

## АНОТАЦІЯ

**Горєлова О.І. Антиоксидантна та осмопротекторна системи злаків при адаптації до гіпотермії.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 091 «Біологія». – Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вивченню участі компонентів антиоксидантної та осмопротекторної систем у жита, пшениці і тритикале в їх адаптації до низьких температур та дослідженню індукування цих систем дією газотрансмітерів оксиду азоту (NO) і сірководню (H<sub>2</sub>S) та фітогормону саліцилової кислоти.

У роботі показано зміни у функціонуванні антиоксидантної та осмопротекторної систем при низькотемпературному загартуванні зернових злаків, що вказує на їх значення в адаптації до гіпотермії; встановлено видові та сортові особливості функціонування цих систем і показано можливість їх індукування та підвищення морозостійкості рослин шляхом застосування донорів NO і H<sub>2</sub>S та фітогормону саліцилової кислоти.

Основними експериментальними об'єктами слугували етіольовані проростки пшениці м'якої (*Triticum aestivum* L., сорт Досконала, озимий, морозостійкий), жита посівного (*Secale cereale* L., сорт Пам'ять Худоєрка, озимий, морозостійкий), тритикале ( $\times$  *Triticosecale* Wittmack, озимі морозостійкі сорти Раритет, Букет та неморозостійкі сорти «дворучки» – Олександра і Підзимок харківський). Загартування проростків проводили протягом 6-7 діб за температури 2–4°C. Також загартовані та незагартовані проростки піддавали проморожуванню за температур діапазону від -5 до -9°C і визначали їх виживаність.

У серії експериментів з дослідження впливу донора сірководню на стійкість проростків до від'ємних температур гідросульфід натрію (NaHS) в

концентраціях діапазону 0,025–1 мМ додавали в середовище на початку пророщування насіння і на третю добу.

В експериментах з оцінки впливу NO на стійкість до від'ємних температур проводили праймування насіння донором NO шляхом занурення в розчин нітропрусиду натрію ( $\text{Na}_2[\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}]$ , НПН) в концентраціях діапазону 50–200 мкМ. В серіях дослідів з комбінованого впливу саліцилової кислоти та НПН насіння досліджуваних варіантів занурювали в розчин, що містив 10 мкМ саліцилової кислоти та 100 мкМ НПН.

У незагартованих і загартованих проростках злаків визначали активність антиоксидантних ферментів супероксиддисмутази (СОД), каталази і пероксидази, активність фенілаланінамонійліази, вміст флавоноїдних сполук, цукрів і проліну. Рівень окиснювальних пошкоджень оцінювали за вмістом у проростках продукту пероксидного окиснення ліпідів (ПОЛ) малонового діальдегіду (МДА).

В роботі проведено порівняння показників функціонування антиоксидантної та осмопротекторної систем етіюльованих проростків озимих жита, тритикале і пшениці у фізіологічно нормальних умовах і після холодового загартування. Активність СОД і каталази за нормальних умов у трьох видів злаків істотно не відрізнялася. Водночас активність пероксидази у жита була набагато вищою, ніж у пшениці й тритикале. Загартування спричиняло значне підвищення активності СОД у пшениці та менш істотне у проростків жита і тритикале. Активність пероксидази після загартування підвищувалася в усіх досліджуваних злаків. Вміст цукрів у незагартованих проростків жита і тритикале істотно перевищував такий у пшениці. Після загартування він пропорційно підвищувався у всіх трьох злаків. Базовий вміст проліну у жита був значно вищим, ніж у пшениці та тритикале. Загартування викликало істотне підвищення вмісту проліну у жита і менш помітне в інших видів злаків. Найбільший вміст антоціанів спостерігався у жита, а найменший у пшениці. Після загартування кількість антоціанів підвищувалася в усіх досліджуваних злаків. Вміст безбарвних флавоноїдів, що поглинають в області УФ В, за фізіологічно нормальних умов і після загартування у жита і тритикале був

вищим, ніж у пшениці. Таким чином, в адаптацію жита до гіпотермії більший внесок роблять високі активність пероксидази та вміст проліну, а тритикале – високий вміст флавоноїдів і цукрів. Водночас у пшениці після загартування більш істотно змінювалася активність антиоксидантних ферментів СОД і каталази.

В серіях експериментів з різними сортами тритикале встановлено зв'язок між морозостійкістю та станом антиоксидантної системи. Показано, що після холодого загартування проростків тритикале різних сортів в них відбувалося зниження вмісту малонового діальдегіду (МДА), що опосередковано вказує на активацію антиоксидантної системи. Водночас ефект зростання вмісту МДА після проморожування був характерним для проростків неморозостійких сортів тритикале, а у стійких сортів зміни вмісту МДА після кріостресу були незначними. Це свідчить про важливу роль окиснювального стресу у розвитку пошкоджень, спричинюваних дією холоду.

Після загартування проростків при 2–4°C протягом 6 діб у морозостійких сортів тритикале Букет і Раритет активності СОД і каталази підвищувалися, а у менш стійких – Олександра і Підзимок харківський – змінювалися менш істотно. Водночас у цих сортів більш помітно зростала активність пероксидази.

У загартованих проростків сортів Букет, Раритет і Олександра вміст цукрів був значно вищим, ніж у сорту Підзимок харківський. Вміст проліну у відповідь на загартування підвищувався в усіх сортів, при цьому абсолютні значення у сортів Букет, Раритет і Підзимок харківський були вищими, ніж у сорту Олександра. Шестидобове загартування спричиняло підвищення вмісту флавоноїдів у проростках усіх досліджуваних сортів у 1,7–1,9 раза, при цьому істотних сортових відмінностей не відзначалося. Водночас вміст антоціанів у незагартованих проростків різних сортів відрізнявся: найвищим він був у сорту Букет, а найнижчим – у сорту Підзимок харківський. В процесі холодого загартування він зростав і досягав приблизно однакових величин у сортів Букет, Раритет і Олександра, проте у найменш морозостійкого сорту Підзимок харківський цей показник був значно нижчим. Такі результати можуть свідчити

про помітний внесок антоціанів, але не вторинних метаболітів в цілому, в адаптацію проростків тритикале до низьких температур.

Встановлено, що між морозостійкістю проростків і дорослих рослин пшениці, жита і тритикале існує достатньо тісна кореляція ( $r = 0,78, P \leq 0,07$ ). Виразного зв'язку між окремо взятими показниками функціонування антиоксидантної системи та морозостійкістю не виявлено. Однак тісна кореляція відзначалася між інтегральним нормованим показником, що складався з суми нормованих величин активності антиоксидантних ферментів та вмісту низькомолекулярних протекторів у загартованих проростків злаків і морозостійкістю проростків ( $r = 0,94, P \leq 0,01$ ) та рослин у фазі кушіння ( $r = 0,90, P \leq 0,05$ ). Цей інтегральний показник може бути використаний як маркер морозостійкості озимих злаків для виявлення стійких генотипів.

Проведено порівняльне дослідження впливу екзогенного  $H_2S$  на стійкість проростків озимих пшениці та жита до кріостресу. Обробка незагартованих проростків NaHS в концентраціях 0,1 і 0,5 мМ викликала підвищення їх виживаності після проморожування при температурі  $-5^\circ C$ . Обробка NaHS в таких же концентраціях також збільшувала виживаність загартованих при  $2-4^\circ C$  проростків обох видів після їх проморожування при  $-9^\circ C$ . Під впливом NaHS в проростках обох видів за оптимальної температури ( $20-22^\circ C$ ) і в умовах холодого загартування відзначалося підвищення вмісту цукрів і проліну. Також обробка NaHS спричиняла активацію вторинного метаболізму, що виявлялося в підвищенні активності фенілаланінамонійліази за фізіологічно нормальних умов і на фоні загартування в обох видів. Вміст антоціанів при обробці NaHS збільшувався тільки у проростків пшениці, але у проростків жита під впливом екзогенного сірководню зростав вміст безбарвних флавоноїдів, що поглинають в області УФ-В. Обробка NaHS також спричиняла підвищення активності каталази та пероксидази в проростках обох видів за звичайної температури та після загартування. Під впливом NaHS в обох видів зменшувалося спричинюване проморожуванням накопичення МДА.

Праймування зернівок озимих жита і пшениці донором оксиду азоту нітропрусидом натрію (НПН, 100–200 мкМ) підвищувало здатність проростків

до холодового загартування. Обробка насіння НПН сприяла підвищенню в проростках вмісту цукрів, проліну, антоціанів і флавоноїдів, що поглинають в області УФ-В. У них також спостерігали збільшення активності СОД і пероксидази. Праймування насіння НПН запобігало значному накопиченню МДА у проростках після їх проморожування.

Показано підвищення виживаності проростків після проморожування внаслідок праймування насіння саліциловою кислотою (10 мкМ) і посилення захисного ефекту при комбінованій обробці саліциловою кислотою зі 100 мкМ НПН. Обробка насіння саліциловою кислотою спричиняла підвищення активності СОД, каталази та пероксидази, вмісту проліну та цукрів у тканинах проростків. При комбінованому використанні саліцилової кислоти та НПН в проростках відзначалося додаткове підвищення активності СОД і вмісту цукрів. Отже, за сумісної дії саліцилової кислоти та НПН їх стрес-протекторні ефекти посилювалися.

Таким чином, донори газотрансмітерів сірководню та оксиду азоту, а також стресовий фітогормон саліцилова кислота, можуть чинити кріопротекторний вплив на злаки, активуючи сигнальну мережу і посилюючи функціонування антиоксидантної та осмопротекторної систем за умов адаптації рослин до холоду.

Ключові слова: *Triticum aestivum* L., *Secale cereale* L., × *Triticosecale* Wittmack, антиоксидантні ферменти, сірководень, оксид азоту, праймінг, пролін, розчинні вуглеводи, флавоноїди.

## SUMMARY

**Horielova E.I. Antioxidant and osmoprotective systems of cereals in adaptation to hypothermia. – Qualifying scientific work as manuscript.**

Thesis for a scientific degree of Doctor of Philology by field of study in specialty 091 “Biology”. – M.G. Kholodny Institute of Botany of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021

The dissertation is devoted to the study of the participation of the components of antioxidant and osmoprotective systems in rye, wheat, and triticale in the adaptation to low temperatures, and to the study of these systems' induction by gasotransmitters nitrogen oxide NO and hydrogen sulfide H<sub>2</sub>S, and phytohormone salicylic acid.

In the work, changes in the functioning of antioxidant and osmoprotective systems at low-temperature hardening of grain cereals were shown, which indicates their importance in adapting to hypothermia; species and varietal characteristics of these systems were identified and the possibility of their induction and increase of frost resistance of plants through the application of H<sub>2</sub>S and NO donors, and phytohormone salicylic acid were shown.

The main experimental objects were etiolated seedlings of soft wheat (*Triticum aestivum* L., variety Doskonala, winter, frost-resistant), rye (*Secale cereale* L., variety Pamyat' Khudoerka, winter, frost-resistant), and triticale ( $\times$ *Triticosecale* Wittmack, frost-resistant winter varieties Raritet and Buket, and non-frost-resistant facultative ('dvuruchka') ones Alexandra and Pidzymok Kharkivskiy). Hardening of seedlings was performed for 6 days at a temperature of 2-4°C. Hardened and unhardened seedlings were subjected to freezing at temperatures of -6 or -9°C, and their survival was determined.

In a series of experiments to study the effect of H<sub>2</sub>S on the resistance of seedlings to negative temperatures, sodium hydrosulfide (NaHS) in concentrations range of 0.025–1 mM was added to the medium at the beginning of seed germination and on the third day.

In the experiments to study the NO effect on frost resistance, seeds were primed with NO donor by immersion to the sodium nitroprusside (Na<sub>2</sub>[Fe(CN)<sub>5</sub>NO], SNP) solution in concentrations range of 50-200 μM. In the series of experiments on the

salicylic acid and SNP combined effects, seeds of the studied variants were immersed in a solution containing 10  $\mu$ M salicylic acid and 100  $\mu$ M SNP.

The activity of antioxidant enzymes superoxide dismutase (SOD), catalase, and guaiacol peroxidase, the activity of phenylalanine ammonia-lyase, flavonoid compounds, sugars, and proline were determined in unhardened and hardened seedlings. The level of oxidative damage was assessed in the seedlings by the content of a lipid peroxidation (LPO) product malonic dialdehyde (MDA).

The paper compares the performance indicators of the antioxidant and osmoprotective systems of etiolated seedlings of winter rye, triticale, and wheat in physiologically normal conditions and after cold hardening. The activity of SOD and catalase under normal conditions in the three cereals did not differ significantly. At the same time, guaiacol peroxidase activity in the rye was much higher than in wheat and triticale. Hardening caused a significant increase in SOD activity in wheat and less significant in rye and triticale seedlings. Guaiacol peroxidase activity after hardening increased in all cereals. The content of sugars in unhardened seedlings of rye and triticale significantly exceeded that in wheat. After hardening, it increased proportionally in all three cereals. The basal content of proline in the rye was much higher than in wheat and triticale. Hardening caused a significant increase in proline content in the rye and less noticeable in other cereals. The highest content of anthocyanins was observed in rye, and the lowest was in wheat. After hardening, the anthocyanins' amount increased in all studied cereals. The content of UV-B absorbing colorless flavonoids under physiologically normal conditions and after hardening in the rye and triticale was higher than in wheat. Thus, high peroxidase activity and proline content make a greater contribution to the rye adaptation to hypothermia, and triticale has a high content of flavonoids and sugars. At the same time, in wheat the activity of the antioxidant enzymes SOD and catalase changed more significantly after hardening.

In a series of experiments with different varieties of triticale, a relationship was established between the frost resistance and the state of antioxidant system. It was found that after the hardening of seedlings of different triticale varieties there was a decrease in the content of MDA, which indirectly indicates the activation of the

antioxidant system. At the same time, the effect of increased MDA content after freezing was characteristic of seedlings of non-frost-resistant triticale varieties, whereas in resistant varieties the changes in MDA content after cryostress were insignificant. This indicates the important role of oxidative stress in the development of damage caused by cold.

After hardening of seedlings of frost-resistant triticale varieties Buket and Raritet at 2-4°C for 6 days, the activities of SOD and catalase increased, and in less resistant Alexandra and Pidzymok Kharkivskiy changed less significantly. At the same time in this varieties the activity of guaiacol peroxidase increased more markedly.

The hardened seedlings of Buket, Raritet, and Alexandra varieties had a much higher sugar content than the Pidzymok Kharkivskiy variety. The content of proline in response to hardening increased in all varieties, while the absolute values in the varieties Buket, Raritet, and Pidzymok Kharkivskiy were higher than in the variety Alexandra. Hardening caused an increase in the content of flavonoids in the seedlings of all studied varieties by 1.7-1.9 times, with no significant varietal differences. At the same time, the content of anthocyanins in unhardened seedlings of different varieties was different: the highest in the variety Buket, and the lowest – in the variety Pidzymok Kharkivskiy. After hardening, it increased and reached approximately the same values in the varieties Buket, Raritet, and Alexandra, but in the least-frost-resistant variety Pidzymok Kharkivskiy it was much lower. These results can testify a significant contribution of anthocyanins, but not secondary metabolites in general, in the adaptation of triticale seedlings to low temperatures.

It was found that there is a fairly strong correlation between the frost resistance of seedlings and adult plants of wheat, rye and triticale ( $r = 0.78$ ,  $P \leq 0.07$ ). No clear relationship was found between the individual indicators of the antioxidant system and frost resistance. However, a strong correlation was observed between the integral normalized index, which consisted of the sum of normalized values of antioxidant enzyme activity and the content of low-molecular-weight protectors in hardened seedlings, and frost resistance of seedlings ( $r = 0.94$ ,  $P \leq 0.01$ ) and plants in the tillering phase ( $r = 0.90$ ,  $P \leq 0.05$ ), and their frost resistance. This integral index can be used as a marker of frost resistance of winter cereals to identify resistant genotypes.



A comparative study of the exogenous H<sub>2</sub>S effect on resistance of wheat and rye seedlings to cryostress was conducted. Treatment of unhardened seedlings with NaHS at concentrations of 0.1 and 0.5 mM caused an increase in their survival after freezing at -5°C. The effect of NaHS in the same concentrations increased the survival of hardened at 2-4°C seedlings of both species after freezing at -9°C. Under the NaHS action at optimal temperature (20-22°C) and after hardening there was an increase in the content of sugars and proline in the seedlings of both species. Also, NaHS caused the activation of secondary metabolism, which was manifested in increased phenylalanine ammonia-lyase activity under physiologically normal conditions and on hardening background in both species. The content of anthocyanins after the NaHS treatment increased only in wheat seedlings, and in rye seedlings the content of colorless flavonoids absorbing in UV-B increased. Treatment with NaHS also induced an increase in catalase and guaiacol peroxidase activity in seedlings of both species at normal temperature and after hardening. Under the influence of NaHS in both species the freezing-induced accumulation of MDA was decreased.

Priming of rye and wheat seeds by 0.1-0.2 mM SNP increased their hardening ability. Treatment with SNP resulted in an increase in seedlings of the contents of sugar, proline, anthocyanins, and UV-B absorbing flavonoids. The activities of SOD and guaiacol peroxidase also increased. Priming of seeds with SNP prevented significant accumulation of MDA in seedlings after freezing.

The increase in the seedlings' survival after freezing due to priming of seeds was shown as a result of priming seeds with 10 µM salicylic acid, and combined treatment with 10 µM salicylic acid and 100 µM SNP enhanced the protective effect. Treatment of seeds with salicylic acid caused an increase in activities of SOD, catalase, and guaiacol peroxidase, as well as the content of proline and sugars in the tissues of seedlings. With the combined use of salicylic acid and SNP in seedlings there was an additional increase in SOD activity and sugar content. Thus, under the combined action of salicylic acid and SNP, their stress-protective effects were enhanced.

Thus, donors of gasotransmitters hydrogen sulfide and nitrogen oxide, as well as plant stress hormone salicylic acid, can have a cryoprotective effect on cereals,

activating a signaling network and enhancing the functioning of antioxidant and osmoprotective systems when plants adapt to cold.

Key words: *Triticum aestivum* L., *Secale cereale* L., × *Triticosecale* Wittmack, antioxidant enzymes, hydrogen sulfide, nitric oxide, priming, proline, soluble carbohydrates, flavonoids.

## ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у наукових виданнях, що індексовані у наукометричній базі даних Scopus:

1. Kolupaev Yu. E., Horielova E. I., Yastreb T. O., Popov Yu. V., & Rybchun N. I. (2018). Phenylalanine ammonia-lyase activity and content of flavonoid compounds in wheat seedlings at the action of hypothermia and hydrogen sulfide donor. *Ukr. Biochem. J.*, 90 (6), 12-20. <https://doi.org/10.15407/ubj90.06.012>

(Особистий внесок дисертанта: проведення експериментів, обробка та інтерпретація результатів)

2. Kolupaev Yu. E., Horielova E. I., Yastreb T. O., & Ryabchun N. I. (2020). State of antioxidant system in triticale seedlings at cold hardening of varieties of different frost resistance. *Cereal Res. Commun.*, 48 (2), 165-171. <https://doi.org/10.1007/s42976-020-00022-3>

(Особистий внесок дисертанта: проведення експериментів, обробка та інтерпретація результатів)

### Статті у наукових фахових виданнях України:

3. Колупаєв Ю. Е, Горелова Е. И., Ястреб Т. О. (2018). Механизмы адаптации растений к гипотермии: роль антиоксидантной системы. *Вісн. Харків. націон. аграрн. ун-ту Сер. Біологія*, 1 (43), 6-33. <https://doi.org/10.35550/vbio2018.01.006>

(Особистий внесок дисертанта: пошук та опрацювання джерел літератури)

4. Горелова Е. И., Колупаєв Ю. Е., Ястреб Т. О., Швиденко Н. В., Попов Ю. В., Шкляревский М. А, Рябчун Н. И. (2018). Конститутивная и индуцированная холодным закаливанием антиоксидантная активность проростков озимых злаков. *Вісн. Харків. націон. аграрн. ун-ту. Сер. Біологія*, 2 (44), 59-68. <https://doi.org/10.35550/vbio2018.02.059>

(Особистий внесок дисертанта: проведення експериментів, обробка та інтерпретація результатів, участь у написанні тексту статті)

5. Горелова Е. И., Швиденко Н. В., Рябчун Н. И., Колупаєв Ю. Е. (2018). Вторичный метаболизм проростков *Secale cereale* при действии донора

сероводорода и холодового закаливання. *Вісн. Харків. націон. аграрн. ун-ту. Сер. Біологія*, 3(45), 59 – 68. <https://doi.org/10.35550/vbio2018.03.094>

*(Особистий внесок дисертанта: проведення експериментів, обробка та інтерпретація результатів, участь у написанні тексту статті)*

6. Горелова Е. И., Шкляревский М. А., Рябчун Н. И., Кабашникова Л. Ф., Колупаев Ю. Е. (2020). Комбинированное влияние салициловой кислоты и донора оксида азота на развитие индуцированной закаливанием морозоустойчивости проростков пшеницы. *Вісн. Харків. націон. аграрн. ун-ту Сер. Біологія*, 2 (50), 93-104. <https://doi.org/10.35550/vbio2020.02.093>

*(Особистий внесок дисертанта: проведення експериментів, обробка та інтерпретація результатів, участь у написанні тексту статті)*

7. Горелова О. І., Шкляревський М. А., Колупаєв Ю. Є. (2020). Вміст вторинних метаболітів у проростках тритикале різних генотипів за умов холодового загартування. *Фізіологія рослин і генетика*, 52, (5), 401-411. <https://doi.org/10.15407/frg2020.05.401>

*(Особистий внесок дисертанта: проведення експериментів, обробка та інтерпретація результатів, участь у написанні тексту статті)*

8. Горелова О. І., Рябчун Н. І., Шкляревський М. А., Резнік А. М., Колупаєв Ю. Є. (2020). Морозостійкість злаків корелює з інтегрованими показниками вмісту низькомолекулярних протекторних сполук і активності антиоксидантних ферментів. *Вісн. Харків. націон. аграрн. ун-ту Сер. Біологія*, 3 (51), 71-86. <https://doi.org/10.35550/vbio2020.03.071>

*(Особистий внесок дисертанта: проведення експериментів, участь в обробці та інтерпретації результатів та написанні тексту статті)*

9. Горелова О. І., Колупаєв Ю. Є. (2021). Регуляція холодо- і морозостійкості рослин дією екзогенних газотрансмітерів і фітогормонів. *Вісн. Харків. націон. аграрн. ун-ту Сер. Біологія*, 1 (52), 32-51. <https://doi.org/10.35550/vbio2021.01.032>

*(Особистий внесок дисертанта: пошук та опрацювання джерел літератури, участь у написанні тексту)*

## Матеріали конференцій:

10. Горелова Е. И., Колупаев Ю. Е., Ястреб Т. О., Рябчун Н. И. (2018). Влияние донора сероводорода и холодогового закаливания на активность фенилаланинаммонийлиазы и содержание флавоноидов в проростках озимых ржи и пшеницы. *Сучасна біологія рослин: теоретичні та прикладні аспекти: IV Міжнародна наукова конференція (м. Харків, Україна): Тези доповідей.* (С. 44-45). Харків.
11. Горелова О. І., Швиденко М. В., Рябчун Н. І., Колупаєв Ю. Є. (2020). Вплив донорів газотрансмітерів на холодове загартування проростків озимих злаків. *Сучасні проблеми генетики, біотехнології і біохімії сільськогосподарських рослин: Міжнародна наукова конференція (м. Одеса, Україна): Тези доповідей* (С. 86-87). Одеса.
12. Горелова О. І., Колупаєв Ю. Є., Шкляревский М. А., Рябчун Н. І. (2021). Пролін і стійкість злаків до агентів окиснювального стресу і гіпотермії. *Міжнародна наукова конференція «Стрес і адаптація рослин» (м. Харків, Україна): Матеріали конференції. Вісн. Харків. нац. аграрн. ун-ту. Сер. Біологія. Спец. випуск* (С. 104–105).
13. Горелова О.І., Гавва К.М., Рябчун Н.І., Колупаєв Ю.Є. Індукування накопичення вторинних метаболітів *Triticum aestvum* і стійкості до зневоднення і кріостресу дією донора H<sub>2</sub>S (2021). *Міжнародна наукова конференція «Стрес і адаптація рослин» (м. Харків, Україна): Матеріали конференції. Вісн. Харків. нац. аграрн. ун-ту. Сер. Біологія. Спец. випуск.* (С. 102–103).
14. Горелова О. І., Резнік А. М., Рябчун Н. І., Колупаєв Ю. Є. (2021). Зв'язок морозостійкості озимих зернових культур зі станом антиоксидантної системи. *Селекція зернових та зернобобових культур в умовах змін клімату: напрями і пріоритети: тези доповідей Міжнародної наукової конференції (м. Одеса, Україна):* (С. 88–89). Одеса: СГІ–НЦНС.