

В. В. Жук*, О. М. Міхєєв, Л. Г. Овсяннікова

Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: vzhukv@gmail.comВПЛИВ ОПРОМІНЕННЯ НАСІННЯ ГОРОХУ РЕНТГЕНІВСЬКОЮ РАДІАЦІЄЮ
НА ВИТРИВАЛІСТЬ РОСЛИН ДО ДІЇ УФ-С

Досліджено вплив рентгенівського опромінювання насіння гороху в дозі 20 Гр на витривалість рослин гороху до опромінення УФ-С в дозі 5 кДж/м². Виявлено, що опромінення рентгенівськими променями насіння стимулювало ріст рослин, знижувало вплив УФ-С на вирощені з нього рослини, стимулювало відновлення пігментного комплексу листків, прискорювало утилізацію надлишку H₂O₂ у листках. Показано, що дія рентгенівських променів на насіння гороху достовірно зменшувала деструктивний вплив високоенергетичного ультрафіолету на рослини гороху. Опромінення сухого насіння гороху рентгенівськими променями стимулювало захисні механізми, що посилювало витривалість рослин до дії УФ-С.

Ключові слова: горох, рентгенівське опромінення, УФ-С, фотосинтетичні пігменти, H₂O₂.

1. Вступ

Опромінення рослин і насіння високоенергетичними променями набуває все більшого розповсюдження у біотехнологіях [1]. Рентгенівська радіація здатна глибоко проникати у тканини і структури біологічних об'єктів, іонізуючи атоми і молекули на своєму шляху, спричиняти утворення вільних радикалів, активних форм кисню, викликати зміни метаболізму [2]. Низькі дози іонізуючої радіації виявляють стимулюючий ефект на проростання насіння, який пов'язують з активацією синтезу ауксину, процесів репарації ДНК, антиоксидантних систем [3]. Передпосівна обробка насіння низькими дозами рентгенівської радіації здатна підвищувати його схожість, стимулювати ріст проростків. Встановлено, що опромінення сухого насіння ромашки лікарської (*Matricaria chamomilla* L.) рентгенівськими променями спричиняло нестабільність геному, зміни в експресії генів у клітинах листків рослин, вирощених з цього насіння [4, 5]. Адаптивна відповідь рослин на окисний стрес, який спричинила іонізуюча радіація, призвела до збільшення вмісту антиоксидантів фенолів і флавоноїдів у суцвіттах, стимуляції цвітіння [6]. Для опромінення біологічних об'єктів також використовують УФ-С, який випромінює кванти високої енергії, однак їхня проникна здатність нижча, ніж у рентгенівських променів [1]. Кванти УФ-С абсорбуються вуглеводними зв'язками органічних молекул, що спричиняє утворення піримідинових димерів, деструкцію білків, нуклеїнових кислот, мітохондрій, мембран [7]. У зелених рослин кванти УФ-С проникають у клітини

листяного епідермісу, продихів, руйнують тилакоїди та ламели хлоропластів, пригнічують біосинтез протохлорофіліду і хлорофілу, цикл Кальвіна, дестабілізують транспорт електронів, що призводить до утворення надмірних кількостей H₂O₂ [8]. Опромінення УФ-С насіння ромашки лікарської змінило експресію генів у листках рослин, вирощених з цього насіння, стимулювало утворення суцвіть і синтез вторинних метаболітів фенольного типу в них [9, 10]. Виявлено відмінності у реакції генотипів ромашки на опромінення насіння рентгенівською або УФ-С радіацією, які полягали у різній стимуляції синтезу флавоноїдних антиоксидантів [11]. Встановлено, що опромінення рослин гороху УФ-С в дозі 15 кДж/м² на вегетативній стадії росту викликало незворотне пригнічення росту пагонів, зменшення вмісту фотосинтетичних пігментів у листках [12]. Використання цитокініну бензиламінопурину для обробки рослин після їхнього опромінення УФ-С сприяло відновленню вмісту фотосинтетичних пігментів у листках, але не росту пагонів. Деструктивна дія високої дози УФ-С, очевидно, спричинила загибель верхівкової меристеми, що могло призвести до зупинки подальшого росту та розвитку рослин.

Метою наших досліджень було вивчення впливу опромінення насіння гороху рентгенівською радіацією на витривалість рослин до дії УФ-С опромінення на рослини.

2. Матеріали та методи досліджень

Об'єктом дослідження був горох посівний (*Pisum sativum* L.) сорту Ароніс селекції ННЦ

© Автор(и), 2025

Стаття опублікована ІЯД НАН України за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC 4.0

Інституту землеробства НААН України. Опромінення насіння здійснювали на рентгенівській установці РУМ-17 Національного інституту раку при дозі 20 Гр, потужності дози 1,42 сГр/с, напрузі 200 кВ, струмі 10 мА та з мідним фільтром товщиною 0,5 мм. З опроміненого і неопроміненого насіння вирощували рослини в умовах водної культури. Режим освітлення становив 14 год світла інтенсивністю 4,4 кЛк і 10 год темряви. На 14-ту добу, у фазі трьох листків, було проведено опромінення частини рослин, вирощених з насіння, попередньо опроміненого та неопроміненого рентгенівським випромінюванням, УФ-С у дозі 5 кДж/м² при потужності 7 Вт/м² на установці ОБМ-150 М (Україна) з двома лампами Philips Special TUV 30 W 253.

Протягом дослідження вимірювали довжину (см) та масу пагонів і коренів (г). Для визначення вмісту фотосинтетичних пігментів усереднену наважку з трьох листків гомогенізували у 96 % етиловому спирті, після чого центрифугували протягом 10 хв при 12000 g. Оптичну густину супернатанту вимірювали на спектрофотометрі

Shimadzu UV-1280 (Японія) у кварцовій кюветі з довжиною оптичного шляху 10 мм при довжинах хвиль 470, 648,6 та 664,2 нм відносно станолу. Вміст пігментів обчислювали у мг/г [13]. Для визначення H₂O₂ усереднену наважку з трьох листків гомогенізували з 50 ммоль калій-фосфатним буфером (pH = 6,5), центрифугували 10 хв при 12000 g, до супернатанту додавали 0,1 % розчин Ti₂(SO₄)₃ у 20 % H₂SO₄, центрифугували, вимірювали оптичну густину супернатанту на спектрофотометрі при довжині хвилі 410 нм проти буферу та перераховували з урахуванням коефіцієнту екстинкції 0,28 мкмоль⁻¹см⁻¹ в мкмоль/г [14].

Повторність дослідів триразова. Результати оброблено з використанням однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA).

3. Результати та обговорення

Установлено, що опромінення насіння гороху рентгенівськими променями в дозі 20 Гр стимулювало ріст пагонів у рослин, вирощених з цього насіння (рис. 1).

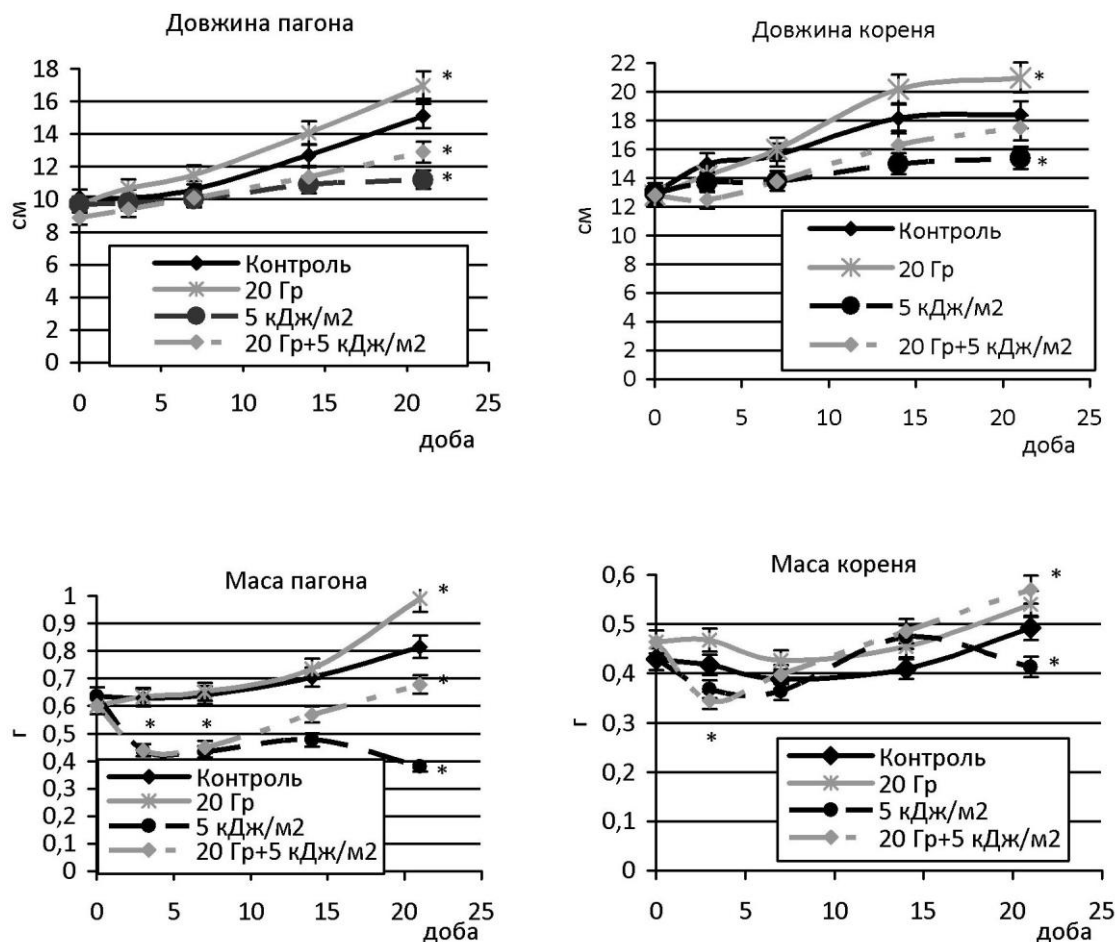


Рис. 1. Вплив опромінення рослин гороху УФ-С у дозі 5 кДж/м², вирощених з неопроміненого та опроміненого рентгенівськими променями у дозі 20 Гр насіння, на довжину (см) та масу сирової речовини пагонів і коренів (г). Довірчий інтервал P = 0,95. *Статистично достовірна різниця відносно контролю. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Наприкінці досліду довжина пагонів цих рослин була більшою, ніж у рослин контролю на 13 %. Опромінення рослин, вирощених з неопроміненого насіння, УФ-С в дозі 5 кДж/м² гальмувало ріст пагонів у довжину протягом 21 доби після його дії, що призвело до зменшення його довжини на 30 % порівняно з контролем. Дія УФ-С на рослини, вирощені з насіння, опроміненого рентгенівськими променями, гальмувала ріст пагонів у довжину, однак він поступово відновлювався, хоча і відстав від росту рослин контролю на 15 %.

Опромінення насіння гороху рентгенівськими променями також стимулювало ріст коренів у рослин, вирощених з цього насіння. Наприкінці досліду довжина коренів цих рослин перевищувала довжину коренів рослин контролю на 14 %. Опромінення УФ-С рослин, вирощених з неопроміненого насіння, пригнічувало ріст коренів у довжину на 16 %. Ріст коренів рослин, вирощених з насіння, опроміненого рентгенівськими променями та додатково підданих дії УФ-С, спочатку пригнічувався, проте згодом відновлювався, і через 21 добу довжина їхніх коренів досягала рівня контрольних рослин. Маса пагонів рослин, вирощених з опроміненого рентгенівськими променями насіння, наприкінці досліду перевищила масу пагонів рослин кон-

тролю на 22 %. Дія УФ-С на рослини, вирощені з неопроміненого насіння, спричинила гальмування наростання маси пагонів, яка наприкінці досліду була в 2 рази меншою, ніж у рослин контролю. Опромінення УФ-С рослин, вирощених з опроміненого рентгенівськими променями насіння, призвело до зниження маси пагонів на 30 %, через 7 діб, після чого маса пагонів таких рослин зросла, але до кінця досліду залишилася меншою на 17 %, ніж у рослин контролю. Опромінення насіння гороху рентгенівськими променями стимулювало наростання маси коренів у рослин, вирощених з нього. Дія УФ-С на рослини, вирощені з неопроміненого насіння, затримала ріст маси коренів протягом 7 діб і наприкінці досліду була на 15 % меншою, ніж у контрольних рослин. Наростання маси коренів у рослин, вирощених з насіння, опроміненого рентгенівськими променями та додатково УФ-С, протягом перших трьох діб затримувалося на 18 %, після чого прискорювалося і перевищувало масу коренів контрольних рослин на 16 %.

Показано, що опромінення насіння гороху рентгенівськими променями в дозі 20 Гр спричинило зростання вмісту H₂O₂ у листках рослин у 1,4 раза більше за контроль на 7-му добу, у 2 рази на 14-ту добу, у 1,4 раза на 21-шу добу спостереження (рис. 2).

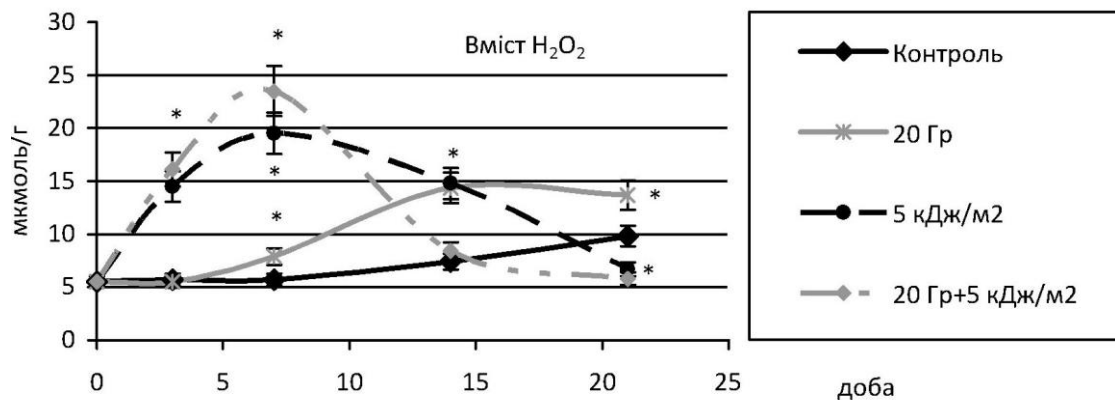


Рис. 2. Вплив опромінення рослин гороху УФ-С у дозі 5 кДж/м², вирощених з неопроміненого та опроміненого рентгенівськими променями у дозі 20 Гр насіння, на вміст H₂O₂ (мкмоль/г) у листках. Довірчий інтервал P = 0,95. *Статистично достовірні різниці відносно контролю. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Опромінення УФ-С рослин, вирощених з неопроміненого насіння, спричинило збільшення вмісту H₂O₂ у листках на 7-му добу після його дії у 3 рази порівняно з відповідними значеннями у рослин контролю. Протягом наступних 14 діб після опромінення УФ-С вміст H₂O₂ у листках цих рослин знижувався і був на 33 % нижчим порівняно з контрольними рослинами. Дія УФ-С на рослини, вирощені з опроміненого рентгенівськими променями насіння, призвела до збільшення вмісту H₂O₂ у листках на 7-му добу після

їхнього опромінення УФ-С у 4 рази порівняно зі значеннями контролю. Протягом наступних 14 діб вміст H₂O₂ у листках рослин цього варіанту досліду знизився і був на 40 % нижче відповідних значень контролю.

Показано менший вміст хлорофілу *a* у листках гороху, вирощеного з опроміненого рентгенівськими променями насіння на 17 % порівняно з контрольним варіантом протягом перших 3 діб спостереження, однак у подальшому він зростав і досягав рівнів контролю (рис. 3).

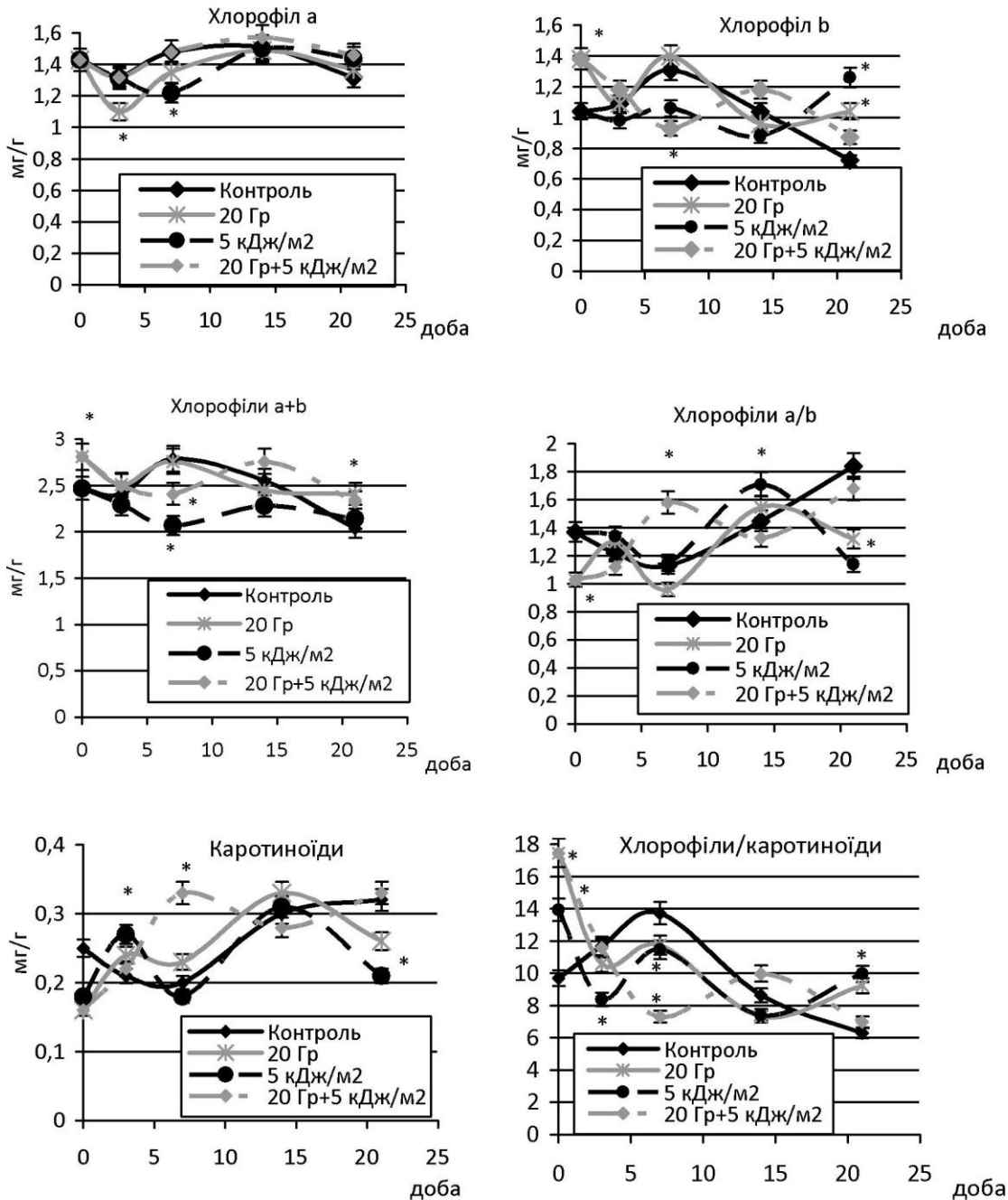


Рис. 3. Вплив опромінення рослин гороху УФ-С у дозі 5 кДж/м², вирощених з неопроміненого та опроміненого рентгенівськими променями у дозі 20 Гр насіння, на вміст фотосинтетичних пігментів (мг/г) у листках. Довірчий інтервал $P = 0,95$. *Статистично достовірна різниця відносно контролю. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Опромінення УФ-С рослин, вирощених з неопроміненого насіння, призвело до зниження вмісту хлорофілу *a* у листках протягом 7 діб на 18 %, після чого наступні 7 діб його вміст зростає і досягнув рівнів контролю. У рослин, вирощених із насіння, опроміненого рентгенівськими променями та додатково підданих дії УФ-С, вміст хлорофілу *a* у листках достовірно не відрізнявся від контрольних рослин. Вміст хлорофілу *b* у листках рослин, вирощених з опроміненого рентгенівськими променями насіння, був

вищий на початку спостереження на 32 % і до кінця спостереження та був на 44 % вищим, ніж у контрольних рослин. Опромінення УФ-С рослин, вирощених із неопроміненого насіння, спричинило зниження вмісту хлорофілу *b* у листках протягом перших 7 діб на 19 %, після чого його кількість зростає і на 21-шу добу майже вдвічі перевищувала показники контролю. Опромінення УФ-С рослин, вирощених з опроміненого рентгенівськими променями насіння, призвело до зменшення вмісту хлорофілу *b* на

7-му добу після дії ультрафіолету на 28 % порівняно зі значеннями контролю. Протягом наступних 7 діб дослідів вміст хлорофілу *b* у листках збільшився і на 20 % перевищив відповідні значення контролю. Сумарний вміст хлорофілів у листках рослин, вирощених з опроміненого рентгенівськими променями насіння, був на 18 % вищим від контрольного рівня за рахунок збільшення вмісту хлорофілу *b*. Опромінення УФ-С рослин, вирощених з неопроміненого насіння, призвело до зменшення вмісту суми хлорофілів протягом 7 діб на 25 % з поступовим досягненням контрольного рівня. Дія УФ-С на рослини, вирощені з опроміненого рентгенівськими променями насіння, призвела до зменшення вмісту суми хлорофілів до 7-ї доби дослідів на 14 %. До 21-ї доби після дії УФ-С на рослини вміст суми хлорофілів у цьому варіанті дослідів зростав і залишився вищим за рівень контролю на 18 % до кінця дослідів внаслідок поступової заміни верхніх опромінених листків на нові.

У листках рослин, вирощених з опроміненого рентгенівськими променями насіння, співвідношення хлорофілів *a/b* було нижчим за контроль на 25 % за рахунок зростання вмісту хлорофілу *b*. Після опромінення УФ-С рослин, вирощених із неопроміненого насіння, співвідношення хлорофілів *a/b* протягом перших 14 діб збільшувалося на 18 % порівняно з контролем, що зумовлено зниженням вмісту хлорофілу *b* в опромінених листках. Надалі співвідношення зменшувалося на третину нижче рівня контролю внаслідок підвищення вмісту хлорофілу *b* у нових листках, які замінили пошкоджені. Опромінення УФ-С рослин, вирощених з опроміненого рентгенівськими променями насіння, призвело до підвищення співвідношення хлорофілів *a/b* протягом 7 діб на 40 % внаслідок зниження вмісту хлорофілу *b* з поступовим відновленням до контрольного рівня до кінця дослідів за рахунок підвищення вмісту хлорофілу *a*. Вміст каротиноїдів у листках рослин, вирощених з опроміненого рентгенівськими променями насіння, був нижчим на 30 %, ніж у листках рослин контрольного варіанту. Опромінення УФ-С рослин, вирощених з неопроміненого насіння, призвело до збільшення вмісту каротиноїдів у листках протягом 3 діб на 30 % з подальшим зниженням на 35 % відносно контролю до кінця дослідів. Дія УФ-С на рослини, вирощені з опроміненого рентгенівськими променями насіння, призвела до зростання вмісту каротиноїдів у листках протягом 7 діб дослідів до рівня, вищого на 65 %

порівняно з контролем. До кінця дослідів вміст каротиноїдів у листках таких рослин був близьким до значень контролю. У рослин, вирощених з опроміненого насіння, співвідношення хлорофілів і каротиноїдів було вищим у 1,5 - 2 рази за контрольний рівень внаслідок зростання вмісту хлорофілів. Після опромінення УФ-С рослин гороху, вирощених з неопроміненого насіння співвідношення хлорофілів і каротиноїдів протягом 7 діб було нижчим за контрольний рівень переважно за рахунок зниження вмісту хлорофілів у опромінених листках. До 21-ї доби співвідношення перевищило контрольний рівень за рахунок зменшення вмісту каротиноїдів. На 7-му добу від початку вимірювань співвідношення хлорофілів до каротиноїдів продовжувало знижуватись у листках рослин, вирощених з опроміненого рентгенівськими променями насіння і опромінених УФ-С за рахунок поступового зниження вмісту хлорофілів і зростання вмісту каротиноїдів. До кінця дослідів співвідношення хлорофілів до каротиноїдів у цьому варіанті зростало за рахунок підвищення вмісту хлорофілів і відновлювалося до рівнів контролю.

Показано, що опромінення рентгенівськими променями сухого насіння гороху у дозі 20 Гр стимулювало ріст рослин, що з нього вирости, підвищувало вміст фотосинтетичних пігментів у листках. Пригнічення росту рослин гороху після їхнього опромінення УФ-С спричинено деструктивною дією на верхівкові меристеми, клітини яких втрачали здатність до проліферації, а також зниженням продуктивності фотосинтезу через деструкцію пігментного комплексу фотосинтетичного апарату. Зростання вмісту H_2O_2 у листках рослин, вирощених з опроміненого рентгенівськими променями насіння, зумовлене стимуляцією активності фотосинтетичного апарату, який є його основним джерелом [15]. Відомо, що в оптимальних кількостях H_2O_2 виконує у рослин сигнальні функції, регулює рухи замикальних клітин продихів у дводольних. H_2O_2 належить до найбільш довгоживучих і розповсюджених активних форм кисню у рослин, здатен транспортуватися на великі відстані по аквапоринових каналах і передавати сигнали про зміни у рослині та навколишньому середовищі, у відповідь на які модифікуються метаболічні процеси [16, 17]. Дестабілізація роботи фотосинтетичного апарату в стресових умовах спричиняє диспропорцію у генерації H_2O_2 і його утилізації [18]. Опромінення УФ-С рослин гороху призвело до деструкції фотосинтетичного комплексу, про що свідчать

зміни вмісту пігментів, а також спричинило різке підвищення концентрації H_2O_2 у листках. Опромінення насіння гороху рентгенівськими променями активізувало метаболізм у рослин, які з них вирощені, що сприяло утилізації H_2O_2 після опромінення рослин УФ-С. Отже, опромінення насіння гороху рентгенівською радіацією у дозі 20 Гр підвищувало витривалість вирощених з нього рослин до дії високоенергетичних квантів УФ-С.

4. Висновки

Установлено, що опромінення сухого насіння гороху рентгенівською радіацією у дозі 20 Гр

стимулювало ріст пагонів і коренів у довжину, наростання маси у вирощених з нього рослин гороху, зменшувало негативну дію УФ-С на ростові процеси. Показано, що опромінення насіння гороху рентгенівськими променями прискорювало утилізацію надлишку H_2O_2 у листках рослин після їхнього опромінення УФ-С у дозі 5 кДж/м², що призвело до зниження вмісту H_2O_2 у листках гороху. Продемонстровано, що опромінення насіння рентгенівськими променями стимулювало відновлення пігментного комплексу листків після дії УФ-С, знижувало його деструктивний вплив, підвищувало витривалість рослин до опромінення високоенергетичним ультрафіолетом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. N.A. Zulkifli et al. Advances in irradiation technology for plant resistance: A review. *Agric. Rev.* 45(1) (2024) 25.
2. M.-A. Esnault, F. Legue, Ch. Chenal. Ionizing radiation: Advances in plant response. *Environ. Exp. Bot.* 68 (2010) 231.
3. S.S. Araújo et al. Physical methods for seed invigoration: Advantages and challenges in seed technology. *Front. Plant Sci.* 7 (2016) 646.
4. D.A. Sokolova et al. Relationship of radiation-induced genomic instability and antioxidant production in the chamomile plant. *Int. J. Radiat. Biol.* 99 (2023) 1631.
5. D. Sokolova et al. Epigenetic factors of the effect of UV-C and X-ray presowing seeds radiation exposure in *Matricaria chamomilla* L. genotypes. *Int. J. Second. Metab.* 11(2) (2024) 305.
6. В.В. Жук та ін. Стимуляція вмісту антиоксидантів у суцвіттях рослин генотипів *Matricia chamomila* L. передпосівним УФ-С та рентгенівським опроміненням насіння. *Ядерна фізика та енергетика* 22 (2021) 182. / V.V. Zhuk et al. Pre-sowing seeds stimulation by UV-C and X-ray irradiation on the content of antioxidants in inflorescence plants genotypes *Matricia chammomila* L. *Nucl. Phys. At. Energy* 22 (2021) 182. (Ukr)
7. L. Urban et al. Understanding the physiological effects of UV-C light and exploiting its agronomic potential before and after harvest. *Plant Physiol. Biochem.* 105 (2016) 1.
8. M.F.A. Dawood et al. Mechanistic insight of allantoin in protecting tomato plants against ultraviolet C stress. *Plants* 10(1) (2021) 11.
9. D.A. Sokolova et al. Involvement of UV-C-induced genomic instability in stimulation plant long-term protective reactions. *J. Plant Physiol.* 293 (2024) 154171.
10. D. Sokolova et al. Productivity of medicinal raw materials by different genotypes of *Matricia chamomila* L. is affected with pre-sowing radiation exposure of seeds. *Int. J. Second. Metab.* 8(2) (2021) 127.
11. V. Zhuk et al. 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. *Int. J. Second. Metab.* 8(3) (2021) 186.
12. В.В. Жук, О.М. Міхеев, Л.Г. Овсяннікова. Дія УФ-С-опромінення та цитокініну на рослини гороху. *Фактори експериментальної еволюції організмів* 34 (2024) 154. / V.V. Zhuk, A.N. Mikhееv, L.G. Ovsyannikova. The effect of UV-C radiation and cytokinin on pea plants. *Faktyory Eksperymentalnoi Evolucii Organizmiv* 34 (2024) 154. (Ukr)
13. H.K. Lichtenthaler. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods Enzymol.* 148 (1987) 350.
14. L.-M. Chen, C.-H. Kao. Effect of excess copper on rice leaves: evidence for involvement of lipid peroxidation. *Bot. Bull. Acad. Sin.* 40 (1999) 283.
15. S. Khorobrykh et al. Oxygen and ROS in photosynthesis. *Plants* 9 (2020) 91.
16. S. Neil, R. Desican, J. Hancock. Hydrogen peroxide signaling. *Curr. Opin. Plant Biol.* 5 (2002) 388.
17. M. Sierla et al. Reactive oxygen species in the regulation of stomatal movements. *Plant Physiol.* 171 (2016) 1569.
18. A. Sharma et al. Photosynthetic response of plants under different abiotic stresses: A review. *J. Plant Growth Regul.* 39 (2020) 509.

V. V. Zhuk*, O. M. Mikheev, L. G. Ovsyannikova

Institute of Cell Biology and Genetic Engineering, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: vzhukv@gmail.com

**EFFECT OF X-RAY IRRADIATION OF PEA SEEDS
ON PLANT RESISTANCE TO UV-C**

The effect of X-ray irradiation of pea seeds at a dose of 20 Gy on the endurance of pea plants to UV-C irradiation at a dose of 5 kJ/m² was studied. It was shown that X-ray irradiation of seeds stimulated plant growth, reduced the effect of UV-C on the plants grown, pigment complex of leaves, stimulated its recovery, and accelerated the utilization of excess H₂O₂ in leaves. It was shown that the effect of X-rays on pea seeds significantly reduced the destructive effect of high-energy ultraviolet radiation on pea plants. Irradiation of dry pea seeds with X-rays stimulated defense mechanisms that increased the resistance of plants to UV-C.

Keywords: pea, X-ray irradiation, UV-C, photosynthetic pigments, H₂O₂.

Надійшла / Received 17.06.2025