Barley: Chemistry and technology.* A.W. Mac Gregor, R.S. Bhatti, eds. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN, 1993. P. 73–130.
58. Arabshahi-Delouee S., Urooj A. Antioxidant properties of various solvent extracts of mulberry *Morus indica* L. leaves. *Food Chem.* 2007. Vol. 102. P. 1233–1240. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.07.013>

59. Bobo-García G., Davidov-Pardo G., Arroqui C., Virseda P., Marín-Arroyo M.R., Navarro M. Intra-laboratory validation of microplate methods for total phenolic content and antioxidant activity on polyphenolic extracts, and comparison with conventional spectrophotometric methods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2015. V. 95(1). P. 204–209. <https://doi.org/10.1002/jsfa.670>
60. Nogues S., Baker N.R. Effects of drought on photosynthesis in Mediterranean plants grown under enhanced UV-B radiation. *J. of Experimental Botany*. 2000. V/ 51/ Is. 348. P. 1309–1317. <https://doi.org/10.1093/jxb/51.348.1309>
61. Vasko N.I., Solonechnyi P.M., Solonechna O.V., Naumov O.G., Kozachenko M.R., Zymogliad O.V., Mykhaylenko Ye.O. The value of naked barley with colored grain as a starting material for the selection of food barley. Proc. of the 4th Internat. Sci.and Prac. Internet conf. «Ways of Science development in modern crisis conditions», June 8–9, 2023. Dnipro, Ukraine, 2023. P. 111–112.
62. Vasko N., Mykhailenko E. Anthocyanins in naked pigmented barley grain as a source of antioxidant activity *Food Science & Nutrition Technology*. 2023. V. 8. Issue 3. <https://doi.org/10.23880/fsnt-16000301>
63. Panizo M., Déniz-Expósito P., Rodríguez-Galdón B., Morales D.A., Mesa D.R., Diaz C., Rodríguez-Rodríguez E.M. The chemical composition of barley grain (*Hordeum vulgare* L.) landraces from the Canary Islands. *J. of Food Science*. 2020. V. 85(6). <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15144>
64. Legzdina L., Ivdre E., Piliksere D., Vaivode A. Effect of genotype and crop management systems on the content covered spring barley. *Zemdirbyste-Agriculture*. 2018. V. 105(4). P. 315–322. <https://doi.org/10.13080/z-a.2018.105.040>
65. Yang X.-J., Dang B., Fan M.-T. Free and bound phenolic compound content and antioxidant activity of different cultivated blue Highland barley varieties from the Qinghai Tibet Plateau. *Molecules*. 2018. V. 23(4). P. 879. <https://doi.org/10.3390/molecules23040879>
66. Rao S., Santhkumar A.B., Chinkwo K.A., Blanchard C. Investigation of phenolic compounds with antioxidant activity in barley, and oats affected by variation in growing location. *Cereal Chemistry*. 2020. V. 97(7). <https://doi.org/10.1002/ccge.10291>

Надійшла до редакції 15.11.2024 р.
Received 15.11.2024