

**BREEDING AND GENETIC ASPECTS OF FORMATION AND IMPROVEMENT OF BIOCHEMICAL PARAMETERS OF GRAIN IN WINTER WHEAT *TRITICUM AESTIVUM* L.**

**СЕЛЕКЦІЙНО-ГЕНЕТИЧНІ АСПЕКТИ ФОРМУВАННЯ ТА ПОКРАЩЕННЯ БІОХІМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЗЕРНА ОЗИМОЇ М'ЯКОЇ ПШЕНИЦІ *TRITICUM AESTIVUM* L.**

Yaroslav Fanin<sup>1</sup>

Olga Molodchenkova<sup>2</sup>

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-499-3-3>

**Abstracts. The subject of research.** The research is aimed at increasing the protein content and overall grain quality of winter wheat. The research is aimed at integrating specific genetic traits, such as the GPC-B1 gene and *Aegilops tauschii*, into the genetic pool of local wheat varieties to improve the biochemical properties. Given the growing global demand for high quality wheat, especially for the baking industry, the research aims to address the urgent need for innovative breeding methods that contribute to food security and agricultural sustainability. **Methodology.** The study used a combination of field experiments and laboratory analyses to evaluate the impact of genetic recombination on various characteristics of winter wheat. These characteristics included protein content, sedimentation level and trace element composition. The comparative analysis was conducted on modern wheat varieties and experimental genetic lines, with a special focus on genotypes carrying the GPC-B1 gene and the contribution of *Aegilops tauschii*. The study used advanced breeding methods to evaluate the stability and performance of these genetic lines under different agricultural conditions. **Objective.** The main goal of the study was to develop effective methods for breeding winter wheat using genetic sources

---

<sup>1</sup> Ph. D, Researcher,  
Plant Breeding & Genetics Institute –  
National Center for Seed and Cultivar Investigation, Ukraine

<sup>2</sup> Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher,  
Plant Breeding & Genetics Institute –  
National Center for Seed and Cultivar Investigation, Ukraine

to significantly improve grain quality and protein levels. This involved identifying promising genotypes that demonstrate improved biochemical properties and adaptability to different environmental conditions. Another key goal was to demonstrate the practical application of these genotypes in developing wheat varieties that meet the needs of the baking industry while providing nutritional value. **Conclusion.** The results of researches included, including the identification of promising introgression lines that demonstrated increased protein content, improved nitrogen accumulation and increased sedimentation. These traits were stable under different agricultural conditions, proving the effectiveness of incorporating of GPC-B1 and *Aegilops tauschii* into local wheat varieties. In addition, the study highlighted the potential of these genetic modifications to address global challenges in wheat production by improving grain quality and nutritional value. The scientific novelty of the study is that it demonstrated the successful integration of specific genetic traits into the local wheat gene pool, which significantly improves the biochemical properties of the grain. This innovative approach creates the basis for the development of new high-quality wheat varieties. The practical significance of the results is that they can contribute to the development of the baking industry and strengthen food security.

### 1. Вступ

Озима м'яка пшениця – найголовніша світова продовольча культура, її площі посіву останніми роками складають від 215 до 225 мільйонів гектарів, що відповідає 22 % від площі всіх орних земель, а валовий збір знаходиться на рівні 630 – 770 мільйонів тонн зерна. Серед країн лідерів за площею і врожайністю пшениці є Україна з 6,5 – 8 мільйонами гектарів площі і валовим збором 22-25 мільйонів тонн [1].

Із великого видового різноманіття пшениці м'якої, яка є гексаплоїдною, існує велике різноманіття текстури зерна, яке буває біле, червоне, коричневе, а також з м'яким і твердим ендоспермом. Вона має озимі, напівозимі і ярі форми, що дає можливість вирощувати її у різних кліматичних зонах. Оскільки тільки гексаплоїдні сорти пшениці володіють D геномом, унікальні властивості розмелювання та хлібопекарської якості борошна відносять до наявності саме третього геному [2].

Один із факторів, який робить пшеницю важливою, є також те, що в раціоні людини частка протеїнів рослинного походження складає 57%, джерелом половини якого є пшениця [3]. Підвищення вмісту білка та його якості має велике господарське і наукове значення. Однак ендосперм у пшениці не завжди містить достатню кількість вітамінів (особливо вітамінів А, В, Е, С), мінералів (особливо заліза, цинку, магнію і селену) та незамінних амінокислот [4]. Також певні проблеми виникають при використанні продукції із пшеничного зерна, які містять певний вид специфічного білка глютену, який може викликати алергічну реакцію у людей – целиацію [5].

Проблема «прихованого» голоду займає особливе місце серед «хвороб цивілізації». «Прихований» голод – це ситуація, коли людина отримує з їжею недостатню кількість одного, або декількох необхідних нутрієнтів, наприклад вітамінів і мінералів [6]. В сучасній ситуації 2 млрд населення страждають від «прихованого голоду», що становить майже одну третину всього населення світу та має численні негативні наслідки для здоров'я [7].

Складність у процесі підвищення у зерні вмісту білка викликає високий екзогенний ефект нового генетичного матеріалу і складність комплексу генетичних систем, що регулюють процес вбудовування нового генетичного матеріалу [8]. Вміст мікроелементів у зерні пшениці детермінується генетично та залежить від факторів навколишнього середовища. Одним із чинників формування зерна високоякісного є оптимальний вміст у рослинах важливих макро- та мікроелементів. Мікроелементи, всупереч їхньої низької концентрації, беруть активну участь у всіх життєво важливих біохімічних процесах [9]. Така роль мікроелементів значною мірою пов'язана з ферментативним каталізом, що визначає їх участь у процесах фотосинтезу, дихання, азотного і фосфорного обмінів. Дефіцит мікроелементів у рослинах порушує нормальний перебіг фізіолого-біохімічних процесів і виключає отримання високих врожаїв саме якісного зерна [10]. Рівень реутилізації мікроелементів у генеративні органи пшениці доволі низький, тому є перспективним напрямом дослідження для генетичного поліпшення культури.

Проблема збільшення валового збору зерна і підвищення його якості завжди була й залишається актуальною і має надзвичайне господарське та наукове значення. І має вона два основних напрями вирішення.

Перший – підвищення агротехнічного рівня вирощування продукції. Другий – селекційно-генетичне удосконалення сортів. Ефективність першого напряму можна значно підвищити вирощуванням генетично високопродуктивних сортів з високими показниками якості зерна, основними з яких є рівень білка та інших біохімічних компонентів. Із наукової літератури відомо декілька етапів вивчення цієї проблеми: в 70-х роках – міжнародна програма Джонсона, у 80-х – дослідження Канзаського університету США та багато інших досліджень передусім з пошуку і створення нових ефективних генетичних джерел високої білковості та інших біохімічних показників якості зерна. Проте досягнуті результати часто мали фрагментарний характер, а створені сорти з підвищеним вмістом білка були переважно вузько локалізовані. Основна причина такого стану – це негативний зв'язок між продуктивністю сорту і вмісту білка у його зерні, як і відсутність ефективних генетичних донорів. Щодо остаточної проблеми є певні перспективи із створенням високобілкових генотипів від віддалених схрещувань з *Aegilops tauschii* та інтрогресії гена GPC-B1 від *Triticum turgidum dicoccoides* у місцевий генофонд.

Основною метою роботи було на базі нового генетичного матеріалу здійснити методологічне обґрунтування та реалізацію цілеспрямованої програми селекції пшениці озимої м'якої на підвищення вмісту білка та поліпшення інших біохімічних показників у зерні.

Для реалізації поставленої мети програмою досліджень передбачалося вирішити наступні завдання:

1. Здійснити ретроспективний аналіз стану сучасних селекційних досягнень за біохімічними показниками якості зерна.
2. Дослідити колекцію інтрогресивних ліній з генами від *Aegilops tauschii* та лінії з геном GPC-B1 за головними показниками продуктивності та біохімічної якості зерна, і дати їм селекційну оцінку.
3. Дослідити формування білковості зерна в лініях з генами від *Aegilops tauschii* та ліній з геном GPC-B1 шляхом порівняльного вивчення особливостей накопичення та реутилізації азоту з вегетативних органів рослин озимої пшениці в процесі онтогенезу в порівнянні з іншими генами.
4. Розробити прийоми введення гена GPC-B1 та іншого інтрогресивного матеріалу в місцевий генофонд озимої м'якої пшениці та

визначити ефективні методи селекції на підвищення вмісту білка та інших господарські цінних ознак.

У роботі викладено результати досліджень сучасних сортів озимої м'якої пшениці із СГІ–НЦНС, вітчизняних і закордонних селекційних установ, які найбільш поширені в Україні. В дослідіах головним чином порівнювались сучасні сорти з сортами попередніх етапів селекції для виявлення найбільших селекційних змін для сучасних сортів. Дослідження здійснювали за показниками елементів структури врожаю, вмістом білка та інших біохімічних показників якості зерна, а також рівнем седиментації.

У роботі була задіяна колекція інтрогресивних ліній як можливих донорів високої білковості. Це – лінії з геном GPC-B1 (6 шт.) від *Triticum dicoccoides* та лінії з генами від *Aegilops tauschii* (18 шт.). Цей матеріал досліджувався за врожайністю, масою 1000 зерен, вмістом білка в зерні, фракційним складом білка, рівнем седиментації та вмістом мікроелементів. Було виявлено суттєвий вплив гена GPC-B1 на процес накопичення та реутилізації азотовмісних сполук у порівнянні з дією інших генетичних систем.

Розпочата селекційна програма на базі нового генетичного матеріалу, внаслідок чого розроблені методичні прийоми введення гена GPC-B1 та іншого інтрогресивного матеріалу в місцевий генофонд озимої м'якої пшениці для оптимізації селекційних прийомів вирощування пшениці озимої, які спрямовані на покращення біохімічної якості зерна, встановлені ефективні методи селекції на підвищення вмісту білка та інших господарсько цінних ознак.

### **2. Сучасний стан селекції за врожайністю та біохімічними показниками якості зерна озимої м'якої пшениці**

В Селекційно-генетичному інституті – Національному центрі насіннезнавства та сортовивчення (СГІ-НЦНС) був проведений довгостроковий дослід з вивчення різних за роком створення сортів. Колекцію за хронологією склали сорти від «народної селекції» до найновіших на той час внесків наукових колективів. Багаторічна селекція була спрямована, головним чином, на підвищення зернової продуктивності і призвела до прискореної еволюції пшениці, яка проявилася у зміні практично всіх ознак і властивостей рослини [11]. Дослідний

матеріал був поділений на 8 груп: до першої групи входили сорти, які вирощувалися на півдні України на початку 20-го сторіччя, і далі групи сортів нових етапів селекції (різниця між групами приблизно складала 10-15 років). Дослід був проведений з 1972 року на полях СГІ-НЦНС. Сорти вивчалися за багатьма показниками: врожайність, елементи структури врожаю, висота рослин, довжина вегетації та вміст білка у зерні.

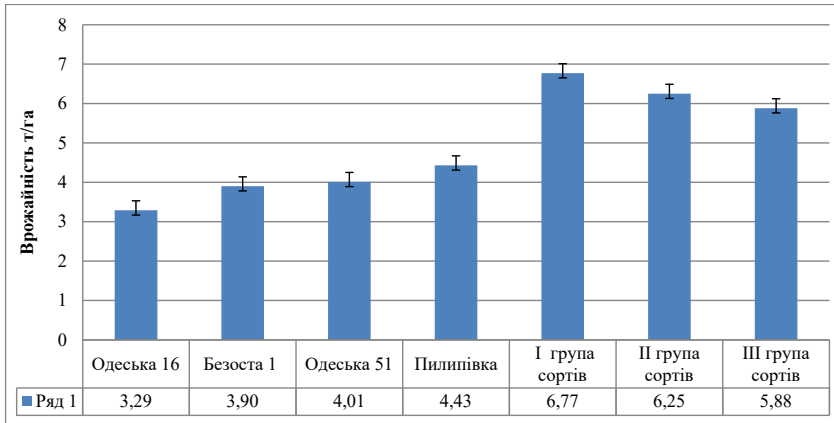
У даному розділі роботи були досліджені колекційні сорти відділу селекції та насінництва пшениці СГІ-НЦНС, до яких належать найбільш поширені сорти в Україні. Враховуючи сильну кореляційну залежність між елементами продуктивності та параметрами якості зерна [12], дослідження проводилися як за врожайністю, елементами структури врожайності, так і за біохімічними показниками.

Сорти, які були взяті у дослідження, були розділені на три групи за географічним походженням: I – сорти СГІ-НЦНС, II – сорти української селекції, III – сорти, створені в закордонних установах та сорти стандарти, до яких входили сорти минулих етапів селекції Одеська 16, Одеська 51, Безоста 1 та Пилипівка.

У період 2020–2022 рр. сорти з колекції відділу селекції та насінництва пшениці були проаналізовані за низкою показників: урожайність, структурні елементи рослини, вміст білка в зерні та ступінь озерненості. Врожайність озимої пшениці в основному формується чотирма основними структурними елементами: кількістю продуктивних рослин на одиницю площі, кількістю продуктивних колосків на рослині, кількістю зерен у колосі та масою 1000 зерен. Збільшення окремих елементів структури врожайності призводить до збільшення загального врожаю [13–14].

В результаті аналізу найбільш поширених сортів озимої м'якої пшениці встановлено, що їх врожайність була на рівні 5,88 – 6,77 т/га, це в 1,32 – 2,25 рази більше, ніж у сортів попередніх етапів селекції. Виявлені суттєві селекційні зміни в ретроспективному аналізі, які вплинули на врожайність досліджених сортів рис. 1.

Так, зменшення висоти рослин, в порівнянні з сортами ранніх етапів селекції, варіювало від 19,1 до 26,5 %, що зумовило збільшення зерновою частки у співвідношенні зернової та вегетативної маси від 32-40 % у сортів ранніх етапів селекції до 42-48 % у сучас-



**Рис. 1. Урожайність сучасних сортів різних груп за походженням у порівнянні з етапними сортами-стандартами (т/га) в середньому по роках і варіантом добрив**

них сортів. Показник маси зерна з одного колоса у сучасних сортів також значно підвищився у порівнянні з представниками сортів ранніх етапів селекції. Маса зерна з одного колоса у сучасних сортів на 76-94 % у відносних величинах більша в порівнянні з масою сортів ранньої селекції.

Для визначення частки врожаю зерна в загальній масі, тобто для визначення «К-господарське» рослини, ми розраховували відсоток маси зерна, отриманого з 1 м<sup>2</sup> по відношенню до загальної маси надземної частини на 1 м<sup>2</sup>. Частка маси зерна в загальній надземній біомасі також має тенденцію до збільшення у сортів сучасної селекції [15]. Аналіз даних показав, що залежно від року та рівня внесення азотних добрив на окремих етапах селекції відбувалося збільшення «К-господарське» від 32-40 % до 42-45 % у високорослих сортів селекції СГІ-НЦНС, на 39-44 % у сортів вітчизняних установ та на 46-48 % у сортів зарубіжної селекції. Між значеннями «К-господарське» та врожайністю сортів спостерігається досить висока кореляція залежно від умов року, азотного живлення та групи сортів: від мінімального значення  $r = 0,54 \pm 0,14$  до максимального значення  $r = 0,73 \pm 0,24$ .

Встановлено, що при збільшенні доз добрив спостерігалася значна диференціація по густоті стеблистою. Видно, що збільшення доз мінеральних добрив призводило до закономірного зростання питомої ваги продуктивних стебел у всіх групах сортів. Тільки сорти з I-ї групи перевищували за показником густоти стеблистою сорти ранніх етапів селекції на 1,2 % у варіанті N 60 та на 1,7 % у варіанті N 120, тоді як сорти II-ї та III-ї груп поступалися їм за густотою стеблистою у двох варіантах доз добрив у середньому по роках.

Серед сортів СГІ–НЦНС майже кожен четвертий сорт (24,8%) мав масу 1000 зерен понад, ніж 40 грамів. Проте лише 12,3 % сортів інших наукових установ України досягли такого показника. Таким чином, стійкий прогрес у нарощуванні маси 1000 зерен показували тільки сорти селекції СГІ–НЦНС та тільки деякі сорти з інших установ України.

На фоні значних успіхів у підвищенні врожайності сучасних сортів, виявлена перевага сортів ранніх етапів над сортами сучасної селекції за вмістом білка – від 10,4 до 14,8 % у відносних величинах. Найменша різниця спостерігалась за білковістю між сортами ранніх етапів і групою сортів з Українських установ ( в середньому на 13,8 % у варіанті внесення добрив N 60 і 10,4 % у варіанті N 120). Найбільша різниця за білковістю зерна спостерігалась у сортів іноземної селекції у двох варіантах живлення – 14,8%.

Наші дослідження показали, значні зміни білковості у серед сортів ранніх етапів селекції (табл. 1). Так, у варіанті внесення добрив N 60 найбільший вміст білка був у сорту Одеська 16 – 12,0%, найменший – у Пилипівки – 10,5 %. Тобто, найбільша різниця складала 1,5 % ( $HP_{0,05}$ , %: по факторах АВ – 0,6). У варіанті N 120, у сортів описаних вище, ця різниця складала 1,7 % ( $HP_{0,05}$ , %: по факторах АВ – 0,6). Також суттєва варіація спостерігалась серед груп сучасних сортів. За результатами визначення коефіцієнта варіації (CV) трирічні дані за вмістом білка межують від 4,2 до 10,7 %, що свідчить про однорідний стан сортів у кожній з груп.

Порівнюючи вміст білка в зерні сортів по групах, встановили, що в середньому по сортах не існує суттєвої різниці між групами. У варіанті N 60 I-ша група мала білковість зерна на рівні 10,0 %, II-га й III-я групи – 10,3 і 9,9 % відповідно (при  $HP_{0,05}$  для фактора В –



0,4 % різниця не є суттєвою). Аналогічна ситуація спостерігалася у варіанті доз добрив N 120 – від I-ї до III-ї групи вміст білка зерна була на рівні 11,2, 11,0 та 10,9 % відповідно до груп. Як видно, різниця на високому агрофоні теж несуттєва.

З отриманих результатів вивчення рівня седиментації було зроблено висновок, що майже всі досліджені сорти в середньому по групах поступалися сортам ранніх етапів селекції. Виключенням був рівень седиментації сортів Української селекції у варіанті внесення добрив N 60, в порівнянні з сортом Пилипівка. Встановлені були високі рівні кореляції між вмістом сирого протеїну та рівнем седиментації в різних групах сортів  $r = 0,77 - 0,98$ . Рівень седиментації зменшувався в середньому по сортах (від сортів СГІ–НЦНС до сортів іноземної селекції) у межах від 34,8 до 7,1 %

Таблиця 1

**Вміст білка у зерні та рівень седиментації  
у сортів минулих етапів селекції пшениці м'якої озимої**

Сорти (Фактор В)	Доза азотних добрив, N, кг/г (Фактор С)	Вміст білка, %				Седиментація, мл			
		Фактор А			Сред. знач. $\bar{X}$	Фактор А			Сред. знач. $\bar{X}$
		2020 р.	2021 р.	2022 р.		2020 р.	2021 р.	2022 р.	
Одеська 16	60	11,1 ±0,1	12,5 ±0,2	12,4 ±0,2	12,0	50 ±1,2	70 ±1,3	57 ±2,2	59
	120	12,5 ±0,2	13,3 ±0,1	14,1 ±0,3	13,3	66 ±2,2	75 ±1,2	68 ±2,1	70
Безоста 1	60	10,8 ±0,2	12,4 ±0,2	12,2 ±0,1	11,8	43 ±2,4	64 ±2,0	53 ±1,2	53
	120	11,9 ±0,3	13,4 ±0,3	13,7 ±0,3	13,0	61 ±1,4	74 ±2,2	63 ±0,9	66
Одеська 51	60	10,6 ±0,2	11,0 ±0,2	12,1 ±0,4	11,2	42 ±1,6	57 ±1,2	52 ±2,1	50
	120	11,5 ±0,1	12,3 ±0,1	12,9 ±0,2	12,2	57 ±1,5	71 ±1,5	62 ±1,2	63
Пилипівка	60	9,4 ±0,2	10,3 ±0,3	11,8 ±0,2	10,5	39 ±2,4	55 ±1,4	49 ±1,7	48
	120	10,1 ±0,2	11,7 ±0,3	13,0 ±0,1	11,6	54 ±2,1	69 ±1,1	58 ±1,6	60

Вміст білка  $HP_{0,05}$  %: по факторами АВС – 0,8  
Седиментація  $HP_{0,05}$  мл: по факторами АВС – 5,54

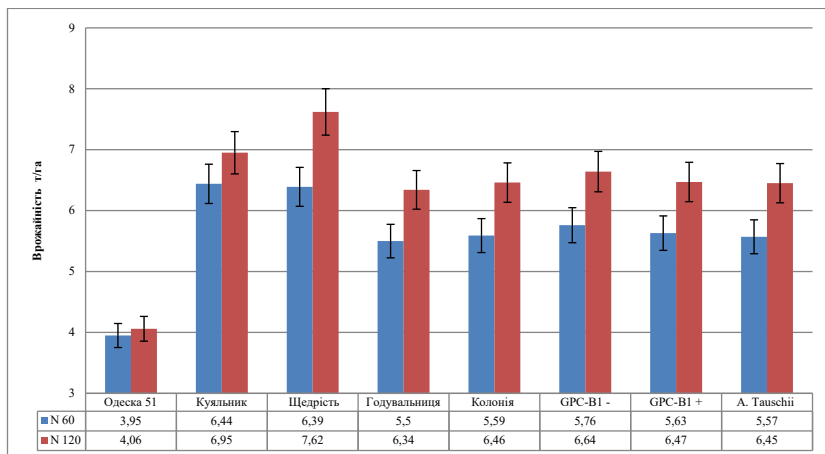
Отримані результати дали змогу зробити висновок, що сорти української та іноземної селекції поступаються місцевим сортам (СП-НЦНС) за продуктивністю та якістю зерна. Для селекції на поліпшення біохімічної якості зерна необхідно залучати сорти саме СП-НЦНС, які в собі найбільш вигідно поєднують як елементи продуктивності, так і біохімічні показники якості зерна.

### 3. Дослідження нових генетичних джерел високої білковості зерна

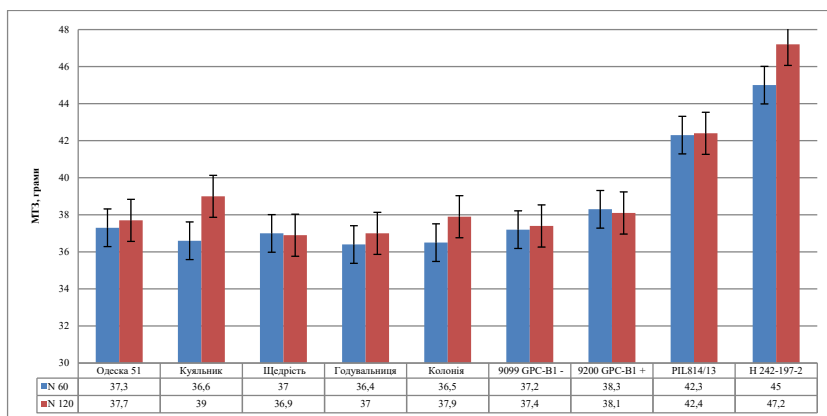
Встановлено, що досліджені інтрогресивні лінії з геном GPC-B1 та з генами від *A. tauschii* мали достатню продуктивність, щоб переважати за врожайністю такі сорти, як Колонія, Годувальниця та інші в середньому на 6 % відносних величин. Виявлено, що у роках з оптимальними умовами наявність гена GPC-B1 не призводила до зменшення врожайності, але за дефіциту вологи спостерігалось зниження цього показника на 8,2 – 10,2 % у відносних величинах.

За врожайністю інтрогресивні лінії з геном GPC-B та з генами від *A. tauschii* поступалися на 14,5 – 18,1 % таким високоінтенсивним сортам, як Куяльник та Щедрість (рис. 2) Але інтрогресивні лінії переважали чи мали однакову врожайність з усіма іншими сортами, такими, як Колонія, Годувальниця і високорослий напівінтенсивного типу сорт Одеська 51. Встановлено, що в оптимальні умови року ген GPC-B1 не знижував врожайність, але при дефіциті вологи таке може спостерігатися. Відмічено, що серед інтрогресивних ліній було кілька, які стабільно по роках і варіантах внесення добрив мали результат врожайності на рівні чи вище, ніж найбільш врожайні сорти-стандарти. Це – лінії AIL96ф/18, E 1089-19, NIL4, Eг 9155 та Eг 9200.

Серед досліджених інтрогресивних ліній найбільшу масу 1000 (МТЗ) мали лінії з генами високої білковості від *A. tauschii*. Серед найкрупнозерних були лінії P1L814/13, H 242-197-2, E2778/14 і P1L355PH18. Вони перевищували за цим показником сорти-стандарту на 3 – 9 г та стабільно, незалежно від року і доз добрив, мали МТЗ понад за 40 г. Лінії з геном GPC-B1 не мали значно підвищених показників МТЗ, але була виділена лінія GPC-B1 9200, у якої були достовірно вищі показники МТЗ, ніж у сортів-стандартів.



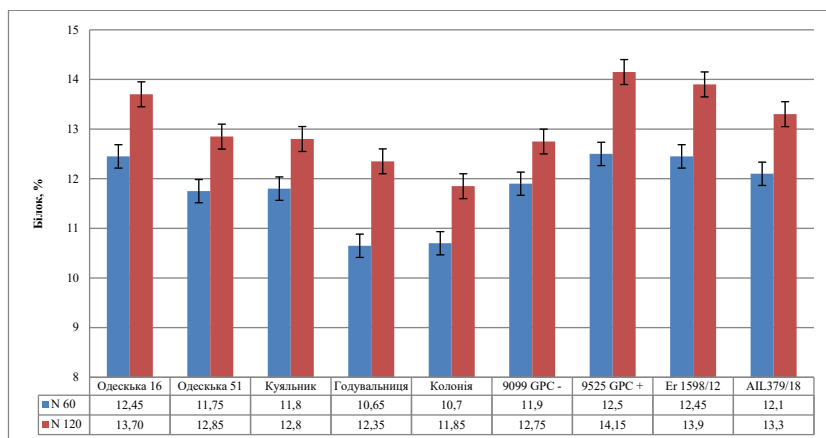
**Рис. 2. Урожайність зерна пшениці у сортів-стандартів та інтро-гресивних ліній залежно від дози азотних добрив (середнє по 2021–2022 роках), т/га**



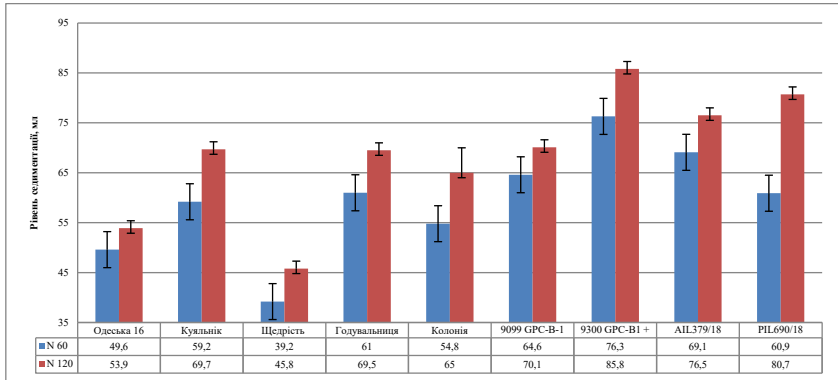
**Рис. 3. Маса 1000 зерен (MT3) у кращих інтрогресивних ліній в порівняно з показниками сортів-стандартів у варіантах доз добрив N 60 та N 120 у середньому по роках досліджень, г**

Виявлено, що лінії з геном GPC-B1 та генами від *A. tauschii* мали однакові показники вмісту білка в межах 12,7 – 14,0% й 12,7 – 13,9 % залежно від варіанту внесення добрив (N 60 і N 120 відповідно). Найвищий вміст білка в зерні серед сортів-стандартів був у сорту Одеської 16. В залежності від року і варіанту внесення добрив аналогічний рівень білковості показали від однієї до дев'яти ліній з генами від *A. tauschii*, тобто в кращому випадку 50 % досліджених ліній. Серед них можна виділити E 1598/12, PIL814/13, AIL379/18 та F268-14. Всі лінії з геном GPC-B1, за винятком варіанту N 120 у 2022 році, мали вміст протеїну на рівні сорту Одеська 16.

Виявлено, що наявність гена GPC-B1 в інтрогресивних лініях значно підвищувала рівень седиментації (рис. 4). Лінії-носії гена GPC-B1 за рівнем седиментації перевищували в середньому на 19-19,4 мл сорти-стандарти, на 9,5-9,8 мл – лінії з генами від *A. tauschii* та на 8,4-12,0 мл – сестринську лінію без гена GPC-B1. Тому ген GPC-B1 можна розглядати не тільки як джерело високої білковості, а ще й як можливість поліпшення хлібопекарських показників,



**Рис. 4. Вміст білка зерна у кращих інтрогресивних ліній в порівнянні з сортами-стандартами у варіантах доз добрив N 60 та N 120 у середньому по роках досліджень, %**



**Рис. 5. Показник седиментації кращих інтрогресивних ліній у порівнянні з сортами-стандартами у варіантах внесення доз добрив N 60 та N 120 у середньому по роках досліджень, мл**

що, безумовно, тільки підвищує цінність даного гена. Також слід зазначити, що були виявлені декілька ліній з генами від *A. tauschii*, які стабільно, незалежно від року і дози мінеральних добрив мали вищий рівень седиментації, ніж сорти-стандарти. Це – лінії AIL379/18, PIL814/13, PIL690/18, NIL2, Er 1598/12 та E 1089-19.

Наявність гена GPC-B1 від *Triticum turgidum* ssp. *dicoccoides* суттєво підвищувала вміст мікроелементів у досліджених генотипах (табл. 2). Середні значення вмісту марганцю у лініях з геном GPC-B1 були вищі на 18 %, ніж у сорту Куяльник, вміст заліза – на 34 %. Підвищений вміст мікроелементів свідчить про те, що ген GPC-B1 поліфункціональний, і не лише підвищує вміст білка в зерні, а ще й концентрацію заліза та марганця.

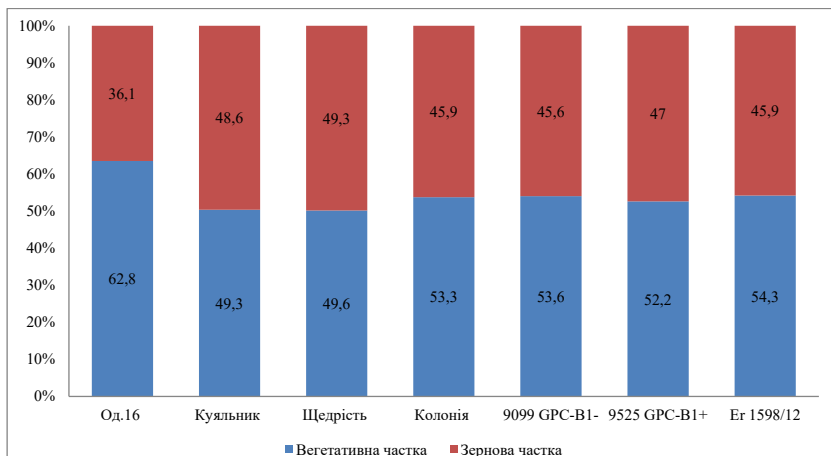
За результатами дослідження фракційного складу білка зерна генетичних джерел можна стверджувати, що лінії носії гена GPC-B1 та генів від *A. tauschii* мають позитивний вплив як на загальний вміст запасних білків, так і на співвідношення між фракціями білка зерна озимої м'якої пшениці. Також встановлена позитивна кореляція між вмістом запасних білків і рівнем седиментації.

Встановлено, що ген GPC-B1 має вплив як на процеси накопичення, так і на реутилізацію азотовмісних сполук (рис. 6 – 7). Лінії-носії гена GPC-B1 в нашому досліді мали достовірну різницю як у накопиченні, так і реутилізації азотовмісних сполук в порівнянні з сестринською лінією без гена GPC-B1 у межах 2,7 – 45,0 % відносних величин, залежно від року та варіанту дози добрив. Також встановлена різниця (у межах 13,0 – 54,6 % відносних величин) у реутилізації азоту в листках і стеблах між лінією-носієм гена GPC-B1 й сортами-носіями таких генетичних систем, як гени короткостебловості, пшенично-житні транслокації, алелі – носії високих хлібо-пекарських показників. У лінії з геном GPC-B1 відсоток реутилізації азоту був вищий, ніж у інших генотипів, що пояснює природу підвищеного вмісту сирого протеїну в зерні генотипів з геном. Ці особливості накопичення та реутилізації азотовмісних сполук та формування якості зерна у ліній-носіїв гена GPC-B1 можуть бути використані в якості надійного маркера фенотипової ідентифікації цього гена.

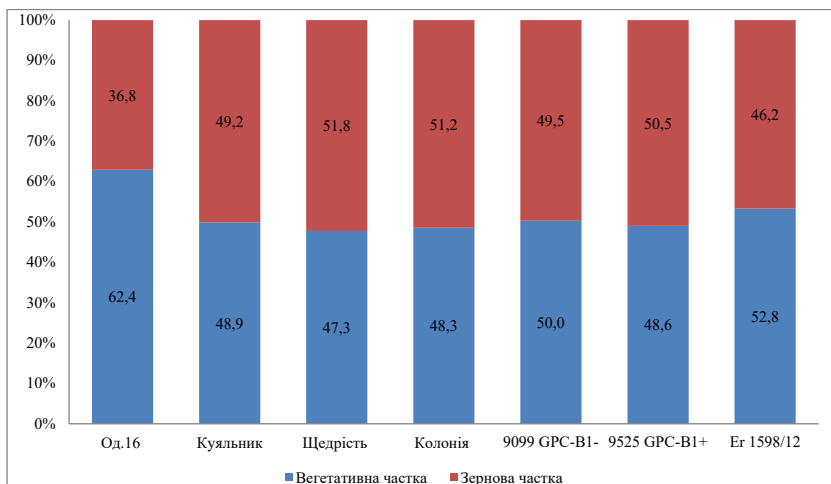
Таблиця 2

**Вміст мікроелементів у інтрогресивних лініях пшениці  
урожаю 2020–2022 року**

Генотип	Вміст заліза, мкг /г	Вміст марганцю, мкг/г
Куяльник	31,5±0,2	0,050±0,002
9099 (GPC-B <sub>1</sub> -)	31,5±0,1	0,049±0,002
9155 (GPC-B <sub>1</sub> +)	43,5±0,2	0,063±0,001
9200 (GPC-B <sub>1</sub> +)	42,5±0,1	0,050±0,002
9250 (GPC-B <sub>1</sub> +)	41,5±0,2	0,057±0,001
9300 (GPC-B <sub>1</sub> +)	44,0±0,3	0,060±0,001
99525(GPC-B <sub>1</sub> +)	46,5±0,2	0,065±0,002
E 1598	31,0±0,3	0,038±0,003
min	31,0	0,038
max	46,5	0,065
$\bar{x}$	42,25 ±1,59	0,055±0,0029
CV, %	14,36	17,05



**Рис. 6. Розподіл маси між вегетативними і генеративними частинами в надземній частині рослин у середньому по роках у варіанті N 60**



**Рис. 7. Розподіл маси між вегетативними і генеративними частинами в надземній частині рослин у середньому по роках у варіанті N 120**

#### 4. Селекційні аспекти використання генів від *Aegilops tauschii* та гена *GPC-B1*

Враховуючи інформацію з наукової літератури про результати використання гена *GPC-B1* та генів від *A. tauschii* для покращення біо-хімічних показників зерна в деяких наукових установах світу, нами в Селекційно-генетичному інституті – Національному центрі насіннезнавства та сортовивчення (СГІ–НЦНС), також були розпочаті подібні дослідження за спеціальною програмою. Робота полягає в розробці методичних питань введення гена *GPC-B1* та генів від *A. tauschii* у місцевий сортовий генофонд озимої м'якої пшениці та селекційні дослідження з цим генетичним матеріалом (рис. 8) для поєднання гена високої білковості й сортів, які є носіями алелів високих хлібопекарських показників, мають достатній рівень врожайності та комплекс інших господарсько цінних ознак і властивостей.



Рис. 8. Напрями селекційного залучення генетичних донорів високого вмісту білка в місцевий генофонд



Метою досліджень, представлених у даному розділі, було встановити ефективність добору за вмістом білка в зерні у рекомбінантних лініях, створених від схрещувань з донорськими лініями – носіями гена GPC-B1 та генів від *A. tauschii* та показати можливість комбінування в одному генотипі ознак з високими показниками вмісту білка зерні, врожайності та хлібопекарських властивостей.

Перший етап досліджень передбачав добір рекомбінантних ліній, створених на базі парних схрещувань місцевих сортів і ліній – донорів гена GPC-B1. Цей етап почався з гібридних популяції F<sub>2</sub>, після індивідуального добору по рослині із гібридних популяцій. З відібраних ліній під урожай 2020 року був закладений селекційний розсадник у кількості 3200 рекомбінантних ліній із 8 гібридних комбінацій (табл. 3).

Таблиця 3

**Результати добору рекомбінантних ліній F<sub>3</sub>  
від схрещувань ліній з геном GPC-B1 із сортами –  
носіями алелів високих хлібопекарських властивостей**

Гібридна комбінація	Всього, шт.	Кількість відібраних ліній					
		За морфологічними ознаками		За перевищенням білковості			
				Сорту- стандарту,		Кращих батьківських компонентів	
Шт.	%	Шт.	%	Шт.	%		
Ег 12/17 X Нива од.	400	110	27,5	58	52,7	34	30,9
Ег 12/18 X Оптима од.	400	62	15,5	39	62,9	17	27,4
Ег 12/19 X Оранта од.	400	63	15,7	35	55,5	17	26,3
Ег 12/21 X Кантата од.	400	75	18,7	37	49,3	16	21,3
Ег 12/53 X Нива од.	400	52	12,9	33	63,4	10	19,2
Ег 12/64 X Оранта од.	400	84	21	44	52,3	24	28,5
Ег 12/66 X Кантата од.	400	43	10,7	27	62,7	12	27,9
Ег 13/11 X Оптима од.	400	35	8,7	23	65,7	10	28,5
Сума	3200	524	15,7	296	56,4	140	26,7

Внаслідок відпрацювання методичних прийомів введення гена GPC-B1 та іншого інтрогресивного матеріалу в місцевий генофонд озимої м'якої пшениці встановлені чіткі закономірності. Виявлена значно більша диференціація за показниками якості зерна у варіанті з підвищеною дозою добрив, внаслідок чого зростає ефективність добору. Використання розрідженого посіву (ширина міжряддя 30 см) в поєднанні з високим агрофоном азотних мінеральних добрив дає змогу найбільш ефективно виявляти генотипи з високим вмістом білка.

Встановлено, що використовуючи такі методи, як визначення білка з використанням інфрачервоного аналізатора на первинних ланках селекції (F3-5) з подальшою перевіркою методом К'ельдаля, рівня седиментації методом SDS-30 на первинних ланках селекції (F3-5) з подальшою перевіркою реологічних властивостей тіста на альвіографі (F5-6), можна створити вихідний матеріал з підвищеним вмістом білка та показниками якості сильних пшениць.

Внаслідок введення гена GPC-B1 та іншого інтрогресивного матеріалу в місцевий генофонд були виявлені та відібрані лінії (в кількості від 3,1–6,6 % від початкової кількості ліній, залежно від гібридної комбінації), які стабільно за роками забезпечували високий вміст білка. Для прискорення ідентифікації таких ліній можливе використання різних екологічних зонах сортовипробування, або різних агрофонів.

В результаті добору за фенотиповими ознаками, відібрані лінії були досліджені на наявність гена GPC-B1. Частота таких ліній в наших дослідженнях в залежності від гібридної комбінації знаходилась у межах 1,7–2,4 %. Таким чином, досліджені лінії проходять подальше вивчення в конкурсних екологічних сортовипробуваннях та на різних агрофонах, як можливі кандидати для передання нового сорту до Державного сортовипробування.

Порівняння всіх трьох напрямків поліпшення біохімічної якості зерна пшениці дало змогу встановити, що найбільшу врожайність мають гібридні комбінації від парних схрещувань із залученням гена GPC-B1. За рівнем білка в зерні найкращий результат був у гібридних комбінацій від складних схрещувань з *A. tauschii*. За умовним збором білка всі три групи гібридних комбінацій мали однакові результати, що робить ці напрями рівнозначно перспективними для поліпшення біохімічних показників якості зерна.

## 5. Висновки

У роботі здійснено теоретичне обґрунтування та експериментальне підтвердження можливої реалізації по суті нової наукової програми селекції, спрямованої на вирішення селекційно-генетичними методами надважливої народно-господарської проблеми підвищення рівня білковості зерна пшениці м'якої озимої та інших його біохімічних якостей.

1. В результаті ретроспективного аналізу сучасних селекційних досягнень за результатами вивчення найбільш розповсюджених сучасних вітчизняних та закордонних сортів пшениці м'якої озимої встановлено, що їхня врожайність в експерименті була на рівні 5,88 – 6,77 т/га, це в 1,32 – 2,25 рази більше, ніж у сортів ранніх етапів селекції. Виділені кілька головних чинників, що вплинули на значний приріст врожайності в порівнянні з сортами попередніх етапів селекції. а) збільшення зернової частки у її співвідношенні з вегетативною масою від 32 – 40 % до 42 – 48 %, що стало можливим завдяки зменшенню висоти рослин в межах 19,1 – 26,5 %; б) достовірно встановлено збільшення маси зерна з одного колоса на 76 – 94 %; в) у сортів СГІ-НЦНС 24,8 % та 12,3 % сортів вітчизняної селекції мали достовірне перевищення над сортами ранніх етапів селекції за показником маси 1000 зерен серед сортів; г) підвищення позитивної реакції на внесення азотних мінеральних добрив.

2. Встановлено зниження вмісту білка в зерні у сучасних сортів в порівнянні з сортами ранніх етапів селекції від 10,4 до 14,8 %. Найменша різниця за вмістом білка у зерні спостерігалась між сортами ранніх етапів селекції та групою сортів з Українських установ. Найбільша різниця за вмістом білка у зерні спостерігалась у сортів іноземної селекції: у двох варіантах внесення добрив різниця склала 14,8 %.

3. За показником рівня седиментації сорти сучасної селекції в середньому по групах поступалися сортам ранніх етапів селекції. Виключенням був рівень седиментації сортів Української селекції у варіанті внесення добрив N 60. Встановлений високий позитивний рівень кореляції між вмістом сирого протеїну та рівнем седиментації в різних групах сортів в межах  $r = 0,77 - 0,98$ . Рівень седиментації зменшувався в середньому по сортах (від сортів СГІ-НЦНС до сортів іноземної селекції) від 7,1 % до 34,8 % у відносних величинах.

4. В колекції інтрогресивних ліній з геном GPC-B1 та генами високої білковості від *A. tauschii* виділені лінії, які мали врожайність на рівні, або й більшу, ніж найурожайніші сорти-стандарти: AIL96ф/18, E 1089-19, NIL4, Eg 9155 та Eg 9200. Виявлено, що в оптимальних умовах року наявність гена GPC-B1 достеменно не призводила до зменшення врожайності, а при дефіциті вологи спостерігалось зниження цього показника у відносних величинах на 8,2 – 10,2 %.

5. Нові генетичні джерела – ген GPC-B1 та гени від *Aegilops tauschii* є ефективними донорами удосконалення пшениці м'якої озимої за вмістом білка, показником седиментації та інших біохімічних показників якості зерна. Всі лінії з геном GPC-B1 мали показник вмісту протеїну більший на 1,5 – 2,0 %. В залежності від року і варіанту внесення добрив, у кращому випадку 50 % із досліджених ліній мали вміст білка більше, ніж сорти – стандарти. Серед них можна виділити E 1598/12, PIL814/13, AIL379/18 та F268-14. Лінії-носії гена GPC-B1 перевищували за рівнем седиментації в середньому на 19-19,4 мл сорти-стандарти, на 9,5 - 9,8 мл – лінії з генами від *Aegilops tauschii* та 8,4-12,0 мл – сестринську лінію без гена GPC-B1. В інтрогресивних лініях з геном GPC-B1 встановлено збільшення вмісту мікроелементів – заліза та марганцю.

6. Установлено достовірну перевагу зменшення як накопичення, так і у реутилізації азотовмісних сполук у ліній носіїв гена GPC-B1 в порівнянні з сестринською лінією без гена GPC-B1 у відносних величинах у межах 2,7 – 45,0 % залежно від року та дози добрив. Також встановлена різниця (в межах 13,0 – 54,6 % відносних величин) у реутилізації азоту в листках і стеблах між лінією носієм гена GPC-B1 і сортами носіями таких генетичних систем, як гени короткостебловості, пшенично-житні транслокації, алелі носії високих хлібопекарських показників. Виявлений вплив гена GPC-B1 на реутилізацію азоту, що пояснює природу підвищеного вмісту сирого протеїну в зерні генотипів за дії цього гена. Ці особливості накопичення та реутилізації азотовмісних сполук та формування якості зерна у ліній носіїв гена GPC-B1 можуть бути використані в якості маркера фенотипової ідентифікації цього гена.

7. Розроблені методичні прийоми введення гена GPC-B1 та іншого інтрогресивного матеріалу в місцевий генофонд пшениці м'якої

озимої. Встановлені наступні закономірності: а) виявлена значно більша диференціація за показниками якості зерна при підвищених дозах добрив, внаслідок чого зростає ефективність добору; б) використання розрідженого посіву (ширина міжряддя 30 см) у поєднанні з високим агрофоном азотних мінеральних добрив дає змогу ефективно виявляти генотипи з високим вмістом білка; в) алгоритм лабораторних досліджень: визначення білка з використанням інфрачервоного аналізатора на первинних ланках селекції (F3-5) з подальшою перевіркою методом К'ельдаля, рівня седиментації методом SDS-30 на первинних ланках селекції (F3-5) з подальшою перевіркою реологічних властивостей тіста на альвеографі (F5-6) дає можливість створити вихідний матеріал з підвищеним вмістом білка та показниками якості сильних пшениць.

8. Внаслідок реалізації програми селекції на поліпшення біохімічних показників зерна, яка передбачала введення гена GPC-B1 та іншого інтрогресивного матеріалу в місцевий генофонд, були відібрані 49 ліній. Від трьох напрямків селекційного процесу відібрані 27 ліній від парних схрещувань, 10 ліній від потрійних схрещувань, 12 ліній від складних схрещувань. Ці лінії стабільно по роках перевищували за вмістом білка сорт стандарт Куяльник та кращий батьківський компонент. Такі лінії далі проходять подальше вивчення в конкурсних екологічних сортовипробуваннях та на різних агрофонах, як можливі кандидати для передання нового сорту до Державного сортовипробування.

### Список літератури:

1. Сухоставець А. І., Соловей М. С. Сучасні тенденції розвитку виробництва зерна в Україні та світі. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Економіка і менеджмент*. 2019. № 1. С. 60–66.
2. Belderok B., Mesdag J., Donner D. Bread-making quality of wheat: A Century of Breeding in Europe. Springer Science & Business Media. 2000. Vol. 3. P. 1–416.
3. Henchion M., Hayes M., Mullen A., Fenelon M., Tiwari B. Future protein supply and demand: strategies and factors influencing a sustainable equilibrium. *A review. Foods*. 2017. P. 1–21.
4. Бурлака О. М., Сорочинський Б. В. Біофортифікація сільсько-господарських рослин. *Біотехнологія*. 2010. № 5. С. 31–42.

5. Toma A., Volta U., Auricchio R., Castillejo G., Sanders D.S., Cellier C., Mulder C.J., Lundin K.E.A. European Society for the Study of Coeliac Disease (ESsCD) guideline for coeliac disease and other gluten-related disorders. *United European Gastroenterology Journal*. 2019. Vol. 7(5). P. 583–613.

6. Забарна Ю. В. Понятійно-категорійна сутність глобальної продовольчої безпеки. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Економіка, аграрний менеджмент, бізнес*. 2013. № 181. С. 162–167.

7. Малахова Л. В. Шляхи подолання прихованого голоду як складової глобальної продовольчої проблеми. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія: Міжнародні відносини. Економіка. Країнознавство. Туризм*. 2013. № 2. С. 86–89.

8. Padmanaban S., Zhang P., Hare R.A., Sutherland M.W., Martin A. Pentaploid wheat hybrids: applications, characterisation and challenges. *Front. Plant Sci*. 2017. Vol. 8. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00358>

9. Tabbita F., Lewis S., Vouilloz J.P., Ortega M.A., Kade M., Abbate P.E., Barneix A.J. Effects of the Gpc-B1 locus on high grain protein content introgressed into Argentinean wheat germplasm. *Plant Breed*. 2013. Vol. 132. No. 1. P. 48–52. DOI: <https://doi.org/10.1111/pbr.12011>

10. Каленська С. М., Шутий О. І. Формування продуктивності та якості пшениці твердої ярої залежно від мінерального живлення у Правобережному Лісостепу України. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2016. № 3. С. 19–24.

11. Dorofeev V.F., Udachin R.A., Semenova L.V., Novikova M.V., Gradchaninova O.D., Shitova I.P., Merezhko A.F., Filatenko A.A. Pshenitsy mira. World Wheat. Leningrad: Agropromizdat Publ., 1987. P. 345.

12. Литвиненко М. А. Реалізація генетичного потенціалу, проблеми продуктивності та якості зерна сучасних сортів озимої пшениці. *Збірник наукових праць СГП*. 1996. С. 6–12.

13. Маренич М. М. Характеристика ознак продуктивності озимої пшениці. *Вісник Полтавського державного сільськогосподарського інституту*. 1999. № 3. С. 7–8.

14. Кірчук І. С., Пішта Д. С., Кірчук Г. А. Елементи структури врожаю озимої пшениці в умовах південно-західної частини Степу. *Зберігання і переробка зерна*. 2012. № 7. С. 18–20.

15. Чеботар Г.О., Моцний І.І., Кульбіда М.П., Чеботар С.В. Вплив генів короткостебловості на варіацію ознак лній м'якої озимої пшениці. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія: Біологія*. 2013. № 17. С. 95–102.

## References:

1. Sukhostavets, A. I., & Solovey, M. S. (2019). Suchasni tendentsii rozvytku vyrobnytstva zerna v Ukraini ta sviti [Modern trends in grain production development in Ukraine and the world]. *Visnyk Sumskogo natsionalnogo ahrarnoho*

universytetu. *Seriya: Ekonomika i menedzhment – Bulletin of Sumy National Agrarian University. Series: Economics and Management*, (1), 60–66.

2. Belderok, B., Mesdag, J., & Donner, D. (2000). Bread-making quality of wheat: A century of breeding in Europe. *Springer Science & Business Media*, 3, 1–416.

3. Henchion, M., Hayes, M., Mullen, A., Fenelon, M., & Tiwari, B. (2017). Future protein supply and demand: strategies and factors influencing a sustainable equilibrium. *Foods*, 1–21.

4. Burlaka, O. M., & Sorochinskyi, B. V. (2010). Biofortyfikatsiya silskogospodarskykh roslyn [Biofortification of agricultural plants]. *Biotehnolohiya – Biotechnology*, (5), 31–42.

5. Toma, A., Volta, U., Auricchio, R., Castillejo, G., Sanders, D. S., Cellier, C., Mulder, C. J., & Lundin, K. E. A. (2019). European Society for the Study of Coeliac Disease (ESsCD) guideline for coeliac disease and other gluten-related disorders. *United European Gastroenterology Journal*, 7(5), 583–613.

6. Zabarna, Yu. V. (2013). Ponyatiyno-katehoriyna sutnist globalnoi prodovolchoi bezpeky [Conceptual and categorical essence of global food security]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu biorresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seriya: Ekonomika, ahrarnyi menedzhment, biznes – Scientific Bulletin of National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine. Series: Economics, Agrarian Management, Business*, (181), 162–167.

7. Malakhova, L. V. (2013). Shlyakhy podolannya prykhovanoho holodu yak skladovoi globalnoi prodovolchoi problemy [Ways to overcome hidden hunger as a component of the global food problem]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V.N. Karazina. Seriya: Mizhnarodni vidnosyny. Ekonomika. Krainoznavstvo. Turyzm – Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series: International Relations. Economics. Country Studies. Tourism*, (2), 86–89.

8. Padmanaban, S., Zhang, P., Hare, R. A., Sutherland, M. W., & Martin, A. (2017). Pentaploid wheat hybrids: applications, characterisation, and challenges. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1–11. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00358>

9. Tabbita, F., Lewis, S., Vouilloz, J. P., Ortega, M. A., Kade, M., Abbate, P. E., & Barneix, A. J. (2013). Effects of the Gpc-B1 locus on high grain protein content introgressed into Argentinean wheat germplasm. *Plant Breeding*, 132(1), 48–52. DOI: <https://doi.org/10.1111/pbr.12011>

10. Kalenska, S. M., & Shutii, O. I. (2016). Formuvannya produktyvnosti ta yakosti pshenytsi tverdoi yaroi zalezno vid mineralnoho zhyvlennya u Pravoberezhnomu Lisostepi Ukrainy [Formation of productivity and quality of durum spring wheat depending on mineral nutrition in the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii – Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, (3), 19–24.

11. Dorofeev, V. F., Udachin, R. A., Semenova, L. V., Novikova, M. V., Gradchaninova, O. D., Shitova, I. P., Merezhko, A. F., & Filatenko, A. A. (1987). Pshenitsy mira. World Wheat. Leningrad: Agropromizdat Publ.

12. Lytvynenko, M. A. (1996). Realizatsiya henetychnoho potentsialu, problemy produktyvnosti ta yakosti zerna suchasnykh sortiv ozymoi pshenytsi [Realization of

genetic potential, problems of productivity and quality of grain of modern winter wheat varieties]. *Zbirnyk naukovykh prats SGI – Collection of Scientific Papers of SGI*, 6–12.

13. Marenych, M. M. (1999). Kharakterystyka oznak produktyvnosti ozymoi pshe-nytsi [Characteristics of productivity traits of winter wheat]. *Visnyk Poltavskoho derzhavnoho silskohospodarskoho instytutu – Bulletin of Poltava State Agricultural Institute*, (3), 7–8.

14. Kirchuk, I. S., Pishta, D. S., & Kirchuk, H. A. (2012). Elementy struk-tury vrozhaiu ozymoi pshe-nytsi v umovakh pivdenno-zakhidnoi chastyny Stepu [Yield structure elements of winter wheat in the conditions of the south-western part of the Steppe]. *Zberihannya i pererobka zerna – Grain Storage and Processing*, (7), 18–20.

15. Chebotar, H. O., Motsnyi, I. I., Kulbida, M. P., & Chebotar, S. V. (2013). Vplyv heniv korotkosteblovosti na variatsiyu oznak linii myakoi ozymoi pshe-nytsi [Effect of dwarfing genes on the variation of traits in soft winter wheat lines]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V.N. Karazina. Seriya: Biolohiya – Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series: Biology*, (17), 95–102.