

УДК 57.086.13:633.11:546.214:57.042

Г.В. Коваленко, Т.Ф. Стрибуль, Н.В. Реброва, Н.О. Шевченко*

Проростання насіння пшениці після низькотемпературної обробки або озонування

UDC 57.086.13:633.11:546.214:57.042

G.V. Kovalenko, T.F. Strybul, N.V. Rebrova, N.O. Shevchenko*

Wheat Seed Germination After Low-Temperature Treatment or Ozonation

Реферат: У роботі досліджували вплив передпосівної обробки насіння пшениці озимої сортів Соломія, Верден та Сталева озонуванням або низькими температурами (–20, –40, –80 та –196°C) на параметри його початкового росту. Результати показали стимулюючу дію температур –20 і –80°C на показники динаміки проростання насіння та біометричні показники проростків усіх сортів. У охолодженого до –40°C насіння пшениці озимої практично не спостерігалось змін за показниками його проростання по відношенню до контролю. Охолодження насіння сорту Соломія до –196°C викликало погіршення процесів проростання, призводило до зменшення довжини пагонів, сухої маси паростків і коренів порівняно з контролем. У сортів Верден і Сталева спостерігали подовження кореня та прискорення процесів проростання насіння. Озонування не впливало на динаміку проростання насіння всіх досліджуваних сортів пшениці, крім Сталева, у якої відзначали деяке гальмування проростання. За біометричними показниками в усіх сортів збільшувалася довжина кореня, а у Соломія — суха маса паростків.

Ключові слова: пшениця озима, насіння, низькі температури, озонування, динаміка проростання, біометричні показники.

Abstract: The influence of pre-sowing treatment of Solomiya, Verden and Staleva winter wheat seeds either with ozonation or low temperatures (–20, –40, –80 and –196°C) on their initial growth parameters was under study. The findings demonstrated a stimulating effect of –20 and –80°C on dynamics of seed germination and biometric parameters of seedlings for all the cultivars. The winter wheat seeds cooled down to –40°C showed virtually no changes in their germination rates compared to the control. Cooling down to –196°C worsened the germination of Solomiya seeds, decreasing the shoot length, dry weight of sprouts and roots as compared to the control. Verden and Staleva cultivars revealed the root elongation and accelerated seed germination. Ozonation caused no effect on dynamics of seed germination in all the studied wheat cultivars, except for Staleva, where some inhibition of germination was noted. According to biometric parameters, the root length increased in all the cultivars, and dry weight of sprouts was additionally augmented in Solomiya one.

Key words: winter wheat, seeds, low temperatures, ozonation, germination dynamics, biometric parameters.

Пшениця — найбільш розповсюджена сільськогосподарська культура для задоволення основних харчових потреб людства. З огляду на це отримання високих врожаїв якісного зерна, підтримка його посівних і харчових показників, а також можливість підвищення схожості насіння є нагальною потребою сучасності.

Якість виробів з пшениці залежить від хімічного складу зернин, а кількість білка, цінних мікроелементів і вуглеводів — від сорту та технології вирощування. Тверда і м'яка пшениці мають озимі та ярі форми. Сорти твердої пшениці більш стійкі до несприятливих умов навколишнього середовища (шкідників, хвороб, неоптимальних температур). М'яка пшениця вразливіша до умов вирощування, але більш розповсюджена і має великий попит. Зерно пше-

Wheat is the most widely grown crop used to meet the basic human nutritional needs. Therefore, obtaining high yields of quality grain, maintaining its sowing and nutritional characteristics, as well as the opportunity of increasing seed germination are urgent tasks for today.

The quality of wheat products depends on chemical composition of the grain, whereas the amount of protein, valuable microelements and carbohydrates depends on cultivars and cultivation technology. Durum and soft wheat are available in winter and spring forms. Durum wheat cultivars are more resistant to unfavorable environmental conditions (pests, diseases, suboptimal temperatures). Soft wheat is more vulnerable to growing conditions, but more widespread and in high demand. The grain of durum wheat is floury and

Інститут проблем кріобіології і кріомедицини НАН України, м. Харків, Україна

Institute for Problems of Cryobiology and Cryomedicine of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

*Автор, якому необхідно надсилати кореспонденцію:

вул. Переяславська, 23, м. Харків, Україна 61016;
тел.: (+38 057) 373-74-35, факс: (+38 057) 373-59-52
електронна пошта: shevchenko_nadyusha@ukr.net

*To whom correspondence should be addressed:

23, Pereyaslavka str., Kharkiv, Ukraine 61016;
tel.: +380 57 373 7435, fax: +380 57 373 5952
e-mail: shevchenko_nadyusha@ukr.net

Надійшла 22.02. 2024
Прийнята до друку 27.05.2024

Received February, 22, 2024
Accepted May, 27, 2024

© Institute for Problems of Cryobiology and Cryomedicine of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2024
© Publisher Publishing House 'Akademperiodyka' of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2024

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ниці м'якої — борошністе і розсипчасте. Близько 95% усієї пшениці, що вирощується в світі, — хлібна (*Triticum aestivum L.*).

Покращення посівних якостей насіння пшениці на території України було актуальною проблемою завжди, а особливо зараз, в умовах повномасштабної війни з російською федерацією, коли багато сільськогосподарських земель забруднені або понівечені в результаті бойових дій.

Одними з найважливіших показників посівних якостей насіння вважаються схожість і енергія його проростання. Ці показники характеризують біологічну і господарську цінність насіння, а також суттєво визначають врожайність. У роботі М. Abdoli та співавт. [6] показано вплив водного стресу на проростання зерна двох сортів пшениці, а також зв'язок між лабораторною схожістю, параметрами росту розсади, середнім часом та індексом сили проростання насіння і врожайністю.

Згідно з дослідженням М. Маренич [3] найбільший вплив на формування врожайності має вибір сорту (57%), агротехнічні заходи (близько 12%), а також передпосівна обробка насіння, наприклад, стимуляторами росту (до 9%). Однак це не виключає можливості покращення врожайності за допомогою методів передпосівної обробки насіння.

Існує два типи передпосівної обробки насіння, пов'язаних з його вологістю. Застосування першого (гідропраймінг, обробка осмотично активними речовинами, стимуляторами росту і т. д.) приводить до зміни початкової вологості насіння, другого (проморожування, дія магнітного поля, озонування) її не змінює [13]. На сьогодні відомі методи підвищення схожості та, як наслідок, врожайності різних рослинних культур за допомогою впливу низьких температур на насіння [2, 5, 10, 13, 14]. Так, дослідження дії помірно низьких температур на насіння жита озимого представлені в роботі О. Задорожної та співавт. [2]. Автори оцінювали елементи структури врожаю жита озимого після зберігання насіння протягом 42 місяців за температур 4 і -20°C , вони не спостерігали зміни продуктивності рослини, кількості колосів, їхньої довжини, в той час, як у 38% зразків відмічалось збільшення маси 1000 зернин. Після зберігання в рідкому азоті або в його парах насіння жита озимого та ярового було отримано вищий процент схожості, а також більшу довжину коренів, ніж після зберігання за кімнатної температури. При цьому дослідники не спостерігали змін у характері метилювання ДНК [10]. Передпосівна обробка насіння буряка та томатів рідким азо-

crumbly. About 95% of all wheat grown worldwide is bread wheat (*Triticum aestivum L.*).

Methods of improving the sowing qualities of wheat seeds in Ukraine have always been a topical task, especially now in a full-scale invasion of the Russian Federation, when many agricultural lands are either polluted or damaged due to hostilities.

Germination rate and germination energy are among the most important parameters of seed sowing quality. These indices characterize biological and economic value of seeds and significantly determine future yields. M. Abdoli *et al.* [1] showed the effect of water stress on grain germination of two wheat cultivars, as well as the relationship between laboratory germination, seedling growth parameters, average time and seed vigor index, and the yield.

As reported by M. Marenych [7], the choice of cultivar (57%), agrotechnical measures (about 12%), and pre-sowing seed treatment, with growth stimulants for example, (up to 9%) have the highest impact on yield formation. However, the possibility of yield improving with pre-sowing seed treatments is not excluded.

There are two types of pre-sowing seed treatment related to its moisture content. The use of the first type (hydropriming, treatment with osmotically active substances, growth stimulants, *etc.*) leads to a change in initial moisture content of seeds, the second one (freezing, action of a magnetic field, ozonation) does not affect it [11]. To date, the methods of increasing the germination and, as a result, the yield of various plant crops by exposing seeds to low temperatures are known [6, 10, 11, 12, 17]. For example, O. Zadorozhna *et al.* [17] reported about the impact of moderately low temperatures on winter rye seeds. The authors evaluated the elements of the winter rye yield structure after storing seeds for 42 months at 4 and -20°C . They observed no changes in plant productivity, number of productive ears and their length, while 1000-grain weight was increased in 38% of samples [17]. After storage in liquid nitrogen or its vapors, winter and spring rye seeds showed a higher percentage of germination and longer root length than after storing at room temperature. At the same time, no changes in nature of DNA methylation were observed [6]. Pre-sowing treatment of beet and tomato seeds with liquid nitrogen resulted in yield increase [10, 12].

The use of ozone for crop seed pre-treatment was primarily considered by researchers as an environment-friendly method of disinfecting seeds



том приводила до збільшення врожайності [5, 14].

Застосування озону в практиці передпосівної обробки насіння сільськогосподарських культур дослідники в першу чергу розглядали як екологічний метод знезараження матеріалу від збудників хвороб, однак почали відмічати стимулювання початкового росту та розвитку рослин. Так, у роботі О. Тимошенко [4] обробка насіння пшениці ярої озоні повітряною сумішшю з концентрацією озону від 0,5 до 1,0 г/м³ викликала збільшення висоти проростків і довжини коренів порівняно з контролем, більш високі концентрації озону призводили до пригнічення росту рослин. Дослідження впливу озонування на некондиційне за показником схожості насіння пшениці показало значуще збільшення кількості пророслих зразків [15].

Мета дослідження — визначення впливу передпосівної обробки насіння пшениці низькими температурами або озонуванням на показники проростання насіння.

Матеріали та методи

У досліджах використовували три сорти пшениці озимої м'якої середньо-ранньої групи стиглості: Верден, Соломія і Сталева. Насіння пшениці були отримані з колекції Факультету агрономії та захисту рослин Державного біотехнологічного університету (м. Харків). Усі три сорти відносяться до середньо-ранньої групи стиглості, мають однакову зимостійкість, але різну початкову силу росту.

Досліди проводили протягом 2023 року. Обробці підлягало сухе насіння пшениці 2021 року репродукції, вологість якого після зберігання в зерносховищах була на рівні $(8 \pm 0,5)\%$.

Дослідження впливу дії низьких температур на насіння пшениці перед посівом проводили шляхом 7-добової витримки у морозильних камерах: при -20°C — SAMSUNG RB33J3200SA/UA (Samsung, Республіка Корея), при -40°C — UGUR UCF 10 CF (Ugur, Туреччина), при -80°C — HAIER-DW-86w100J (Haier, Китай). Обробку насіння температурою -196°C здійснювали зануренням у рідкий азот на 4 години. Зразки висівали на 3-ю добу після відтаювання.

Для озонування насіння пшениці масою 30 г обробляли протягом 30 хв озоні повітряною сумішшю з концентрацією озону 1 мг/л. Озон отримували з генератора бар'єрного типу, розробленого в Інституті проблем кріобіології і кріомедицини НАН України (м. Харків) разом з національним науковим центром «Харківсь-

from pathogens, at the same time, this exposure stimulated an initial growth and development of plants. For example, O. Tymoshenko [14] has reported that the spring wheat seed treatment with ozone-air mixture at ozone concentrations ranging from 0.5 g/m³ to 1.0 g/m³ increased the seedling height and root length as compared to the control, higher ozone concentrations during wheat seed treatment inhibited the plant growth. The study of ozonation impact on substandard wheat seeds by germination index showed a significant increase in the number of germinated samples [13].

The research aim was to determine the impact of pre-sowing wheat seed treatment either with low temperatures or ozonation on seed germination.

Materials and methods

Here, we have used three cultivars of soft winter wheat of medium-early maturity group such as: Verden, Solomiya and Staleva. The wheat seeds were obtained from the collection of the Faculty of Agronomy and Plant Protection of the State Biotechnological University (Kharkiv). All three cultivars are of medium-early ripeness, identical in winter hardiness but have different initial seed vigor.

Experiments were carried out during 2023. Dry wheat seeds of 2021 reproduction year, the moisture content of which after storage in granaries was at the level of $(8 \pm 0.5)\%$ were subjected to treatments.

The impact of low temperatures on wheat seeds before sowing was studied by keeping them in freezers for 7 days: at -20°C — SAMSUNG RB33J3200SA/UA (Samsung, Republic of Korea), at -40°C — UGUR UCF 10 CF (Ugur, Turkey), at -80°C — HAIER-DW-86w100J (Haier, China). The cooling of seeds down to -196°C was done by immersing seeds into liquid nitrogen for 4 hrs. To day 3 after thawing, the seeds were sown for germination.

For ozonation, wheat seeds weighing 30 g were treated for 30 min with an ozone-air mixture of 1 mg/l ozone concentration. Ozone was produced from a barrier discharge generator designed at the Institute for Problems of Cryobiology and Cryomedicine of the NAS of Ukraine (Kharkiv) together with the National Scientific Center 'Kharkiv Institute of Physics and Technology'. Oxygen (DSTU 5583-78) was stored in standard oxygen cylinders at a pressure of 150 atm. The ozone concentration in ozone-air mixture was measured spectrophotometrically [2].

Seeds were germinated on filter paper in Petri dishes with 100 seeds each ($n = 9$). The sowing



кий фізико-технічний інститут». Кисень (ДСТУ 5583-78) зберігали у стандартних кисневих балонах під тиском 150 атм. Для вимірювання концентрації озону у озоні повітряній суміші використовували метод спектрофотометрії [1].

Насіння пророщували на фільтрувальному папері в чашках Петрі по 100 шт. у кожній ($n = 9$). Посівні якості насіння пшениці оцінювали за показниками енергії проростання (Епр) та схожості (Сх) за ДСТУ 4138-2002 «Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості». Реєстрували середню довжину пагона і кореня, середню кількість корінців у 20 проростках з кожної чашки, суху масу пагонів і коренів у розрахунку на одну пророслу зернину.

Динамічними показниками були обрані час проростання 50% насіння (T_{50}) [7], середній час проростання — mean generation time (MGT) [7] та індекс проростання — germination index (GI) [16].

Час проростання 50% насіння розраховували за формулою:

$$T_{50} = t_i + \frac{(N+1)/2 - n_i}{n_j - n_i} (t_j - t_i),$$

де N — кінцева загальна кількість пророслого насіння; n_i і n_j — кількість пророслого насіння, починаючи з першої доби до t_i і t_j днів спостереження ($i \geq 1, j \geq 2$ відповідно), за умови, що $n_i < (N+1)/2 < n_j$.

Середній час проростання вираховували згідно з формулою:

$$MGT = \frac{\sum D_n}{\sum n},$$

де n — кількість насіння, пророслого на D_n ; D_n — доба з початку висіву насіння до термінів підрахунку (з першої доби після висіву до появи останнього проростку).

Індекс проростання розраховували за М. Walker-Simmons [15]:

$$GI = (6n_1 + 5n_2 + \dots + 1n_6)/(TN),$$

де n_1, n_2, \dots, n_6 — кількість пророслого насіння на 1, 2–6-у добу пророщування відповідно; 6–1 — коефіцієнти кількості пророслого насіння з 1-ї по 6-у добу відповідно; T — загальна кількість днів пророщування насіння до визначення схожості; N — загальна кількість пророслого насіння в термін визначення схожості.

Статистичну обробку результатів досліджень здійснювали за допомогою програми «PAST Statistic v.3.01» (Університет Осло, Норвегія).

qualities of wheat seeds were evaluated using such parameters as germination energy (GE) and germination rate (GR) according to DSTU 4138-2002 'Seeds of agricultural crops. Methods of determining quality'. The average length of shoots and roots, number of roots in 20 seedlings from each Petri dish, and the dry weight of shoots and roots per one germinated grain were determined.

As dynamic parameters of wheat seed germination, we selected the germination time of 50% of seeds (T_{50}) [3], mean generation time (MGT) [3] and germination index (GI) [14].

The germination time of 50% of the seeds was calculated according to the formula:

$$T_{50} = t_i + \frac{(N+1)/2 - n_i}{n_j - n_i} (t_j - t_i),$$

where N is the final total number of germinated seeds, n_i and n_j are the number of germinated seeds from the first day of observation to days t_i and t_j ($i \geq 1, j \geq 2$, respectively), if the condition is met.

The mean generation time of seeds was calculated according to the formula:

$$MGT = \frac{\sum D_n}{\sum n},$$

where n is the number of seeds germinated per day D_n ; D_n is the day from the beginning of sowing seeds to day of counting (from the first day after sowing to the last seedling appeared).

The GI was calculated according to M. Walker-Simmons [14]:

$$GI = (6n_1 + 5n_2 + \dots + 1n_6)/(TN),$$

where n_1, n_2, \dots, n_6 are the number of germinated seeds on days 1, 2–6 of germination, respectively; 6–1 are the coefficients of germinated seeds number from days 1 up to 6, respectively; T is the total number of days of seed germination before measuring the germination rate; N is the total number of germinated seeds on the day of measuring the germination rate.

These findings were statistically processed using the 'PAST Statistic v.3.01' software (University of Oslo, Norway). The mean value and standard deviation ($M \pm \sigma$) were determined. Tukey's test was used to assess the significant difference between indices. The difference between samples was considered significant at $p \leq 0.05$.

Results and discussion

All the studied wheat cultivars showed high rates of germination. For examples, GE and GR



Визначали середнє значення та стандартну похибку ($M \pm \sigma$). Значущість різниці між показниками оцінювали за Тьюкі-тестом. Різницю між вибірками вважали значущою при $p \leq 0,05$.

Результати та обговорення

Усі досліджені сорти пшениці показали високі показники проростання. Так, Епр і Сх для сортів Верден і Соломія в контрольних варіантах були на рівні від 92 до 95%, а для Сталева — наближались до 100% (табл. 1–3). Після дії досліджуваних чинників передпосівної обробки насіння за показниками Епр та Сх сорти Верден і Соломія не відрізнялися один від одного й від контролю в межах похибки вимірювання. Єдине виключення спостерігали в варіанті озонування насіння сорту Верден, де Епр і Сх були значуще вищими за контроль і за всі інші варіанти досліду (див. табл. 1, 2).

Найбільш чутливими до дії застосованих чинників виявилися показники довжини кореня пшениці, сухої маси проростків. Довжина пагона та кількість корінців — найбільш стабільні показники проростання насіння після дії низьких температур та озонування (див. табл. 1–3).

Переважає більшість досліджених способів передпосівної обробки мала стимулюючу дію на показники проростання насіння пшениці. Так, майже у всіх трьох сортів довжина кореня і суха маса проростків перевищувала контрольні показники. Виключеннями стали температура -40°C , після охолодження до якої всі біометричні показники проростків не відрізнялись від контрольних, і -196°C за якої довжина пагона зменшувалася в усіх досліджених сортах (див. табл. 1–3). Найбільш стимулюючими виявилися температури -20 та -80°C , після дії яких отримані показники довжини пагона та кореня, сухої маси проростків були значуще вищими за контрольні значення (див. табл. 1–3).

Результати визначення показників динаміки проростання насіння пшениці (T_{50} , MGT, GI) продемонстрували ефективність досліджуваних чинників на ріст та в більшості випадків корелювали з морфометричними даними.

Аналіз значень T_{50} , який характеризує дружність та терміни появи сходів показав ефективність охолодження насіння за -20 , -40 та -80°C у сорту Верден, за -80°C у сорту Соломія, за -80 і -196°C у сорту Сталева (рис. 1).

Теоретично результати MGT повинні повторювати тенденцію залежності T_{50} від дії різних чинників на насіння. У нашому експерименті час проростання насіння сорту Верден після дії -80 та -196°C був менший за контрольний,

for Verden and Solomiya cultivars in the control variants were between 92 to 95%, and for Staleva they were close to 100% (Tables 1–3). After exposure to the studied factors of pre-sowing seed treatment, the Verden and Solomiya cultivars did not differ from each other and from the control within the measurement standard deviation in terms of GE and GR. The variant of ozonation of Verden wheat seeds was the only exception, where GE and GR were significantly higher than the control and all other experimental variants for these two cultivars (see Tables 1, 2).

Parameters of wheat root length and dry weight of seedlings occurred to be the most sensitive to the applied exposures. The shoot length and root number are the most stable indices of seed germination after exposure to low temperatures and ozonation (see Tables 1–3).

The most of the studied factors of pre-sowing treatment showed a stimulating effect on the wheat seed germination indices. For example, the root length and dry weight of seedlings exceeded the control values for almost all three cultivars. The exceptions were the temperature of -40°C , after cooling to which all biometric parameters of seedlings did not differ from the control ones, and that of -196°C , where the shoot length decreased for all the studied cultivars (see Tables 1–3). The most stimulating temperatures occurred to be -20 and -80°C , after which the obtained values of shoot and root length, dry weight of seedlings were significantly higher than the control values (see Tables 1–3).

The results of determining the parameters of wheat seed germination dynamics (T_{50} , MGT, GI) demonstrated the effectiveness of the studied exposures on seed growth and in most cases were correlated with morphometric data.

The analysis of T_{50} , specific for seedling vigor and terms, revealed the efficiency of cooling down to -20 , -40 and -80°C in Verden cultivar, at -80°C in Solomia, and at -80 and -196°C in Staleva one (Fig. 1).

In theory, the results of MGT should repeat the trend of T_{50} dependence on the impact of various factors on seeds. In our experiment, Verden seeds after exposure to -80 and -196°C had a shorter germination time than the control, i. e. the stimulation occurred, but in Solomiy seeds this index was at the level of control in all the experimental variants. Staleva seeds after either seed ozonation or cooling down to -20 and -40°C were characterized by MGT increase vs. the control, i. e. the germination process was slowed down, whereas the immersion of samples into liquid nitrogen accelerated it (Fig. 2).



Таблиця 1. Показники проростання насіння пшениці сорту Верден
Table 1. Parameters of wheat seed germination of Verden cultivar

Варіант обробки Treatments	Епр, % GE, %	Сх, % GR, %	Довжина, см Length, cm		Кількість корінців, шт. Number of roots, pcs	Суха маса, г × 10 ⁻³ Dry weight, g × 10 ⁻³
			Пагона Shoot	Коріння Root		
Контроль Control	94,3 ± 1,8	95,6 ± 2,2	8,3 ± 0,6	11,1 ± 0,9	4,9 ± 0,3	13,5 ± 1,0
Озонування Ozonation	98,1 ± 0,0*	99,4 ± 1,1*	9,1 ± 0,7	13,7 ± 1,4*	4,7 ± 0,5	13,9 ± 1,0
-20 °С	93,1 ± 1,0	94,3 ± 0,0	9,5 ± 0,3*	14,9 ± 0,9*	5,2 ± 0,4	15,9 ± 0,6*
-40 °С	93,7 ± 2,8	95,0 ± 4,7	8,4 ± 0,4	9,0 ± 1,2	4,9 ± 0,3	15,0 ± 0,7
-80 °С	91,8 ± 2,8	95,6 ± 1,1	9,7 ± 0,7*	13,0 ± 0,9*	5,0 ± 0,0	15,4 ± 1,1
-196 °С	94,3 ± 1,8	94,3 ± 1,8	7,3 ± 0,5	14,2 ± 1,4*	5,0 ± 0,0	12,8 ± 0,9

Примітка: * — різниця значуща по відношенню до контрольних значень, $p \leq 0,05$.

Note: * – difference is significant with respect to the control values, $p \leq 0.05$.

тобто відбувалася стимуляція, у насіння сорту Соломія цей показник у всіх досліджуваних варіантах був на рівні контролю. Для насіння сорту Сталева після озонування або охолодження за -20 та -40 °С було характерним збільшення досліджуваного показника відносно контролю, тобто уповільнення процесу проростання, а після занурення зразків у рідкий азот — його пришвидшення (рис. 2).

In Verden seeds, after pre-sowing exposure to these factors, the GI value remained unchanged as compared to the control. This also refers to Solomiya cultivar, excluding the variant of cooling down to -80 °С, for which the seed GI exceeded the control (see Table 2). The highest result was obtained for Staleva seeds, i. e. in variants of seed pre-sowing cooling down to -80 and -196 °С, the GI significantly exceeded the control data (Fig. 3).

Таблиця 2. Показники проростання насіння пшениці сорту Соломія
Table 2. Parameters of wheat seed germination of Solomiya cultivar

Варіант обробки Treatments	Епр, % GE, %	Сх, % GR, %	Довжина, см Length, cm		Кількість корінців, шт. Number of roots, pcs	Суха маса, г × 10 ⁻³ Dry weight, g × 10 ⁻³
			Пагона Shoot	Коріння Root		
Контроль Control	92,5 ± 3,7	95,6 ± 2,2	7,6 ± 0,4	7,4 ± 0,8	4,5 ± 0,5	11,4 ± 0,6
Озонування Ozonation	93,7 ± 2,1	95,6 ± 2,8	7,9 ± 0,4	10,4 ± 0,5*	5,1 ± 0,8	13,0 ± 0,6*
-20 °С	91,8 ± 2,1	92,5 ± 1,8	8,4 ± 0,5	10,8 ± 0,5*	4,7 ± 0,7	14,0 ± 0,6*
-40 °С	93,1 ± 2,8	94,3 ± 5,0	7,2 ± 0,3	7,4 ± 0,5	4,5 ± 0,7	11,0 ± 0,5
-80 °С	92,5 ± 3,2	93,7 ± 2,8	8,7 ± 0,6*	11,3 ± 0,6*	5,3 ± 1,0	14,8 ± 0,9*
-196 °С	94,9 ± 1,1	96,2 ± 1,9	6,2 ± 0,5*	7,7 ± 0,6	4,8 ± 0,4	8,0 ± 0,6*

Примітка: * — різниця значуща по відношенню до контрольних значень, $p \leq 0,05$.

Note: * – difference is significant with respect to the control values, $p \leq 0.05$.



Таблиця 3. Показники проростання насіння пшениці сорту Сталева
Table 3. Parameters of wheat seed germination of Staleva cultivar

Варіант обробки Treatments	Епр, % GE, %	Сх, % GR, %	Довжина, см Length, cm		Кількість корінців, шт. Number of roots, pcs	Суха маса, г × 10 ⁻³ Dry weight, g × 10 ⁻³
			Пагона Shoot	Коріння Root		
Контроль Control	100	100	9,6 ± 0,7	11,0 ± 1,1	4,9 ± 0,3	15,4 ± 1,2
Озонування Ozonation	98,7 ± 1,1	99,4 ± 0,0	10,0 ± 0,6	16,9 ± 1,1*	4,9 ± 0,3	16,9 ± 0,9
-20°C	100	100	10,3 ± 0,6	15,8 ± 1,3*	4,9 ± 0,3	18,0 ± 1,1*
-40°C	98,7 ± 1,1	100	9,1 ± 0,5	11,9 ± 0,8	5,1 ± 0,3	15,8 ± 0,8
-80°C	99,4 ± 1,1	99,4 ± 1,1	9,5 ± 0,3	15,8 ± 1,0*	5,2 ± 0,4	19,0 ± 0,9*
-196°C	100	100	8,4 ± 0,5	14,7 ± 1,2*	5,2 ± 0,4	14,8 ± 1,0

Примітка: * — різниця значуща по відношенню до контрольних значень, $p \leq 0,05$.

Note: * – difference is significant with respect to the control values, $p \leq 0.05$.

У насіння сорту Верден після передпосівної обробки досліджуваними чинниками величина GI не відрізнялася від контрольних показників. Це стосується і сорту Соломія за виключенням варіанта охолодження до -80°C, для якого GI перевищував контроль (див. табл. 2). Найкращий результат було отримано для насіння сорту Сталева: у варіантах передпосівного охолодження за -80 та -196°C інтенсивність проростання значуще перевищувала дані контролю (рис. 3).

Аналіз кожного окремого способу обробки насіння пшениці дозволяє більш критично підходити до вибору найефективніших методів підготовки до посіву з метою отримання кращих показників схожості та врожайності.

Усі три сорти пшениці після обробки насіння озоноповітряною сумішшю відзначалися збільшенням показників довжини кореня порівняно з контролем: на 23,4% для Верден, на 40,5% для Соломія та на 53,6% для Сталева (див. табл. 1–3). Сорт Соломія, який мав найменші біометричні показники в контролі, відреагував на озонування збільшенням сухої маси паростків і коренів на 14,0% (див. табл. 2). Озо-

The analysis of each individual factor of pre-sowing treatment enables a more thorough selection of the most efficient methods of wheat seed preparation for sowing in order to obtain higher rates of germination and yield.

All three wheat cultivars after seed treatment with ozone-air mixture were characterized by higher root length compared to the control: by 23.4, 40.5 and 53.6% for Verden, Solomiya and Staleva, respectively (see Tables 1–3). Solomiya cultivar, which had

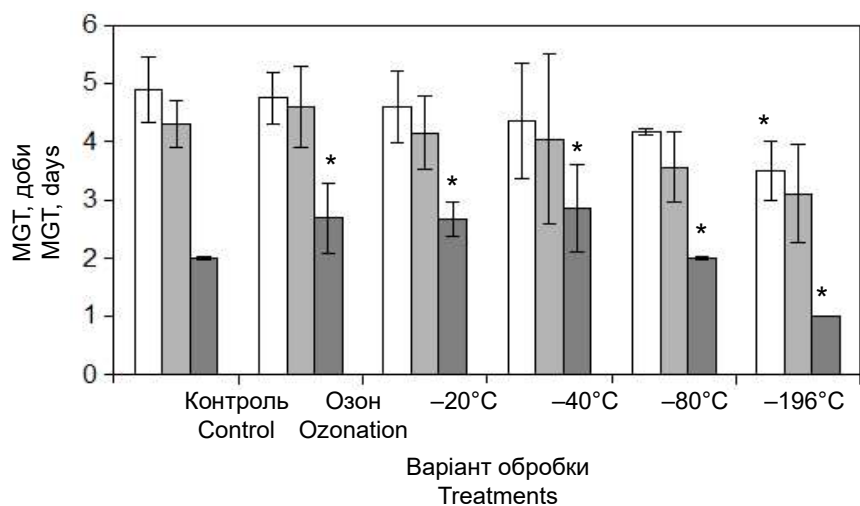


Рис. 1. Показник MGT насіння пшениці озимої після дії низьких температур або озоноповітряної суміші: □ — Верден, ■ — Соломія, ■ — Сталева; * — різниця значуща по відношенню до контрольних значень, $p \leq 0,05$.

Fig. 1. MGT of winter wheat seeds after exposure to low temperatures or ozone-air mixture: □ – Verden, ■ – Solomiya, ■ – Staleva; * – difference is significant compared to the control values, $p \leq 0.05$.

нування насіння приводило до значущого підвищення схожості насіння сорту Верден порівняно з контролем. Щодо динаміки проростання, то всі показники озонованого насіння не відрізнялись від контролю за одним виключенням: MGT насіння сорту Сталева був більшим за контроль (табл. 3).

Експозиція за -20°C стимулювала біометричні показники проростання насіння всіх досліджуваних сортів. Експозиція зразків за температури -20°C приводила до збільшення довжини кореня (на 34,2% — у Верден, на 45,9% — у Соломія, на 43,6% — у Сталева), сухої маси паростків і коренів в усіх трьох досліджуваних сортах (на 17,7, 22,8, 16,9%, відповідно) (див. табл. 1–3). Крім того, у сорту Верден спостерігали збільшення довжини пагонів порівняно з контролем на 14,0% (див. табл. 1). Не відмічали різниці у динаміці проростання за показниками T_{50} , MGT, GI по відношенню до контролю, за виключенням прискорення проростання насіння сорту Верден (див. рис. 1) і гальмування — у сорту Сталева (див. рис. 2).

Охолодження до -40°C жодним чином не впливало на проростання насіння трьох сортів пшениці. Усі досліджувані біометричні показники (довжина пагона, довжина кореня, суха маса паростків і коренів), а також Епр і Сх не відрізнялися від контрольних значень (див. табл. 1–3). Динаміка проростання насіння сортів Верден та Сталева була схожа з експозицією за -20°C (див. рис. 1, 2).

Охолодження до -80°C виявилось найбільш стимулюючим щодо динаміки проростання та біометричних показників проростків пшениці всіх досліджуваних сортів. Спостерігали подовження коренів на 17,1, 52,7 і 43,6% у Верден, Соломія та Сталева відповідно (див. табл. 1–3). У сортів Верден і Соломія довжина пагона збільшилася на 17,0 та 23 % (див. табл. 1, 2), у Соломія та Сталева суха маса паростків і коренів — на 14,0 та 23,4% відповідно порівняно з контролем (див. табл. 2, 3). Для усіх сортів показник T_{50} значуще зменшувався порівняно з контролем (див. рис. 1). Відзначали зменшення значення MGT для сорту Верден (див. рис. 2),

the lowest biometric parameters in the control, responded to ozonation by increasing the dry weight of sprouts and roots by 14.0% (see Table 2). Seed ozonation significantly improved the germination in Verdun cultivar as compared to the control. As for the dynamics of germination, all parameters of ozonated seeds did not differ from the control with one exception: MGT in Staleva seeds was higher than in the control (Table 3).

Cooling down to -20°C was the most stimulating for biometric parameters of seed germination for

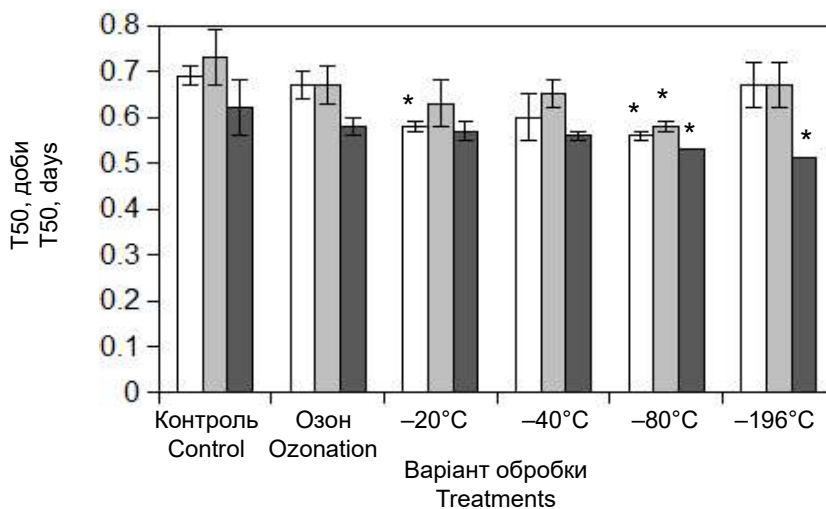


Рис. 2. Показник T_{50} насіння пшениці озимої після дії низьких температур або озоноповітряної суміші: □ — Верден, ■ — Соломія, ■ — Сталева; * — різниця значуща по відношенню до контрольних значень, $p \leq 0,05$.

Fig. 2. T_{50} of winter wheat seeds after exposure to low temperatures or ozone-air mixture: □ — Verden, ■ — Solomiya, ■ — Staleva; * — difference is significant compared to the control values, $p \leq 0.05$.

all the studied wheat cultivars. Sample exposure at -20°C resulted in root length growth (by 34.2, 45.9 and 43.6% for Verden, Solomiya and Staleva, respectively) and increase in dry weight of sprouts and roots in all three studied cultivars (by 17.7, 22.8 and 16.9%, respectively) (see Tables 1–3). In addition, Verden cultivar showed shoot length growth by 14.0% compared to the control (see Table 1). No differences were observed in dynamics of germination in terms of T_{50} , MGT, GI as compared to the control, except for acceleration of germination in Verden seeds (see Fig. 1) and inhibition in Staleva ones (see Fig. 2).

Cooling down to -40°C caused no impact on germination parameters for three wheat seed cultivars. All the studied biometric indices, *i. e.* shoot and root length, dry weight of sprouts and roots, as well as GE and GR did not differ from the control samples (see Tables 1–3). The dynamics of germination of Verden and Staleva



GI — для Соломія та Сталева (див. рис. 3).

Охолодження до -196°C приводило до уповільнення процесів проростання насіння сорту Соломія. Спостерігали зменшення довжини пагонів (на 18,4%), сухої маси пагоростків і коренів (на 29,8%) в порівнянні з контролем (див. табл. 2). У сортів Верден і Сталева відзначали подовження кореня на 27,9 і 33,6% відносно контролю відповідно (див. табл. 1, 3). Відмічали позитивний вплив витримки в рідкому азоті на динаміку проростання насіння сорту Сталева за усіма досліджуваними показниками (T_{50} , MGT, GI) та пришвидшення MGT у сорту Верден.

Можемо припустити, якщо передпосівна обробка насіння пшениці низькими температурами або озонповітряною сумішшю викликала стимуляцію початкового розвитку та росту насіння, то надалі вона також реалізується в збільшенні врожайності. У роботі М. Abdoli та співавт. [6] було проведено дослідження водного дефіциту на проростання насіння двох сортів пшениці, показано значний вплив стресу як на лабораторну схожість, так і на врожайність, для стійкішого зразка була характерна більша врожайність. Водний стрес значно впливав на Сх насіння, MGT та суху масу пагоростків, при цьому найнижчому відсотку схожості та біометричним показникам відповідала найвища величина MGT. У наших експериментах після впливу низьких температур на насіння пшениці виявлено інші співвідношення між показниками динаміки його проростання.

Ступінь стресу, який зазнало насіння після охолодження, залежав від температурних інтервалів. Наприклад, температура -20°C є такою, до якої насіння більшості видів, зокрема пшениці хлібної, має генетично детерміновану стійкість, тому що еволюція таких рослин проходила за наявності сезонних змін, коли спостерігалось проморожування ґрунту. Пшениця хлібна (*Triticum aestivum*) — це аллогексаплоїдний вид з геномом ВВААDD, який утворився в результаті гібридизації між окультуреним тетраплоїдним предком з геномом ВВАА та *Aegilops tauschii*, диплоїдним донором субгену D. Вважається, що саме *A. tauschii* і дозво-

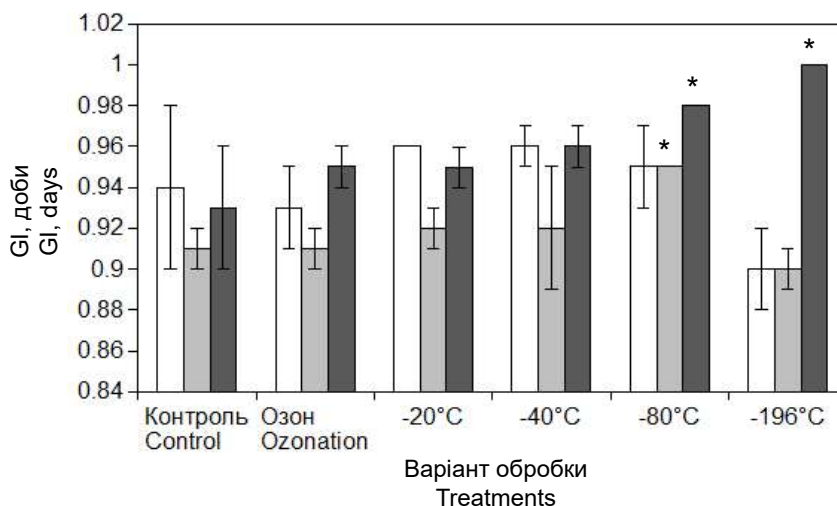


Рис. 3. Показник GI насіння пшениці озимої після дії низьких температур або озонповітряної суміші: □ — Верден, ■ — Соломія, ■ — Сталева; * — різниця значуща по відношенню до контрольних значень, $p \leq 0,05$.

Fig. 3. GI of winter wheat seeds after exposure to low temperatures or ozone-air mixture: □ – Verden, ■ – Solomiya, ■ – Staleva; * – difference is significant compared to the control values, $p \leq 0.05$.

seeds was similar to the exposure at -20°C (see Figs. 1, 2).

Cooling down to -80°C occurred to be the most stimulating for dynamics of germination and biometric parameters of wheat seedlings of all the studied cultivars. In Verden, Solomiya and Staleva cultivars, the root elongation by 17.1, 52.7 and 43.6%, respectively, was observed (see Tables 1–3). In Verden and Solomiya, the shoot length increased by 17.0 and 23 % (see Table 1–3), and in Solomiya and Staleva, the dry weight of sprouts and roots augmented by 14.0 and 23.4% vs. the control (Table 2, 3). For all the studied cultivars, the T_{50} value was significantly decreased as compared to the control (see Fig. 1). The MGT was reduced in Verden (see Fig. 2), and GI – in Solomiya and Staleva cultivars.

Cooling to -196°C slowed down seed germination in Solomiya cultivar. A decrease in shoot length and dry weight of shoots and roots (by 18.4 and 29.8%, respectively) compared to the control was observed (see Table 2). As for Verden and Staleva, the root was elongated by 27.9 and 33.6% relative to the control, respectively (see Tables 1, 3). A positive effect of exposure in liquid nitrogen on germination dynamics by all the studied parameters (T_{50} , MGT, GI) was seen in Staleva seeds, and the MGT was accelerated in Verden.

We can assume that if pre-sowing treatment of wheat seeds either with low temperatures or ozone-air mixture stimulated an initial development and growth of seeds, then it will be also realized in yield growth. M. Abdoli *et al.* [1] have



лив ареалу гексаплоїдної пшениці поширитись у Північну Європу (аж до Фінляндії з її суровими зимами) [9]. Відомо, що реакція будь-якого живого організму на стрес помірної інтенсивності проявляється в мобілізації додаткових «сплячих» ресурсів генома на захист від стресу, які в процесі проростання насіння інтенсифікуються. Зокрема це стосується експресії генів дегідринів — однієї з мультиродин стресових білків, які виробляються у відповідь на холод чи посуху, їхній склад може бути різним та залежить від багатьох чинників. Ці білки спроможні знижувати інтенсивність окиснювальних процесів і пошкодження мембран внаслідок перекисного окиснення ліпідів зі збереженням цілісності клітин [19].

За дії температур -80 і -196°C насіння відчуває стрес більшої «глибини», за цих умов можуть активніше відбуватись експресія інших видів стресових білків, наприклад білків теплового шоку [13] або антифризних білків [18]. Можемо припустити, що стимуляція початкового росту насіння пшениці після низькотемпературної експозиції відбувається за рахунок експресії таких сполук.

Дія температури -40°C менш за інші відобразилася на біометричних і динамічних показниках проростання насіння пшениці. Стосовно даного факту ми не маємо жодного припущення. Можливо така температура впливає не так сильно, як більш низькі, але й не настільки природно, як -20°C .

У наших дослідженнях щодо впливу озонування на проростання насіння пшениці показано збільшення довжини коренів та сухої маси проростків. У роботі К. Oracz та співавт. [11] стимулююча дія озону на проростання насіння пояснюється тим, що озонування викликає підвищення концентрації вуглецю в середовищі, вмісту активних форм кисню та продуктів перекисного окиснення, які приводять до порушення спокою насіння. За думкою деяких авторів [8, 17] озонування також може викликати вироблення етилену, який індукує розпад абсцизової кислоти (гормону спокою насіння), що сприяє пришвидшенню проростання насіння.

Висновки

Передпосівна обробка насіння сортів пшениці озимої Верден, Соломія і Сталева з різними початковими показниками росту низькими температурами або озоноповітряною сумішшю показала наступне:

1. Охолодження до -80°C має найбільш стимулюючий вплив на динаміку проростання та

studied the impact of water deficit on seed germination in two wheat cultivars, and showed a significant effect of stress on both laboratory germination and yield, the more resistant sample was characterized by higher yield. Water stress significantly affected the seed GR, MGT and dry weight of seedlings, at the same time the lowest percentage of seed germination and biometric parameters of seedlings corresponded to the highest MGT [1]. Our experiments with low temperature impact on wheat seeds revealed slightly different correlations between seed germination parameters.

The degree of stress that seeds underwent after cooling depended on temperature ranges. For example, -20°C is the temperature to which seeds of most species, including bread wheat, have genetically determined resistance, because the evolution of these plants proceeded under seasonal changes, when soil freezing was observed. Bread wheat (*Triticum aestivum*) is an allohexaploid species with the BBAADD genome, which resulted from hybridization between a cultivated tetraploid ancestor with BBAA genome and *Aegilops tauschii*, a diploid donor of the D subgene. Namely *A. tauschii* is believed to have enabled the spread of hexaploid wheat to Northern Europe (as far as Finland with its harsh winters) [5]. It is known that the response of any living organism to moderate stress is manifested in mobilization of additional 'dormant' genome resources to protect against stress, which are intensified during seed germination. This applies in particular to the expression of dehydrin genes, one of the multi-family stress proteins, a group of proteins with a large number of charged amino acids, produced in response to cold or drought, and whose composition can vary and depends on many factors. These proteins are able to reduce the intensity of oxidative processes in cells and membrane damage due to lipid peroxidation, while preserving cell integrity [19].

At -80 and -196°C , seeds are more deeply stressed, and under these conditions other types of stress proteins, such as heat shock proteins [9] or antifreeze proteins [18] may be more actively expressed here. The stimulation of initial growth of wheat seeds after low-temperature exposure may be assumed to proceed due to the expression of these proteins.

As for -40°C , which affected the biometric and dynamic parameters of wheat seed germination less than other temperatures, we do not have any assumptions here. Its impact is likely to be less strong as that of lower temperatures, but not as natural as -20°C .



біометричні показники проростків пшениці всіх досліджуваних сортів.

2. Експозиція насіння досліджуваних сортів пшениці озимої за температури -20°C приводить до значущого покращення посівних якостей насіння порівняно з контролем. При цьому така стимуляція меншою мірою впливає на динамічні показники насіння, яке проростає, порівняно з -80°C .

3. У насіння пшениці, охолодженого до -40°C , практично не спостерігається змін показників проростання відносно контролю.

4. Охолодження насіння сорту Соломія до -196°C призводить до сповільнення процесів його проростання, зменшення довжини пагонів, сухої маси паростків і коренів порівняно з контролем. Спостерігається подовження кореня у сортів Верден і Сталева та прискорення процесів проростання.

5. Обробка насіння пшениці озоноповітряною сумішшю — єдиний з усіх варіантів передпосівної обробки, який приводить до підвищення показників Епр і Сх у сорту Верден. Озонування не впливає на динаміку проростання насіння всіх досліджуваних сортів пшениці, крім Сталева, у якої відбувається деяке гальмування проростання. У всіх сортів збільшується довжина кореня, а у Соломія — ще й суха маса паростків.

Література

1. Бобков ЮВ. Малогабаритний переносний індикатор-вимірювач концентрації озону. Механіка гіроскопічних систем. 2018; (36): 70–9.
2. Задорожна ОА, Єгоров ДК. Вплив низькотемпературних режимів зберігання насіння озимого жита на його врожайні ознаки. Проблеми кріобіології і кріомедицини. 2022; 32(2): 111–20.
3. Маренич ММ. Закономірності формування врожайності пшениці озимої в умовах нестійкого зволоження. Вісник Харківського національного аграрного університету. Серія: Рослинництво, селекція і насінництво, плодоовочівництво і зберігання. 2018; (2): 125–33.
4. Тимошенко ОП. Особливості розвитку рослин пшениці ярої за передпосівної обробки насіння озono-повітряною сумішшю. Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків. 2013; 17 (1): 461–5.
5. Шевченко НО, Коваленко ГВ, Баштан НО, та ін. Вплив фізичних факторів передпосівної обробки насіння буряка столового сорту Дій на посівну якість і врожайність. Проблеми кріобіології і кріомедицини. 2022; 32(3): 183–95.
6. Abdoli M, Saeidi M, Jalali-Honarmand S, et al. The role of current photosynthesis on grain yield formation, some

Our studies of ozonation impact on wheat seed germination also showed an increase in root length and dry weight of seedlings. K. Oracz *et al.* [8] explained a stimulating effect of ozone on seed germination by the fact that ozonation raised the carbon concentration in the medium, reactive oxygen species and peroxidation products, which could break seed dormancy. In addition, some authors [4, 16] believe that ozonation is able to cause the ethylene production, which may induce the breakdown of abscisic acid, a seed dormancy hormone, and thus promoting the acceleration of seed germination.

Conclusions

Seed pretreatment with low temperatures or ozone-air mixture for Verden, Solomiya and Staleva winter wheat cultivars with different initial growth rates showed the following:

1. Cooling down to -80°C occurred to be the most stimulating for germination dynamics and biometric parameters of wheat seedlings for all the studied cultivars.

2. The exposure of winter wheat seeds of the studied cultivars at -20°C significantly improved the sowing qualities of seeds as compared to the control. But this stimulation affected to a lesser extent the dynamic indices of germinating seeds as compared to -80°C .

3. Wheat seeds cooled down to -40°C revealed virtually no changes in germination parameters as compared to the control.

4. Cooling down to -196°C slowed down the seed germination of Solomiya cultivar, by decreasing the shoot length, dry weight of seedlings and roots as compared to the control. In Verden and Staleva, the root elongation and acceleration of germination were observed.

5. The wheat seed treatment with ozone-air mixture was the only option of all pre-sowing treatments, which improved the GE and GR parameters in Verden cultivar. The ozonation caused no effect on seed germination dynamics in all the studied wheat cultivars, except for Staleva, where some inhibition of germination was seen. Stimulation by ozonation was observed by biometric parameters, *i. e.* the root length increased in all the cultivars, and dry weight of seedlings was additionally augmented in Solomiya.

References

1. Abdoli M, Saeidi M, Jalali-Honarmand S, et al. The role of current photosynthesis on grain yield formation, some



- agronomic characteristics and germination traits in two bread wheat cultivars under terminal drought stress condition. *IJACS*. 2013; 5: 1585–94.
7. Coolbear P, Francis A, Grierson D. The effect of low temperature pre-sowing treatment on the germination performance and membrane integrity of artificially aged tomato seeds. *J Exp Bot*. 1984; 35: 1609–17.
 8. Emberson LD, Pleijel H, Ainsworth EA, et al. Ozone effects on crops and consideration in crop models. *Eur J Agron*. 2018; 100: 19–34.
 9. Levy AA, Feldman M. Evolution and origin of bread wheat. *Plant Cell*. 2022; 34(7): 2549–67.
 10. Lu J, Greene S, Reid S, et al. Phenotypic changes and DNA methylation status in cryopreserved seeds of rye (*Secale cereale* L.) *Cryobiology*. 2018; 82: 8–14.
 11. Oracz K, Bouteau HEM, Farrant JM, et al. ROS production and protein oxidation as a novel mechanism for seed dormancy alleviation. *Plant J*. 2007; 50: 452–65.
 12. Radkova M, Vítámvás P, Sasaki K, Imai R. Development- and cold-regulated accumulation of cold shock domain proteins in wheat. *Plant Physiol Biochem*. 2014; 77: 44–8.
 13. Shevchenko N, Lialiuik O, Stribul T, Ivchenko, T. Influence of seed priming techniques on seedling establishment and yield of asparagus hybrids. *Biol Life Sci Forum*. [Internet]. 2021 [cited 2024 May 24]; 4(1): 31. Available from: <https://www.mdpi.com/2673-9976/4/1/31>
 14. Shevchenko N, Miroshnichenko T, Mozgovska A, et al. Field performance of cryopreserved seed-derived tomato plants and post-thaw survival of viral-infected meristems. *Acta Agric Slov*. 2022; 118(4): 1–8.
 15. Sivaranjani S, Prasath VA, Pandiselvam R, et al. Recent advances in applications of ozone in the cereal industry. *LWT*. [Internet]. 2021 Jul [cited 2023 Dec 17]; 146: 111412. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002364382100565X>
 16. Walker-Simmons M. Enhancement of ABA responsiveness in wheat embryos by high temperature. *Plant Cell Environ*. 1988; 11: 769–775.
 17. Waskow A, Howling A, Furno I. Mechanisms of plasma-seed treatments as a potential seed processing technology. *Front Phys* [Internet] 2021 Apr 14 [cited 17.12.2023]; 9: 617345. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2021.617345/full>
 18. Zhang C, Zhang H, Wang L, Zhang J, Yao H. Purification of antifreeze protein from wheat bran (*Triticum aestivum* L.) based on its hydrophilicity and ice-binding capacity. *J Agric Food Chem*. 2007; 55(19): 7654–8.
 19. Zhang D, Yang T, Ren L. Y2SK2- and SK3-type dehydrins from *Agapanthus praecox* act as protectants to improve plant cell viability during cryopreservation. *PCTOC*. 2021; 144: 271–9.
 - agronomic characteristics and germination traits in two bread wheat cultivars under terminal drought stress condition. *IJACS*. 2013; 5: 1585–94.
 2. Bobkov YuV. [Compact portable indicator-meter of ozone concentration]. *Mechanics of gyroscopic systems*. 2018; (36): 70–9. Ukrainian.
 3. Coolbear P, Francis A, Grierson D. The effect of low temperature pre-sowing treatment on the germination performance and membrane integrity of artificially aged tomato seeds. *J Exp Bot*. 1984; 35: 1609–17.
 4. Emberson LD, Pleijel H, Ainsworth EA, et al. Ozone effects on crops and consideration in crop models. *Eur J Agron*. 2018; 100: 19–34.
 5. Levy AA, Feldman M. Evolution and origin of bread wheat. *Plant Cell*. 2022; 34(7): 2549–67.
 6. Lu J, Greene S, Reid S, et al. Phenotypic changes and DNA methylation status in cryopreserved seeds of rye (*Secale cereale* L.) *Cryobiology*. 2018; 82: 8–14.
 7. Marenych M.M. [The conformities to natural laws of winter wheat yield formation under the conditions of unstable moistening]. *Bulletin of Kharkiv National Agricultural University named after V.V. Dokuchayev. Series “Crop growing, selection and seed production, fruit and vegetable growing”* 2018; (2): 125–33. Ukrainian.
 8. Oracz K, Bouteau HEM, Farrant JM, et al. ROS production and protein oxidation as a novel mechanism for seed dormancy alleviation. *Plant J*. 2007; 50: 452–65.
 9. Radkova M, Vítámvás P, Sasaki K, Imai R. Development- and cold-regulated accumulation of cold shock domain proteins in wheat. *Plant Physiol Biochem*. 2014; 77: 44–8.
 10. Shevchenko N, Kovalenko G, Bashtan N, et al. Physical factors of beetroot seed presowing treatment affect sowing quality and crop yield. *Probl Cryobiol Cryomed*. 2022; 32(3): 183–95.
 11. Shevchenko N, Lialiuik O, Stribul T, Ivchenko, T. Influence of seed priming techniques on seedling establishment and yield of asparagus hybrids. *Biol Life Sci Forum*. [Internet]. 2021 [cited 2024 May 24]; 4(1): 31. Available from: <https://www.mdpi.com/2673-9976/4/1/31>
 12. Shevchenko N, Miroshnichenko T, Mozgovska A, et al. Field performance of cryopreserved seed-derived tomato plants and post-thaw survival of viral-infected meristems. *Acta Agric Slov*. 2022; 118(4): 1–8.
 13. Sivaranjani S, Prasath VA, Pandiselvam R, et al. Recent advances in applications of ozone in the cereal industry. *LWT*. [Internet]. 2021 Jul [cited 2023 Dec 17]; 146: 111412. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002364382100565X>
 14. Tymoshenko E. [The features of growth of spring wheat plants after pre-sowing seed treatment with ozone-air mixture]. *Naukovi pratsi Instytutu bioenerhetychnykh kultur i tsukrovykh buriakiv*. 2013; 17 (1): 461–5. Ukrainian.
 15. Walker-Simmons M. Enhancement of ABA responsiveness in wheat embryos by high temperature. *Plant Cell Environ*. 1988; 11: 769–75.
 16. Waskow A, Howling A, Furno I. Mechanisms of plasma-seed treatments as a potential seed processing technology. *Front Phys*. [Internet] 2021 Apr 14 [cited 2023 Dec 17]; 9: 617345. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2021.617345/full>
 17. Zadorozhna OA, Yehorov DK. Influence of low-temperature modes of winter rye seed storage on its yield-related traits. *Probl Cryobiol Cryomed*. 2022; 32(2): 111–20.
 18. Zhang C, Zhang H, Wang L, Zhang J, Yao H. Purification of antifreeze protein from wheat bran (*Triticum aestivum* L.) based on its hydrophilicity and ice-binding capacity. *J Agric Food Chem*. 2007; 55(19): 7654–8.
 19. Zhang D, Yang T, Ren L. Y2SK2- and SK3-type dehydrins from *Agapanthus praecox* act as protectants to improve plant cell viability during cryopreservation. *PCTOC*. 2021; 144: 271–9.

