

## Morphophysiological features of the generative offspring of *Aesculus hippocastanum* L. from various ecologically unfavorable areas of an industrial city

L. V. Shupranova, K. K. Holoborodko, I. I. Loza, O. Ye. Pahomov

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

### Article info

Received 24.10.2023

Received in revised form  
07.11.2023

Accepted 18.11.2023

Oles Honchar Dnipro National  
University, Gagarin Ave., 72,  
Dnipro, 49010, Ukraine.  
E-mail: kamelina502@ukr.net

**Shupranova, L. V., Holoborodko, K. K., Loza, I. I., Pahomov, O. Ye. (2023). Morphophysiological features of the generative offspring of *Aesculus hippocastanum* L. from various ecologically unfavorable areas of an industrial city. *Ecology and Noospherology*, 34(2), 81–86. doi:10.15421/032312**

The results of the influence of various ecological conditions of an industrial city (environmentally favorable zone, zones of motor vehicle emissions and metallurgical production, damage by the chestnut miner *Cameraria ohridella* Deschka & Dimič) on the functional state of the generative offspring of *Aesculus hippocastanum* L. were given. The average degree of the mass variability of the horse chestnut seeds was revealed, the level of which depended on the type of pollution. Higher values of the variation coefficient were established in seeds from monitoring sites ecologically unfavorable for plant growth. A decrease in the mass of ripe seeds of horse chestnut exposed to the effects of vehicle emissions, metallurgical production, and the severe attack of the chestnut moth *C. ohridella* was shown compared to samples from an ecologically favorable zone. It was found that the moisture loss in seeds from the ecologically favorable zone was on average 25.0 %, while from the main road zone – 15.2 %. A decrease in the content of storage proteins by an average of 14.5 % in the zones of anthropogenic pollution was observed. The largest values of this characteristics were shown by most trees from the ecologically favorable zone. In the seeds of *A. hippocastanum* plants, an increase in the activity of both benzidine peroxidase and catalase was established mainly under the effects of aerotechnogenic pollution. The level of enzyme activity depended on the type of phytotoxic emissions. A decrease in the activity of benzidine peroxidase was registered due to the effects of motor vehicle emissions, and an increase due to the effects of metallurgical production. A significant increase in catalase activity was found in the seeds of *A. hippocastanum* trees from two monitoring sites and, especially, under the influence of vehicle emissions, which can be explained by a compensatory reaction in response to reduced peroxidase activity. An individual reaction of the studied protein system (storage proteins, antioxidant enzymes) of the seeds of some trees was observed, regardless of the stress level of technogenic load and the type of pollutants. At each monitoring site, trees whose seeds had both increased and significantly decreased enzyme activity were identified. In the Botanical Garden and in the park near the metallurgical enterprise, the seeds of only one of three trees showed high activity of both peroxidase and catalase. Considering the physiological functions of the studied enzymes in the seeds and the reaction of the plant organism to biotic and abiotic stresses, the increase in the activation of catalase and peroxidase indicated their participation in antioxidant protection against active forms of oxygen to ensure a reduction in the intensity of damage processes in the generative offspring of *A. hippocastanum* L. The variability of the level of enzyme activity in horse chestnut seeds means adaptation to environmental conditions and, in general, reveals the adaptive ability of generative offspring to germinate due to the high antioxidant potential to counteract the development of oxidative stress under the influence of adverse environmental factors. It was concluded that the chronic influence of adverse factors of the urban environment causes the formation of individual seeds with increased antioxidant protection characteristics, which can be used as planting material when creating sustainable plantations in an industrial city.

**Keywords:** aerotechnogenic pollution; *Cameraria ohridella* Deschka & Dimič; *A. hippocastanum* L.; mass of seeds; storage proteins; antioxidant enzymes

# Морфофізіологічні особливості генеративного потомства *Aesculus hippocastanum* L. з різних екологічно несприятливих територій індустріального міста

Л. В. Шупранова, К. К. Голобородько, І. І. Лоза, О. Є. Пахомов

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

Вивчено функціональний стан насіння рослин гіркокаштана звичайного (*Aesculus hippocastanum* L.), які зростають в екологічно сприятливих умовах (Ботанічний сад Дніпровського національного університету) і в умовах токсичних викидів автотранспорту і металургійного виробництва, ураження каштановою міллю *Cameraria ohridella* Deschka & Dimić на основі дослідження маси насіння, активності бензидин-пероксидази, каталази і вмісту запасних білків. За дії несприятливих чинників зареєстровано зниження маси насіння і концентрації запасних білків. Визначено індивідуальні особливості насіння окремих дерев *A. hippocastanum* як за активністю ензимів і вмісту білків, так і за масою насіння у відповідь на дію аеротехногенного навантаження. На основі отриманих результатів показано широкий діапазон внутрішньовидової варіабельності активності ферментів у стиглому насінні, індукованих умовами навколишнього середовища. У цілому отримані результати демонструють високу активність ферментативної антиоксидантної системи захисту насіння гіркокаштана звичайного за впливу комплексу негативних чинників промислового міста. Винятки становлять зразки насіння, зібрані з примагістральної зони, в яких зафіксовано зниження активності пероксидази, але суттєве підвищення каталази. Установлено, що насіння окремих дерев гіркокаштана проявляє високий адаптаційний потенціал для протидії розвитку окисного стресу за впливу несприятливих факторів довкілля, яке можна використовувати як посадковий матеріал при створенні стійких насаджень міста.

**Ключові слова:** аеротехногенне забруднення; *Cameraria ohridella* Deschka & Dimić; насіння *A. hippocastanum* L.; маса насіння; запасні білки; ферменти-антиоксиданти

## Вступ

Видовий склад рослин м. Дніпро формується за рахунок природних видів вищих судинних рослин, які зберегли своє існування на урбанізованих територіях, та завезених видів іншого географічного походження. Древа в місті представлені в основному липами, в'язами, горобинами, тополями, робінією несправжньоакацієвою, гледіцією і гіркокаштаном звичайним (*Aesculus hippocastanum* L.). Гіркокаштан звичайний використовують не тільки в декоративних насадженнях, він є одним з найбільш вивчених видів рослин щодо забруднення повітря поллютантами, унікальним індикатором екологічних умов і стану забруднення урбанізованого середовища та виступає універсальним природним фільтром очищення ґрунту, повітря, води від техногенних забруднень, має вагомое архітектурне, лікувальне та господарське значення (Čalić-Dragosavac et al., 2010; Gnativ, 2007; Hryhoryuk et al., 2004; Petrova et al., 2012). Але стан каштанових насаджень в Україні суттєво погіршується внаслідок несприятливої дії промислових і автотранспортних викидів, посухи, засолення і, особливо, в останнє десятиліття внаслідок пошкоджуючої дії молі-мінери *Cameraria ohridella* Deschka et Dimić (Lepidoptera, Gracillariidae), а також грибової інфекції *Guinardia aesculi* (Holoborodko et al., 2016; Hryhoryuk et al., 2015; Jagiełło et al., 2017; Pentelyuk and Hryhoryuk, 2016; Seliutina et al., 2020), які викликають суттєве зниження декоративності, зміну забарвлення листя, появу некрозів, ранній опад листя, що призводить до пригнічення дерев. Серед деревних порід виявляються стійкі екземпляри, з яких можна збирати насіння для вирощування (але не масового) в умовах міста, як адаптованих до несприятливих умов урбанізованого середовища. Натомість метаболізм насіння залишається вивченим недостатньо, особливо за дії стресів різного походження.

Дослідження адаптації дерев *A. hippocastanum* в умовах степової зони України, і, особливо його генеративного потомства, є на цей час актуальним і доцільним. Недостатня увага приділяється вивченню морфофізіологічних реакцій насіння, яке формувалось у стресових умовах урбанізованого середовища. Дослідження взаємовідносин рослина – середовище на біохімічному рівні має важливе значення для розуміння

природи адаптації рослин до дії як абіотичної, так і біотичної природи (*C. ohridella*). У цей час у рослин відбуваються складні метаболічні процеси і, як наслідок, змінюється їх фізіологічний стан і часто з утворенням активних форм кисню (АФК) (Kolupaev, 2007; Mithofer and Boland, 2012). Недостатньо вивченим є реакція ферментів-антиоксидантів рослин у насінні *A. hippocastanum*, синтез яких індукується у відповідь на підвищення рівня АФК в умовах стресу. У насінні АФК виробляються під час дозрівання, висихання, проростання і старіння. Активні форми кисню функціонують як сигнальні молекули у відповідь на атаку травоядних комах, патогенів, під час соматичного ембріогенезу, апоптозу клітин і під час виходу з фази спокою (Bailly 2004; Bailly et al., 2008; Oracz et al., 2007). АФК можуть вироблятися неферментативними або ферментативними процесами залежання від вологості насіння (Bailly et al., 2008; Kalemba and Pukacka, 2014), а надлишок АФК є небажаним для насіння. Для діагностики впливу екстремальних чинників довкілля на рослини звертають перш за все увагу на показники, що базуються на визначенні стану білоксинтезуючого апарату насіння, антиоксидантних ферментів і запасних білків. які є резервом для молодшої рослини (Gumilevskaya et al., 2001; Musatenko et al., 1997), оскільки від вмісту сполук нітрогену, швидкості їх трансформації і використання в метаболічних процесах в значній мірі залежить успішність проростання насіння в природних умовах.

Мета роботи – провести порівняльний аналіз морфометричних і біохімічних параметрів стиглого насіння гіркокаштана звичайного в умовах промислового міста Північного Степу України (на прикладі м. Дніпро).

## Матеріали та методи досліджень

Об'єктом дослідження слугувало стигле насіння (свіжозібране і висушене) гіркокаштана звичайного (*A. hippocastanum*), яке відбирали на моніторингових ділянках у Ботанічному саду Дніпровського національного університету ім. О. Гончара (екологічно сприятлива зона: ЕСЗ), у зоні викидів автотранспорту (ЗВА) і металургійного виробництва (ЗВМВ). На кожній моніторинговій ділянці насіння збирали з трьох дерев (по 50 штук). Масу насіння визначали ваговим методом, а

також після висушування при 105–110 °С до отримання постійної ваги.

Для вилучення білків наважку 0,1 г гомогенізованого матеріалу заливали 1 мл 0,05 М трис-НСІ буфера, рН 7,5 та екстрагували протягом 1 год при +4 °С, центрифугування проводили 15 хв. при швидкості 15000 g при температурі +4 °С. Надосадкову рідину (супернатант) зливали у пробірки для визначення вмісту білка та визначення активності бензидин-пероксидази і каталази. Визначення вмісту білку проводили за методом Bradford (1976), який базується на утворенні кольорових комплексів білка з розчином барвника (Кумасі діамантово-блакитний G-250). Оптичну густину вимірювали при довжині хвилі 590 нм. Концентрацію білка в досліджуваній пробі визначали за калібрувальною кривою і виражали в мг/г.

Визначення активності бензидин-пероксидази проводили за методом Бояркіна (1951). Про активність пероксидази судили за часом утворення синього кольору окисленого бензидину. Для вимірювання активності брали таке розведення супернатанту, щоб зміна кольору відбувалась від 10 до 60 сек. Вимірювання проводили при довжині хвилі 490 нм і виражали в  $D_{490}/г$  наважки \* хв.

Визначення активності каталази (CAT, EC 1.11.1.6) оцінювали згідно з Королук із співавт. (1987) шляхом вимірювання оптичної густини при 410 нм в реакційній суміші з 0.1 мл ензимного препарату, 1 %  $H_2O_2$  і 4 % молібдату амонію. Результати розраховували з урахуванням коефіцієнта екстинкції ( $22.2 M^{-1} cm^{-1}$ ) і виражали у ммоль  $H_2O_2/г$  хв.

Результати досліджень активності ферментів представляли як середнє значення  $m \pm SD$  (стандартне відхилення). Після перевірки даних на нормальність відмінності у масі насіння, змінних активності ферментів і вмісту протеїну між різними моніторинговими ділянками перевіряли за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA) відповідно до пакета Statistica версії 8, StatSoft, Inc. (USA). Для визначення достовірної різниці групових середніх застосовували критерій Tukey (Honestly Significant Difference). Значні статистичні відмінності були встановлені за допомогою тесту Tukey при  $p < 0,05$ .

## Результати та їх обговорення

Як відомо, від якості насіння у більшості випадків залежить і якість утворюваних зелених насаджень. Тому важливим є вивчення в умовах промислового забруднення морфометричних характеристик плодів і насіння, оскільки більш дрібне насіння має менший запас поживних речовин і гірше проростає (Gumilevskaya et al., 2001). Дослідження маси свіжозібраного насіння дерев гіркокаштана звичайного, що зростають в екологічно сприятливій зоні, уздовж автомагістралі і в умовах впливу викидів металургійного виробництва показало, що всереднені дані мало відрізняються між собою (табл. 1).

Маса насіння *A. hippocastanum*, зібраного зі всіх дерев, коливалась незначно, а саме в межах 10,0–12,6 г. Спостерігається тенденція до зниження маси насіння з моніторингових ділянок порівняно з ЕСЗ ( $p > 0,05$ ). Як

**Таблиця 1**

Маса насіння рослин *A. hippocastanum* у різних умовах міського середовища

| Насіння             | Екологічно<br>сприятлива зона | Автомагістраль     |                  | Металургійне виробництво |                  |
|---------------------|-------------------------------|--------------------|------------------|--------------------------|------------------|
|                     |                               | Вага, г            | % до<br>контролю | Вага, г                  | % до<br>контролю |
| Свіжозібране        | $11,95 \pm 0,89^a$            | $10,69 \pm 0,57^a$ | 89,5             | $11,74 \pm 0,24^a$       | 98,2             |
| Після висушування   | $8,96 \pm 0,35^a$             | $9,07 \pm 0,37^a$  | 101,2            | –                        | –                |
| Втрата вологості, % | 25,0                          | 15,2               | –                | –                        | –                |

Примітка. Значення у стовпчику, позначеному літерою а, не суттєво відрізнялися за Тьюкі  $t$ -тест  $P > 0,05$ .

показав аналіз результатів, маса свіжозібраного насіння гіркокаштана з дослідної ділянки біля автомагістралі зменшується на 10,5 % порівняно із зразками з екологічно сприятливої зони. Маса насіння із ЗВМВ також має тенденцію до зменшення, але не суттєво. Значення маси

насіння дерев, що зростають у приміагістральній зоні, після висихання практично не змінюються порівняно з контролем (різниця становить 1,2 %). Значні відмінності щодо маси насіння спостерігаються в індивідуальному аналізі окремих дерев (рис. 1).

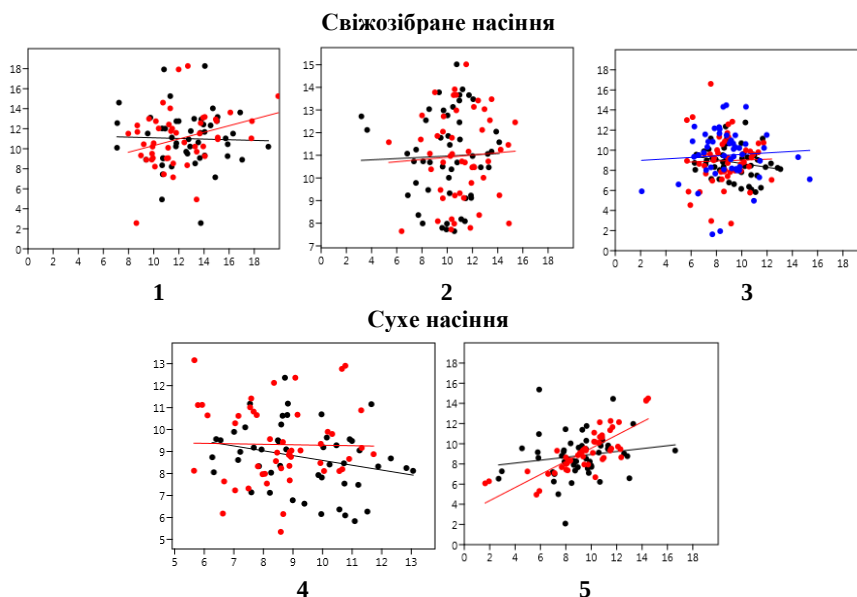


**Рис 1.** Розподіл ваги насіння *A. hippocastanum* L.: 1 – екологічно сприятлива зона; 2 – зона викидів автотранспорту; 3 – зона викидів металургійного виробництва; 4 – екологічно сприятлива зона; 5 – зона викидів автотранспорту.

В аналіз включено по 50 насінин з кожного дерева

Значення маси насіння було поділено на три класи: I – найменша вага (від 2,0 до 9,9 г), II – середня (від 10,0 до 14,9 г) і III – найвища (від 15 до 19,9 г). Аналіз за цими класами показав таке: найбільший відсоток (31%) насіння I класу був притаманний деревам з примагістрального насадження, а у дерев з ЕСЗ і зони ВМВ цей показник був практично на однаковому рівні: 22 % і 20,6 % відповідно. Насіння із середніми показниками маси виявилося найбільшим за відсотками класом і склало 65 % (ЕСЗ), 92,2 % (ЗВА) і 72,5 % (ЗВМВ). Найбільший відсоток насіння III класу (12,7 %) встановлено для дерев гіркокаштана з ЕСЗ, а у дерев із примагістральної зони і зони ВМВ становив 6,0 % і 6,9 % відповідно. Значні відмінності спостерігаються за

параметром втрати вологи насінням. Втрата вологи в насінні з ЕСЗ виявилась більш значною порівняно з насінням, зібраного біля автомагістралі, і становила від 23,3 до 30,1 %. Зразки з ЗВА втратили вологу в діапазоні від 10,0 до 20,2 %.

Як критерій оцінки впливу несприятливих умов середовища на деревні рослини використовується вміст білків і активність пероксидази і каталази (El-Epany et al., 2013; Kosakivska, 2012; Shupranova et al., 2019). Процес формування відповідних реакцій клітин насіння гіркокаштана звичайного за дії токсичних чинників викидів автотранспорту і металургійного виробництва та атаки шкідника характеризувався змінами вмісту білків у стиглому насінні (табл. 2).

**Таблиця 2**

Вміст протеїнів насіння *A. hippocastanum* у різних умовах міського середовища

| Номер<br>дерева  | Вміст білків, мг/г        |                           |                           |
|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                  | ЕСЗ                       | ЗВА                       | ЗВМВ                      |
| 1                | 20.48 ± 0,94              | 17,84 ± 1,13              | 17,56 ± 0,82              |
| 2                | 23,17 ± 1,39              | 19,52 ± 0,78              | 20,20 ± 0,69              |
| 3                | 25.76 ± 1,66              | 21,52 ± 2,04              | 22,04 ± 1,23              |
| Середнє значення | 23,14 ± 2,64 <sup>a</sup> | 19,63 ± 1,84 <sup>a</sup> | 19,93 ± 2,25 <sup>a</sup> |
| % до контролю    | 100                       | 84,8                      | 86,1                      |
| Cv, %            | 11,4                      | 9,4                       | 11,3                      |

Примітка. Див. табл. 1.

За результатами ряду досліджень (Bilgin et al., 2010; Singh et al., 2013) в умовах стресів зазвичай відбувається зниження інтенсивності метаболічних процесів (у тому числі зниження швидкості синтезу білків), що носить захисний характер, зберігаючи таким чином життєвий потенціал клітин, необхідний для наступної репарації.

Найбільші значення вмісту білків показали два дерева з ЕСЗ. За дії викидів автотранспорту та металургійного виробництва спостерігається тенденція до зниження концентрації білків ( $p > 0,05$ ). У першому випадку на 15,2 %, а в другому – на 13,9 %. Середні значення вмісту білків із насіння дерев, що зростають у несприятливих умовах, розрізнялися незначно. Визначення вмісту білків, оснований на принципі зв'язування білків з барвником Кумасі, не є специфічним і дозволяє оцінити тільки загальний стан білкового обміну. Відмінності в накопиченні запасних білків в насінні гіркокаштана звичайного є, можливо, однією з причин формування неоднакових адаптивних можливостей різних особин гіркокаштана до несприятливих умов навколишнього середовища.

Однією з головних реакцій рослин на стреси є індукція окисно-відновних ферментів, таких як пероксидази і каталази. Рядом авторів показано, що чим більший рівень їх активності, тим вища стійкість рослин (Polle and Rennenberg, 2019; Duan et al., 2014; Toledo et al., 2021). Це пояснюється тим, що ферменти, які каталізують реакції окиснення і відновлення, як найбільш чутливі структури, можуть характеризувати адаптивну здатність рослин в несприятливих умовах довкілля. Тому дослідження активності таких оксидоредуктаз, як пероксидаза і каталаза, є важливими для пізнання процесу адаптації рослин до комплексної дії абіотичних і біотичних чинників середовища.

Аналіз активності пероксидази показав різноспрямовану реакцію даного ферменту, що залежало від умов зростання рослин (табл. 3).

За середніми значеннями активність пероксидази була суттєво зниженою (на 32,4 %) у насінні з ЗВА порівняно з контролем. Натомість насіння із зони ВМВ показало підвищення цього показника на 32,2 %. Слід відмітити, що на кожній моніторинговій ділянці виявляються дерева,

**Таблиця 3**

Активність пероксидази насіння рослин гіркокаштана звичайного в умовах несприятливих умов міського середовища

| Номер<br>дерева  | Активність пероксидази, D <sub>490</sub> / Г <sub>нав.</sub> хв. |                 |                  |
|------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|
|                  | ЕСЗ                                                              | ЗВА             | ЗВМВ             |
| 1                | 1548,0 ± 125,71                                                  | 1273,4 ± 94,21  | 1572,0 ± 170,28  |
| 2                | 1956,2 ± 118,29                                                  | 1356,2 ± 108,63 | 2388,2 ± 210,15  |
| 3                | 3348,1 ± 254,45                                                  | 2004,2 ± 149,16 | 5100,4 ± 321,24  |
| Середнє значення | 22 84,1 ± 943,78                                                 | 1544,6 ± 400,17 | 3020,2 ± 1847,15 |
| % до контролю    | 100                                                              | 67,6            | 132,2            |
| Cv, %            | 41,3                                                             | 25,9            | 61,2             |

Примітка. Див. табл. 1.

насіння яких має як підвищену активність, так і значно знижену. Найвищу активність ензиму встановлено в насінні дерева № 3 із зони ВМВ. Таким чином, можна констатувати, що найбільшу фітотоксичність проявляють викиди автотранспорту на адаптаційні можливості стиглого насіння. Ці дані збігаються з результатами дослідження (Seliutina et al., 2020) впливу абіотичних і біотичних чинників середовища на метаболізм листя *A. hippocastanum*. Слід відзначити високу варіабельність

активності пероксидази в зоні металургійного виробництва (61,2 %) за рахунок високої активності пероксидази в насінні дерева № 3.

Дослідження активності каталази показало, що найбільша активність ферменту притаманна дереву № 3 з ЕСЗ, для насіння із зони викидів автотранспорту дереву № 1, а на ділянці ВМВ – це дерево № 3 (табл. 4). Найменші значення активності каталази (< 10) зареєстровані в кожній групі дерев.

Таблиця 4

Активність каталази насіння рослин *A. hippocastanum* L.

| Номер<br>дерева  | Активність каталази, ммоль H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / гнав. хв. |                           |                          |
|------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------|
|                  | EC3                                                                  | ЗВА                       | ЗВМВ                     |
| 1                | 2,70 ± 0,09                                                          | 22,43 ± 0,02              | 7,30 ± 0,01              |
| 2                | 8,92 ± 0,03                                                          | 12,84 ± 0,04              | 10,27 ± 0,02             |
| 3                | 13,93 ± 0,06                                                         | 8,65 ± 0,01               | 11,49 ± 0,01             |
| Середнє значення | 8,51 ± 5,62 <sup>a</sup>                                             | 14,64 ± 7,06 <sup>a</sup> | 9,69 ± 2,16 <sup>a</sup> |
| % до контролю    | 100                                                                  | 172,0                     | 113,9                    |
| Cv, %            | 66,1                                                                 | 48,3                      | 22,2                     |

Примітка. Див. табл. 1.

Підрахунок середніх значень цього параметру на моніторингових ділянках показав його суттєве підвищення у насінні дерев гіркогокаштана із ЗВА на 72 % і в меншій мірі із ЗВМВ на 13,9 %.

Слід відзначити високу варіабельність активності каталази з екологічно сприятливої зони (66,1 %), що пояснюється високою різницею активності ензиму в насінні досліджених дерев. Дія стресових чинників навколишнього середовища (фітотоксиканти і шкідники) супроводжується підвищенням рівня активних форм кисню (АФК) (Foyer, 2018). У відповідь на дію у рослин включаються такі захисні реакції, як посилення бар'єрних властивостей (лігніфікація), зміна активності ферментів антиоксидантного захисту. Відомо, що пероксидаза є дуже лабільним ферментом, який реагує на порушення клітинного гомеостазу за дії стресорів різного походження. Наші дослідження показали, що в насінні дерев *A. hippocastanum* активізується пероксидазна система детоксикації наслідків окиснювального стресу за сумісної дії викидів металургійного виробництва і пошкоджень, викликаних впливом листового мінеру. Натомість слід відмітити, що на кожній дослідній ділянці виявляються дерева, насіння яких має як підвищену активність, так і значно знижену. З літературних джерел відомо (Anjum et al., 2016), що підвищення активності пероксидази в стресових умовах свідчить про активізацію захисту від несприятливого впливу зовнішнього середовища, а понижена – про недостатність участі пероксидазної системи в адаптивних реакціях рослин. Можна констатувати, що сумісний вплив викидів автотранспорту і каштанової молі пригнічує активність пероксидази, але суттєво підвищує (на 72 %) активність каталази. Отримані результати дозволяють припустити, що активування каталази компенсує падіння активності пероксидази. У випадку насіння з дерев гіркогокаштана, що ростуть на моніторинговій ділянці ЗВМВ, відзначається помірне підвищення активності як пероксидази, так і каталази.

Можна припустити, що насіння дерев, яке має достатньо високу активність пероксидази, може свідчити про їх більш високу адаптаційну спроможність до ефективного проростання.

## Висновки

Отримані дані свідчать про те, що адаптаційний потенціал генеративного потомства рослин *A. hippocastanum*, які зростають в умовах різного аеротехногенного забруднення, визначається функціонуванням комплексу метаболічних реакцій, які включають як необхідний компонент акумуляцію запасних білків і високу активність антиоксидантних ферментів. Установлено закономірності впливу різних видів забруднення міського середовища на функціональний стан насіння гіркогокаштана звичайного. Виявлено різну реакцію (активація/інгібування) пероксидази генеративного потомства *A. hippocastanum*, яка залежала від інтенсивності і виду стресових чинників. Установлено активування каталази у дослідних зразках насіння, причому сильніше ця активація виражена в насінні дерев, що зростають у зоні

викидів автотранспорту. Надані результати щодо змін активності каталази і пероксидази свідчать про їх важливу роль у детоксикації активних форм кисню та підтриманні гомеостазу в насінні за несприятливих умов.

## References

- Anjum, N. A., Sharma, P., Gill, S. S. et al. (2016). Catalase and ascorbate peroxidase—representative H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-detoxifying heme enzymes in plants. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 23, 19002–19029.
- Bailly, C. (2004). Active oxygen species and antioxidants in seed biology. *Seed Sci. Res.*, 14(93), 1078.
- Bailly, C., El-Maarouf-Bouteau, H., Corbineau F. (2008). From intracellular signaling networks to cell death: the dual role of reactive oxygen species in seed physiology. *C R Biol.*, 331(10), 806–814.
- Bilgin, D. D., Zavala, J. A., Zhu, J., Clough, S. J., Ort, D. R., De Lucia, E. H. (2010). Biotic stress globally downregulates photosynthesis genes. *Plant Cell Environ.*, 2010, 33, 1597–1613.
- Boyarkin, A. N. (1951). Bystryy metod opredeleniya aktivnosti peroksidazy [A rapid method for determining peroxidase activity]. *Biokhimiya*, 16(4), 352–357 (in Russian).
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye binding. *Anal. Biochem.*, 72, 248–254.
- Čalić-Dragsavac, D., Zdravković-Korać, S., Šavikin-Fodulović, K., Radojević, C., Vinterhalter, B. (2010). Determination of aescin content in androgenic embryos and hairy root culture of *Aesculus hippocastanum*. *Pharmaceutical Biology*, 48(5), 563–567.
- Duan, Y.-Y., Song, L.-J., Niu, S.-Q., Huang, T., Yang, G.-H., Hao, W.-F. (2017). Variation in leaf functional traits of different-aged *Robinia pseudoacacia* communities and relationships with soil nutrients. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28(1), 28–36.
- El-Enany, M. A., Mahfouze, S. A., El-Dessouky, S. E. (2013). Gene expression of heat stress on protein and antioxidant enzyme activities of two *Lupinus* species. *J Appl. Sci. Res.* 9(1), 240–247.
- Foyer, C. H. (2018). Reactive oxygen species, oxidative signaling and the regulation of photosynthesis. *Environmental and Experimental Botany*, 154, 134–142.
- Gnativ, P. S. (2007). Kashtan konskii vo L'vove i voprosy yego ekologicheskoy ustoychivosti v gorodskikh nasazhdeniyakh [Horse chestnut in Lviv and issues of its environmental sustainability in urban plantings]. *Nauch. zap. gos. prirodovedch. muzeya. L'vov*, 23, 75–84 (in Russian).
- Gumilevskaya, N. A., Azarkovich, M. I. (2001). Belki osevykh organov pokoyashchikhsya i prorostayushchikh semyan kashtana konskogo. 1. Obshchaya kharakteristika belkov [Proteins of the axial organs of dormant and germinating horse chestnut seeds. 1. General characteristics of proteins]. *Fiziologiya rasteniy*, 48(1), 5–11 (in Russian).
- Hlibovyt's'ka, N. I. (2017). Ekologichna stiykist' ta fitomelioryatyna prydatnist' derevnykh porid urbanizovanykh ekosystem [Ecological sustainability and phytoremediation suitability of tree species of urbanized ecosystems]. *Visnyk*

- Kharkivs'koho natsional'noho universytetu imeni V. N. Karazina. Seriya «Biolohiya», 28, 12-21 (in Ukrainian).
- [Holoborodko, K. K., Marenkov, O. M., Gorban, V. A., Voronkova, Y. S. \(2016\). The problem of assessing the viability of invasive species in the conditions of the steppe zone of Ukraine. Visn. Dnipropetr. Univ. Ser. Biol. Ekol., 24\(2\), 466–472.](#)
- Hryhoryuk, I. P., Luk'yanenko, T. L. (2015). Fiziologichni i molekulyarni osnovy stiykosti vydiv roslyn rodu *Aesculus* L. proty kashtanovoyi minuyuchoyi moli [Physiological and molecular bases of resistance of species of plants of the genus *Aesculus* L. against horse-chestnut leaf miner]. TSP «Komprynt», Kyiv (in Ukrainian).
- Hryhoryuk, I. P., Mashkovska, S. P., Yavorovskyy, P. P., Kolesnichenko O. V. (2004). Biolohiya kashtaniv [Biology of chestnuts]. Lohos, Kyiv (in Ukrainian).
- Jagiello, R., Baraniak, E., Karolewski, P., Łakomy, P., Behnke-Borowczyk, J., Walczak, U. & Giertych M. J. (2017). Ecophysiological aspects of the interaction between *Cameraria ohridella* and *Guignardia aesculi* on *Aesculus hippocastanum*. *Dendrobiology*, 78, 146–156.
- [Kalemba, E. M., Pukacka, S. \(2014\). Carbonylated proteins accumulated as vitality decreases during long-term storage of beech \(\*Fagus sylvatica\* L.\) seeds. Trees, 28, 503–515.](#)
- Kolupaev, Yu. Ye. (2007). Aktivnyye formy kisloroda v rasteniyakh pri deystvii stressorov: obrazovaniye i vozmozhnyye funktsii [Reactive oxygen species in plants under the influence of stressors: formation and possible functions]. *Visnik KHNAU im. V. V. Dokuchaeva: Seriya biologiya*, 12(3), 6–26 (in Russian).
- Korolyuk, M. A., Ivanova, L. I., Mayorova, N. G., Tokarev, V. E. (1987). Metod opredeleniya aktivnosti katalasi [Method for determining catalase activity]. *Laboratornoye delo*, 16–19 (in Russian).
- Kosakivska, I. V. (2012). Proteom roslyn: reaktsiya na abiotychni stresovi vplyvy [Plant proteome: response to abiotic stress]. *Fyziolohyya y byokhymyya kul't. rastenyy*, 44(5), 389–398 (in Ukrainian).
- [Mithofer, A., Boland, W. \(2012\) Plant defense against herbivores: chemical aspects. Annu Rev Plant Biol, 63, 431–450.](#)
- Musatenko, L. I., Heneralova, V. M., Martyn H. H. (1997). Do fiziolohiyi spokoyu nasinnya *Aesculus hippocastanum* L. [On the physiology of dormancy of seeds of *Aesculus hippocastanum* L.]. *Ukr. botan. zhurn.*, 34(1), 86–91 (in Ukrainian)
- [Oracz, K., El-Maarouf Bouteau, H., Farrant, J. M., Cooper, K., Belghazi, M., Job, C., Job, D., Corbineau, F., Bailly, C. \(2007\) ROS production and protein oxidation as a novel mechanism for seed dormancy alleviation. Plant J., 50\(3\), 452–465.](#)
- Petrova, S., Yurukova, L. & Velcheva, I. (2012). Horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.) as a biomonitor of air pollution in the town of Plovdiv (Bulgaria). *Journal of Bioscience and Biotechnology*, 1(3), 241–247.
- Pentelyuk, O. S., Hryhoryuk, I. P. (2016). Dyskretnist' pokaznykiv vodnoho rezhymu i vmistu nukleyinovykh kyslot u lystkakh vydiv roslyn rodu *Aesculus* L. za diyi kashtanovoyi minuyuchoyi moli [Discreteness of indicators of the water regime and the content of nucleic acids in the leaves of plant species of the genus *Aesculus* L. under the action of the chestnut moth]. *Bioresursy i pryrodokorystuvannya*, 8(5–6), 5–10 (in Ukrainian).
- [Polle, A., Rennenberg, H. \(2019\). Physiological Responses to Abiotic and Biotic Stress in Forest Trees. Forests, 10\(9\), 711.](#)
- [Seliutina, O. V., Shupranova, L. V., Holoborodko, K. K., Shulman, M. V., Bobylev, Y. P. \(2020\). Effect of \*Cameraria ohridella\* on accumulation of proteins, peroxidase activity and composition in \*Aesculus hippocastanum\* leaves. Regulatory Mechanisms in Biosystems, 11\(2\), 299–304.](#)
- [Shupranova, L. V., Holoborodko, K. K., Seliutina, O. V., Pakhomov, O. Y. \(2019\). The influence of \*Cameraria ohridella\* \(Lepidoptera, Gracillariidae\) on the activity of the enzymatic antioxidant system of protection of the assimilating organs of \*Aesculus hippocastanum\* in an urbogenic environment. Biosyst. Divers., 27\(3\), 238–243.](#)
- [Singh, H., Dixit, S., Verma, P. C., Singh, P. K. \(2013\). Differential peroxidase activities in three different crops upon insect feeding. Plant Signal and Behaviour, 8 \(10\), 1–7.](#)
- [Toledo, C. A. L., Ponce, F. S., Oliveira, M. D., Aires, E. S., Júnior, S. S., Lima, G. P. P., Oliveira, R. C. O. \(2021\). Change in the Physiological and Biochemical Aspects of Tomato Caused by Infestation by Cryptic Species of \*Bemisia tabaci\* MED and MEAM1. Insects, 12, 1105.](#)