УДК 577.34 https://doi.org/10.7124/FEEO.v39.1835

ЖУК В. В.✉
МІХЄЄВ О. М.
ОВСЯННІКОВА Л. Г.

Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН України,
Україна, 03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 148
✉ *vzhukv@gmail.com*

РЕАКЦІЯ РОСЛИН ГОРОХУ НА ДІЮ УФ-С ПРОМЕНІВ ТА ЕКЗОГЕННОГО ЦИТОКІНІНУ

Мета. Досліджено реакцію рослин гороху (*Pisum sativum* L.) на опромінення ультрафіолетом С (УФ-С) та обробку цитокініном бензиламінопурином (БАП) за змінами росту пагонів і коренів, вмісту перекису водню (ПВ) та фотосинтетичних пігментів у листках. ***Методи.*** Рослини гороху сорту Ароніс піддавали дії опромінення УФ-С у дозі 10 кДж/м^2 за потужності 7 Вт/м^2. Частину неопромінених рослин та частину опромінених УФ-С обробляли БАП у концентрації 10^{-5} М через добу після дії УФ-С. Виміри довжини, маси пагонів і коренів рослин, відбір проб для визначення вмісту фотосинтетичних пігментів та ПВ у листках проводили протягом досліду. ***Результати.*** Встановлено, що опромінення УФ-С зупиняло ріст рослин гороху, збільшувало вміст ПВ, зменшувало вміст каротиноїдів і хлорофілів у листках. Обробка рослин БАП після опромінення УФ-С прискорювала відновлення вмісту фотосинтетичних пігментів, зупиняла зростання вмісту ПВ у листках. ***Висновки.*** Опромінення рослин гороху УФ-С дозою 10 кДж/м^2 зупинило ріст пагонів і коренів, зменшило вміст фотосинтетичних пігментів і підвищило вміст ПВ у листках. Дія БАП після опромінення рослин прискорила відновлення вмісту фотосинтетичних пігментів, зупинила зростання вмісту ПВ у листках.

Ключові слова: УФ-С, *Pisum sativum* L., БАП, ріст, пероксид водню, фотосинтетичні пігменти.

УФ-С здатен руйнувати клітини мікроорганізмів, тому його використовують з метою дезінфекції у сучасних аграрних технологіях (Urban et al., 2016). Руйнація мікроорганізмів УФ-С радіацією обумовлена утворенням пірімідинових димерів у ДНК, перекисним окисненням ліпідів, полімеризацією білків, інактивацією ензимів. У вищих рослин УФ-С здатен спричиняти інгібуючу і деструктивну дію на хлоропласти, мітохондрії, мембрани. Опромінення рослин УФ-С призводить до окиснення пластохінону, деструкції ламелярних мембран, тилакоїдів, втрати активності фотосистеми 2, мітохондріального трансмембранного потенціалу, що викликає надмірне утворення активних форм кисню (АФК). Дисбаланс між продукуванням і утилізацією АФК створює оксидний стрес. За оптимальних концентрацій АФК виконують сигнальні функції, беруть участь у регуляції генної транскрипції через вплив на ацетилування гістонів, метилування ДНК. Перекисне окиснення ліпідів, спричинене АФК, призводить до накопичення ліноленової кислоти, яка є попередником жасмонової кислоти, що задіяна у сигнальних системах відповіді на стресові чинники різної природи. Показано, що допосівне опромінення насіння рослин ромашки лікарської (*Matricaria chamomilla* L.) УФ-С змінило вторинний метаболізм вирощених з нього рослин у напрямку посилення синтезу фенольних сполук, зокрема фенолів і флавоноїдів (Zhuk et al., 2021a). Вважають, що промені УФ-С здатні стимулювати адаптивні механізми рослин (Urban et al., 2016). У рослин відомо п’ять типів сенсорних фоторецепторів для сприйняття сонячного світла, частина з яких здатна реагувати на УФ-С промені. Специфічний фоторецептор УФ-В має спектр сприйняття, який частково перекривається зі спектром УФ-С. До рецепторів, які реагують на УФ-С промені також відносять фототропін, однак специфічні рецептори для сприйняття УФ-С не знайдені. Використання УФ-С у циклах вирощування рослин обмежується недостатністю інформації про ефективні дози його дії. Суттєві агрономічні перспективи використання УФ-С обумовлюють необхідність

© 2026 Жук В. В., Міхєєв О. М., Овсяннікова Л. Г. This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

подальшого дослідження його впливу на культурні рослини.

Показано, що опромінення рослин суниці (*Fragaria x ananassa*) низькою дозою УФ-С прискорювало їх цвітіння, викликало збільшення кількості плодів, зменшувало розвиток хвороб (Forges et al., 2020). Після дії УФ-С пошкоджень фотосинтетичного апарату листків суниці не знайдено. Виявлено, що опромінення рослин томатів (*Solanum lycopersicum* L.) УФ-С пригнічувало ріст рослин, знижувало вміст фотосинтетичних пігментів у листках (Dawood et al., 2020). Для зменшення шкідливої дії УФ-С було використано обробку рослин до опромінення пуриновим метаболітом алантоїном, що призвело до збільшення вмісту хлорофілу у листках, стимулювало накопичення біомаси рослин, розчинних вуглеводів, білків у листках. Встановлено, що обробка рослин томатів цитокініном кінетином зменшувала індукований УФ-С оксидний стрес, стимулювала синтез фенольних сполук, флавоноїдів, антоціанів, активність антиоксидантних ензимів, низькомолекулярних антиоксидантів (Dawood et al., 2022). Дія екзогенного цитокініну бензиладеніну на опромінені УФ-С клітини пагона *Ceratonia siliqua* L. підвищувала у них вміст фенольних сполук, хлорофілів, каротиноїдів, цукрів (Costa-Pérez et al., 2023). Нами показана позитивна дія цитокініну БАП на рослини сої та гороху після хронічного опромінення ультрафіолетом В, яка проявилась у стимуляції росту рослин, відновленні вмісту фотосинтетичних пігментів у листках, зниженні вмісту ендогенного ПВ (Zhuk et al., 2021b; Zhuk et al., 2023). Використання УФ-С у дозі 5 кДж/м^2 для опромінення рослин гороху спричинило гальмування росту пагонів і коренів, накопичення ПВ у листках, зменшення вмісту каротиноїдів, яке тривало протягом 7 діб після опромінення, після чого відбувалось поступове зниження вмісту ПВ, зростання вмісту каротиноїдів (Zhuk et al., 2025). Обробка рослин гороху БАП після дії УФ-С сприяла відновленню вмісту хлорофілів у листках, однак не вплинула вміст каротиноїдів. Через 14 діб після опромінення УФ-С у дозі 5 кДж/м^2 відбувалось повне відновлення рослин гороху. Виявлено, що опромінення надземної частини рослин гороху УФ-С дозою 15 кДж/м^2 зупиняло ріст пагонів і коренів у довжину, призводило до поступового зменшення їх маси (Zhuk et al., 2024). Обробка надземної частини рослин водним розчином БАП у концентрації 10^{-4}М до та після дії УФ-С затримувала втрату їх маси. Дія дози УФ-С 15 кДж/м^2 спричинила значне зменшення вмісту хлорофілу та каротиноїдів у листках гороху. Обробка рослин БАП до опромінення УФ-С не стимулювала відновлення фотосинтетичних пігментів у листках, однак обробка БАП після опромінення призвела до зростання вмісту хлорофілу *b*. Дозу УФ-С 15 кДж/м^2 можна віднести до інгібуючих для рослин гороху у вегетативній стадії росту і розвитку рослин.

Метою даної роботи було дослідження дії УФ-С променів у дозі 10 кДж/м^2 на рослини гороху та обробку цитокініном БАП на ріст пагонів і коренів, вміст ПВ та фотосинтетичних пігментів у листках.

Матеріали і методи

Рослини гороху (*Pisum sativum* L.) сорту Ароніс селекції ННЦ Інституту землеробства НААН України вирощували в умовах водної культури 14 діб до появи трьох справжніх листків. Режим освітлення становив 14 годин світла інтенсивністю 4,4 кЛк і 10 годин темноти. Опромінення рослин УФ-С проводили дозою 10 кДж/м^2 потужністю 7 Вт/м^2 за допомогою установки ОБН-150м з 2 лампами Philips 30W 253,7 нм. Рослини контрольного варіанту знаходились окремо. Через добу після опромінення УФ-С пагони частини неопромінених та опромінених рослин обприскували водним розчином БАП у концентрації 10^{-5} М. Протягом досліду визначали довжину та масу пагонів і коренів. Зразки листків для визначення вмісту фотосинтетичних пігментів і ПВ відбирали одночасно у всіх варіантах досліду. Вміст фотосинтетичних пігментів визначали етанольним методом за Ліхтенталером (Zhuk et al., 2024). Кількість пігментів вираховували у міліграмах (мг) на грам (г) маси сирої речовини. Вміст ПВ визначали за сульфатно титановим методом і виражали в мікромолях (мкМ) на грам (г) маси сирої речовини (Lichtethaler, 1987). Повторність досліду 5-разова. Результати оброблені статистично за допомогою програми ANOVA. На графіках наведені середні арифметичні значення та величини дисперсії.

Результати та обговорення

Встановлено, що опромінення рослин гороху УФ-С у дозі 10 кДж/м^2 призвело до затримки росту пагонів у довжину протягом 14 діб після дії стресу (рис.1 (1)). Обробка рослин БАП після їх опромінення УФ-С не відновлювала ріст пагонів. Ріст коренів у довжину після дії УФ-С на надземну частину рослин гороху також зупинився у рослин, які були оброблені або не оброблені БАП (рис. 1 (2)). Дія УФ-С спричинила зменшення маси надземної частини рослин гороху,

яке тривало протягом 14 діб досліду у оброблених і необроблених БАП рослин (рис.1 (3)). Маса коренів опромінених рослин гороху протягом перших 2 діб знизилась, однак поступово наблизилась до відповідних значень у рослин контролю (рис. 1 (4)). Обробка БАП після УФ-С опромінення відновила масу коренів до контрольного рівня.

Показано, що опромінення рослин гороху УФ-С дозою 10 кДж/м^2 спричинило зростання вмісту ПВ у листках, яке тривало протягом 14 діб досліду (рис. 2). Обробка рослин БАП після дії УФ-С зупинила ріст вмісту ПВ у листках на 10 добу досліду, однак він залишився вищим, ніж у неопромінених рослин.

На 14 добу досліду вміст ПВ у листках гороху, який опромінили УФ-С і не обробили БАП, зріс у 6 разів порівняно з контролем, а рослин опромінених УФ-С і оброблених БАП – у 4 рази.

Вміст каротиноїдів у листках гороху після опромінення УФ-С знижувався протягом 7 діб, після чого поступово відновлювався і на 14 добу досліду досягав рівнів контролю (рис. 3). Обробка рослин гороху БАП затримала деградацію каротиноїдів протягом перших діб після дії УФ-С і прискорювала відновлення їх вмісту у листках порівняно з опроміненими рослинами без обробки БАП. На 14 добу після опромінення рослин гороху вміст каротиноїдів у оброблених БАП рослин досягнув рівнів контролю.

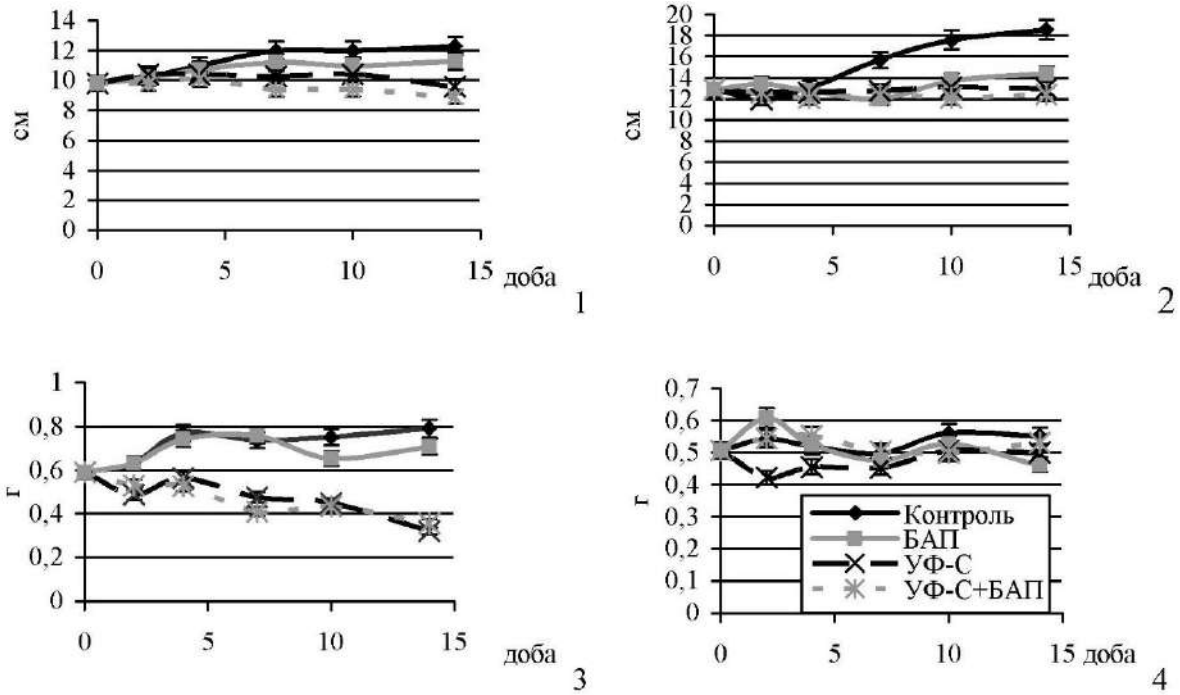


Рис. 1. Дія опромінення УФ-С та БАП на ріст рослин гороху (1 – довжина пагона, 2 – довжина кореня, 3 – маса пагона, 4 – маса кореня).

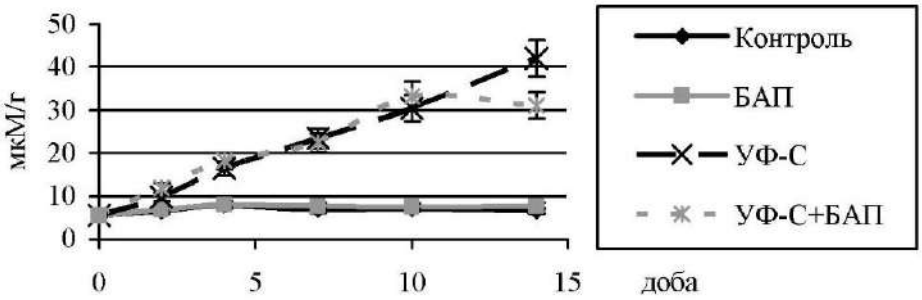


Рис. 2. Дія опромінення УФ-С та БАП на вміст ПВ у листках рослин гороху.

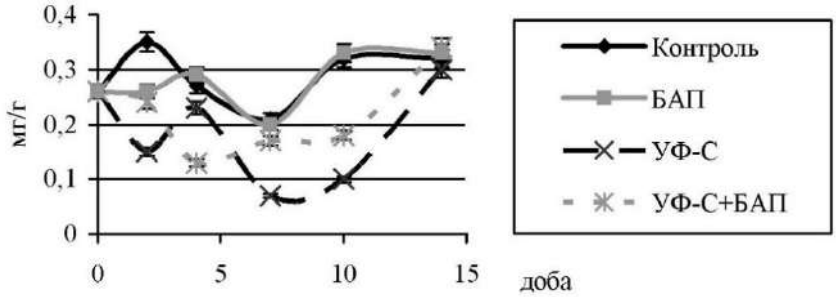


Рис. 3. Дія опромінення УФ-С та БАП на вміст каротиноїдів у листках рослин гороху.

Опромінення УФ-С рослин гороху призвело до поступового зменшення вмісту суми хлорофілів у листках до 10 доби після дії стресу (рис. 4 (1)). На 14 добу після опромінення вміст хлорофілів у листках збільшився, але залишився меншим, ніж у рослин контролю. Обробка БАП опромінених рослин затримала зменшення вмісту хлорофілу і сприяла його відновленню після 7 доби дії стресу. Вміст хлорофілу *a* у листках опромінених УФ-С рослин гороху знижувався до 10 доби і залишався нижчим від контролю до кінця досліду, обробка рослин БАП після опромінення УФ-С затримувала деградацію хлорофілу *a* і через 7 діб після опромінення відбувалось відновлення його вмісту до рівнів контролю до 14 доби (рис. 4 (2)).

Вміст хлорофілу *b* у листках опромінених УФ-С рослин гороху був вищим, ніж у рослин контролю, однак до 7 доби досліду знижувався і залишався нижчим до кінця досліду (рис. 4 (3)). Опромінення рослин гороху УФ-С спричинило зниження співвідношення хлорофілів *a/b* до 10 доби після дії стресу (рис. 4 (4)), після чого воно підвищувалось до відповідних значень контролю. Обробка опромінених рослин БАП збільшила співвідношення хлорофілів *a/b* порівняно з таким у опромінених і необроблених БАП рослин через відновлення вмісту хлорофілу *a*.

Опромінення рослин гороху УФ-С підвищувало співвідношення хлорофілів до каротиноїдів протягом перших 2 діб у 2 рази після його дії внаслідок зниження вмісту каротиноїдів, після чого воно знижувалось і до 14 доби досліду наблизилось до відповідних значень контролю (рис. 5). Після обробки БАП опромінених УФ-С рослин гороху співвідношення хлорофілів до каротиноїдів поступово зростало до 4 доби досліду внаслідок затримки деградації каротиноїдів. Через 7 діб після опромінення співвідношення пігментів знижувалось до рівнів контролю завдяки поступовому підвищенню вмісту фотосинтетичних пігментів у молодих листках.

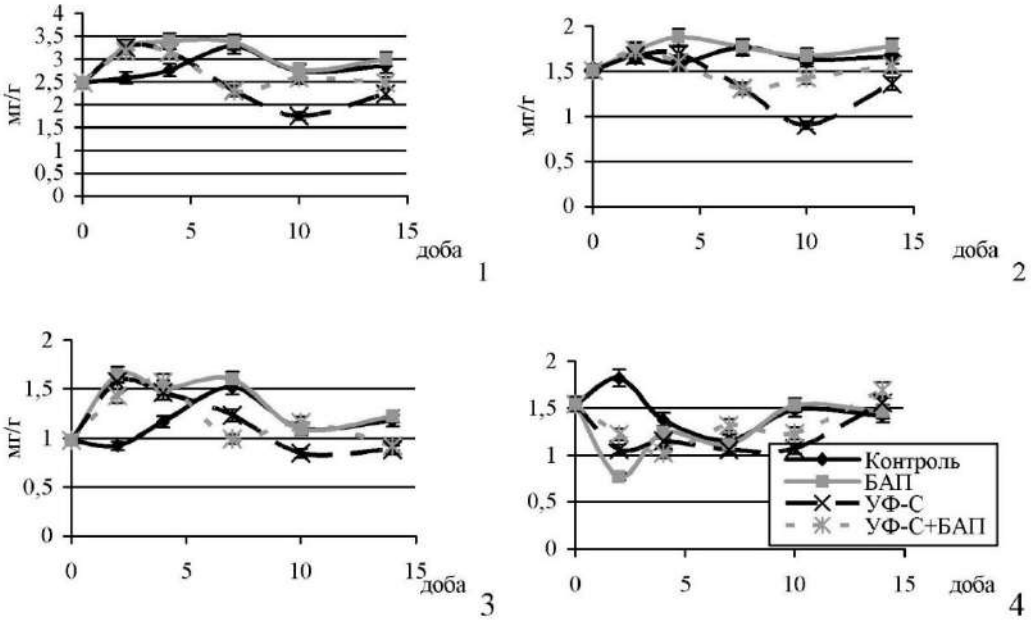


Рис. 4. Дія опромінення УФ-С та БАП на вміст хлорофілів у листках рослин гороху 1 – вміст суми хлорофілів 2 – вміст хлорофілу *a*, 3 – вміст хлорофілу *b*, 4 – співвідношення хлорофілів a/b.

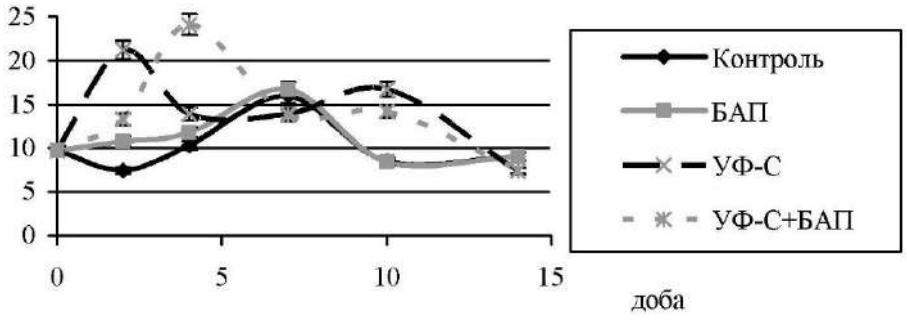


Рис. 5. Дія опромінення УФ-С та БАП на співвідношення хлорофілів/каротиноїдів у листках гороху.

Встановлено, що високоенергетичні промені УФ-С у дозі 10 кДж/м^2 пригнічували ріст рослин гороху, спричиняли накопичення ПВ у листках, призводити до зменшення вмісту фотосинтетичних пігментів у зрілих листках. Вміст ПВ у листках опромінених УФ-С рослин зростав протягом 14 діб досліду, що могло бути обумовлено значними деструктивними змінами у фотосинтетичному комплексі, який є головним джерелом АФК. Обробка рослин БАП після їх опромінення стабілізувала вміст ПВ у листках на 10 добу, який залишився незмінним до 14 доби досліду. Зменшення вмісту фотосинтетичних пігментів у листках опромінених УФ-С рослин тривало 10 діб, після чого відбувалось часткове відновлення пігментного комплексу. Обробка рослин гороху БАП після їх опромінення УФ-С прискорювала відновлення вмісту пігментів у листках. До 14 доби досліду вміст фотосинтетичних пігментів у листках оброблених БАП опромінених УФ-С рослин гороху наближався до такого у листках неопромінених рослин. Дослідження співвідношення хлорофілів до каротиноїдів свідчить про значнішу деструкцію каротиноїдів їх вмісту порівняно з хлорофілами, що обумовлено їх провідною роллю у поглинання і інактивації високоенергетичних променів УФ-С. Наші попередні дослідження виявили, що опромінення УФ-С дозою 15 кДж/м^2 спричинило незворотні ушкодження рослин гороху, дія дози була інгібуючою, а дія дози опромінення 5 кДж/м^2 була не значною (Zhuk et al., 2025; Zhuk et al., 2024). Отримані результати свідчать, що опромінення дозою УФ-С 10 кДж/м^2 затримувало ріст рослин гороху. Обробка рослин гороху цитокініном БАП після їх опромінення УФ-С у дозі 10 кДж/м^2 сприяла їх відновленню, стабілізувала рівень оксидного стресу, прискорювала відновлення пігментного комплексу листків. Вміст пігментів і їх співвідношення у листках оброблених БАП після опромінення УФ-С і неопромінених рослин через 14 діб після дії УФ-С були близькими, що дозволяє вважати можливим використання опромінення рослин гороху УФ-С у дозі 10 кДж/м^2 у вегетативній стадії росту та розвитку. Обробка цитокініном опромінених УФ-С рослин прискорює їх відновлення після дії стресового чинника.

Висновки

Встановлено, що опромінення рослин гороху сорту Ароніс у фазі трьох справжніх листків в дозі УФ-С 10 кДж/м^2 за потужністю 7 Вт/м^2 зупинило ріст пагонів і коренів у довжину, призвело до зменшення маси пагонів. Дія високоенергетичних променів УФ-С спричинила поступове зростання вмісту ендогенного ПВ у листках протягом 14 діб досліду. Обробка рослин цитокініном БАП після опромінення стабілізувала вміст ПВ у листках на 10 добу досліду і зупинила подальше його збільшення. Опромінення рослин УФ-С у дозі 10 кДж/м^2 призвело до різкого зниження вмісту каротиноїдів у листках гороху, який поступово відновлювався і на 14 добу досягнув рівня контролю. Обробка опромінених УФ-С рослин БАП затримала деградацію і прискорила відновлення вмісту каротиноїдів у листках. Дія УФ-С призвела до зниження вмісту хлорофілів у листках, яке відзначали протягом 10 діб досліду, після чого відбувалось часткове його відновлення. Обробка рослин БАП після опромінення рослин УФ-С прискорила відновлення вмісту хлорофілів у листках. Відновлення співвідношення хлорофілів до каротиноїдів у опромінених УФ-С і оброблених БАП рослин вказує на стимуляцію цитокініном синтезу фотосинтетичних пігментів. Таким чином, опромінення рослин гороху УФ-С дозою 10 кДж/м^2 спричинило часткове ушкодження пігментного комплексу

листків, а обробка БАП сприяла його відновленню, зниженню рівня оксидного стресу. Визначення оптимальних доз опромінення УФ-С для знезараження рослин важливе для його використання у аграрних технологіях.

Інформація про фінансову підтримку, подяки: відсутня.

Конфлікт інтересів: автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

References

1. Chen L. M., Kao C. H. Effect of excess copper on rice leaves: evidence for involvement of lipid peroxidation. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*. 1999. Vol. 40. P. 283–287.
2. Costa-Pérez A., Ferrer M. A., Calderón A. A. Combined Effects of Cytokinin and UV-C Light on Phenolic Pattern in *Ceratonia siliqua* Shoot Cultures. *Agronomy*. 2023. Vol. 13 (3). P. 621. https://doi.org/10.3390/agronomy13030621.
3. Dawood M. F. A., Abu-Elsaoud A. M., Sofy M. R., Mohamed H. I., Soliman M. H. Appraisal of kinetin spraying strategy to alleviate the harmful effects of UVC stress on tomato plants. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29 (35). P. 52378–52398. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19378-6.
4. Dawood M. F. A, Tahjib-Ul-Arif M., Sohag A. A. M., Latef A. A. H. A., Ragaey M. M. Mechanistic insight of allantoin in protecting tomato plants against ultraviolet C stress. *Plants (Basel)*. 2020. Vol. 10 (1). P. 11. https://doi.org/10.3390/plants10010011.
5. Forges M., Bardin M., Urban L., Aarrouf J., Charles F. Impact of UV-C radiation applied during plant growth on pre- and post-harvest disease sensitivity and fruit quality of strawberry. *Plant Disease*. 2020. Vol. 104. P. 3239–3247. https://doi.org/10.1094/PDIS-02-20-0306-RE.
6. Lichtethaler H. K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*. 1987. Vol. 148. P. 350–382. https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1.
7. Urban L., Charles F., de Miranda M. R. A., Aarrouf J. Understanding the physiological effects of UV-C light and exploiting its agronomic potential before and after harvest. *Plant physiology and biochemistry: PPB*. 2016. Vol. 105. P. 1–11. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.04.004.
8. Zhuk V., Sokolova D., Kravets A., Sakada V., Gluschenko L., Kuchuk, M. Efficiency of pre-sowing seeds by UV-C and X-ray exposure on the accumulation of antioxidants in inflorescence of plants of *Matricaria chamomilla* L. genotypes. *International Journal of Secondary Metabolite*. 2021a. Vol. 8 (3). P. 186–194. https://doi.org/10.21448/ijsm.889860.
9. Zhuk V. V., Mikheev A. N., Ovsyannikova L. G. Adaptive effect of cytokinin on soybean plants under the action of chronic ultraviolet B radiation. *Factors in experimental evolution of organisms*. 2021b. Vol. 28. P. 72–77. https://doi.org/10.7124/FEEO.v28.1378. [in Ukrainian]
10. Zhuk V. V., Mikheev A. N., Ovsyannikova L. G. The response of pea plants to ultraviolet B radiation and cytokinin. *Factors in experimental evolution of organisms*. 2023. Vol. 32. P. 85–90. https://doi.org/10.7124/FEEO.v32.1541. [in Ukrainian]
11. Zhuk V. V., Mikheev A. N., Ovsyannikova L. G. The effect of UV-C explosion and exogenous cytokinin on pea plants *Factors in experimental evolution of organisms*. 2025. Vol. 37. P. 127–132. https://doi.org/10.7124/FEEO.v36.1759. [in Ukrainian]
12. Zhuk V. V., Mikheev A. N., Ovsyannikova L. G. The effect of UV-C-radiation and cytotokinin on pea plants *Factors in experimental evolution of organisms*. 2024. Vol. 34. P. 154–159. https://doi.org/10.7124/FEEO.v34.1633. [in Ukrainian]

ZHUK V. V., MIKHEEV A. N., OVSYANNIKOVA L. G.
Institute of Cell Biology and Genetic Engineering of Nat. Acad. Sci. of Ukraine,
Ukraine, 03143, Kyiv, Akad. Zabolotnoho str., 148

REACTION OF PEA PLANTS TO THE EFFECT OF UV-C RADIATION AND EXOGENOUS CYTOKININ

Aim. The reaction of pea plants (*Pisum sativum* L.) to ultraviolet C (UV-C) irradiation and cytokinin benzylaminopurine (BAP) treatment on changes in shoot and root growth, hydrogen peroxide (HP) and photosynthetic pigments content in leaves was studied. ***Methods.*** Pea plants cultivar Aronis were irradiated by UV-C at a dose of 10 kJ/m^2 with a power of 7 W/m^2. Group of the non-irradiated plants and group of UV-C irradiated plants were treated by BAP in concentration 10^{-5} M in 24 hours after UV-C exposure. Length and mass of shoots and roots were measured, sampling to determine content of photosynthetic pigments and HP in leaves were carried out during the experiment. ***Results.*** It was found that UV-C radiation stopped pea plants growth, increased content of HP, reduced content of carotenoids and chlorophylls in the leaves. Treatment of plants with BAP after UV-C irradiation increased the restoration of photosynthetic pigments and stopped growth of HP content in the leaves. ***Conclusions***. It was shown that the irradiation of pea plants with UV-C at a dose of 10 kJ/m^2 stopped growth of shoots and roots, reduced content of photosynthetic pigments, increased content of HP in leaves. BAP treatment after irradiation of plants increased restoration of photosynthetic pigment content and stopped growth of HP content in leaves.

Keywords: UV-C, *Pisum sativum* L., BAP, growth, hydrogen peroxide, photosynthetic pigments.

Надходження статті: 30 квітня 2026 р.
Прийняття до друку після рецензування: 15 червня 2026 р.
Публікація: 30 листопада 2026 р.