

АНАЛІЗ СОЛЕСТІЙКОСТІ ЗА ВПЛИВУ ХЛОРИДУ НАТРІЮ НА КАЛЮСНУ ТКАНИНУ РИЖІЮ ПОСІВНОГО

А. І. ЛЮБЧЕНКО, кандидат сільськогосподарських наук
І. О. ЛЮБЧЕНКО, кандидат сільськогосподарських наук
Л. О. РЯБОВОЛ, доктор сільськогосподарських наук
О. П. СЕРЖУК, кандидат сільськогосподарських наук
Уманський національний університет садівництва

Наведено результати досліджень з аналізу впливу хлориду натрію на калюсну тканину рижію посівного сортів Євро 12, Клондайк, Перемога та Степовий 1. Селективний чинник додавали у концентраціях 0,25, 0,5, 0,75, 1,0, 1,25, 1,5 % до модифікованого живильного середовища за прописом Мурасіге-Скуга. У кінці субкультивування визначали життєздатність мікрокалюсів, інтенсивність проліферації та морфогенні характеристики біоматеріалів. Встановлено, стресовий вплив хлориду натрію на калюсну тканину рижію посівного. Хлоридне засолення впливає на життєздатність мікрокалюсів, активність проліферації та збереження морфогенної активності. Концентрація NaCl на рівні 1,0–1,25 % є оптимальною для ранжування генотипів за рівнем солестійкості та проведення клітинної селекції культури на солестійкість. Найвищу стійкість до хлоридного засолення відмічено у мікрокалюсів отриманих з сортів Перемога та Степовий 1.

Ключові слова: рижій посівний, сорт, сольовий стрес, хлорид натрію, калюс, культура *in vitro*

Вступ. Одним із найшкодочинніших стресових чинників навколишнього природного середовища є засолення ґрунту, що зумовлене наявністю в ґрунтово-вбирному комплексі високих концентрацій розчинів солей. Засолення викликає погіршення агрофізичних та агрохімічних властивостей ґрунту, знижує життєздатність і продуктивність рослин. Ведення рослинництва на засолених ґрунтах потребує застосування комплексу меліоративних і господарсько-організаційних заходів. Вирощування солестійких сортів є основною умовою отримання стабільних врожаїв сільськогосподарських культур у таких регіонах. Залучення біотехнологічної ланки в селекційний процес створення солестійких сортів суттєво підвищує ефективність отримання генотипів з бажаними ознаками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Засолення є глобальною проблемою світового землеробства. Загальна площа ґрунтів, які піддаються впливу засолення становить 17 млн км², з яких до 2 млн км² мають критично високий рівень засолення понад 4 dS/m [1]. В Україні налічується 1,92 млн га засолених ґрунтів і 2,8 млн га – солонцевих [2].

Засолення ґрунтів зумовлюється природними (посушливий клімат, неглибоке залягання мінералізованих ґрунтових вод та їх капілярне підняття,

наявність соленосних материнських порід тощо) та антропогенними (нераціональне зрошення, недостатній дренаж та підвищення рівня ґрунтових вод, надмірне внесення мінеральних добрив тощо) чинниками [2].

Фізіологічний вплив засолення проявляється у сповільненні розтягування клітин, зниженні фотосинтетичної активності, порушеннях функціонування мембран, пригніченні метаболізму та прискоренні розвитку окислювального стресу, що загалом пригнічує ріст, розвиток і продуктивність рослин [3, 4]. У відповідь на сольовий стрес рослини виробили різноманітні механізми адаптації, зокрема регуляцію іонного гомеостазу, компартменталізацію та виведення іонів, біосинтез осмопротекторів тощо [5–7].

Залежно від хімічного складу солей, що переважають у ґрунті, розрізняють хлоридне, сульфатне та карбонатне засолення. Кожен з типів засолення характеризується специфічним стресовим впливом. Найпоширенішим є хлоридне засолення головним компонентом якого є хлорид натрію (NaCl) – високорозчинна дуже токсична для рослини сіль [7].

Хлоридне засолення призводить до підвищення осмотичного тиску ґрунтового розчину, внаслідок чого вода стає менш доступною для рослини. Воно погіршує структуру ґрунту, спричиняє його ущільнення та знижує водопроникність та аерацію. Надлишок іонів хлору і натрію підвищує токсичність ґрунтового середовища та пригнічує діяльність корисних мікроорганізмів. Окрім сольового та осмотичного стресу, хлорид здатен акумулюватись у тканинах, викликати опіки, крайовий некроз, передчасне пожовтіння та опадання листків. В умовах хлоридного засолення порушується мінеральне живлення, знижується інтенсивність фотосинтезу, ріст та розвиток рослини, що призводить зменшення врожайності посівів сільськогосподарських культур [8–10].

Рижій посівний – перспективна олійна культура. Його олія придатна для харчування та завдяки специфічному біохімічному складу має лікувальні та дієтичні властивості [11, 12]. Вона є цінною сировиною для виробництва паливо-мастильних матеріалів, пластмаси, фарби, лаку миючих засобів тощо [13, 14]. Рижій – невибаглива до умов вирощування рослина, що має високу стійкість до хвороб та шкідників. Завдяки чому культуру можна вирощувати за енергоощадних екстенсивних технологій та на малопродатних для аграрного виробництва землях [15]. У процесі аналізу фізіологічного впливу засолення на рослину, ранжування сортів за рівнем солестійкості та створення стійких генотипів рижію було встановлено значний вплив генотипу [16–19]. Це й спонукало нас до проведення досліджень з цього напрямку.

Метою досліджень було аналіз стресового впливу хлориду натрію на калюсну культуру рижію посівного.

Методика досліджень. Дослідження проводили в навчально-науковій лабораторії «Біотехнології» Уманського національного університету. Для створення селективної системи *in vitro* до живильного середовища за прописом Мурасіге-Скуга додавали хлорид натрію (NaCl) в концентраціях 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25 та 1,5 %. У роботі використовували морфогенну калюсну тканину рижію посівного сортів Євро 12, Клондайк, Перемога, Степовий 1. У кожному

варіанти досліджень висаджували 50 мікрокалюсів. Повторність досліду чотириразова. Культивування біоматеріалу проводили за температурного режиму 24–25 °С, відносній вологості повітря 75 % та 16-годинному фотоперіоді. У кінці пасажу визначали життєздатність мікрокалюсів, інтенсивність росту та морфогенні характеристики індукованого біоматеріалу.

Для визначення інтенсивності наростання калюсів, біоматеріал зважували на початку та в кінці кожного пасажу. Інтенсивність наростання вираховували за формулою:

$$\Delta W = \frac{W_t - W_0}{W_0},$$

де ΔW – відносний приріст біомаси; W_0 – початкова маса калюсу; W_t – кінцева маса калюсу [20].

На основі отриманих даних визначали індекс чутливості до стресу (Stress Susceptibility Index):

$$SSI = (1 - Y_s/Y_c)/(1 - Y'_s/Y'_c), \text{ де}$$

Y_c – виживання калюсів у контролі;

Y_s – виживання калюсів в умовах стресу;

Y'_c – середні за генотипами показники виживання калюсів на контролі;

Y'_s – середні за генотипами показники калюсів в умовах стресу [21].

Результати досліджень. У процесі досліджень встановлено, що хлорид натрію чинить виражений стресовий вплив на калюсну тканину рижію посівного (рис. 1).

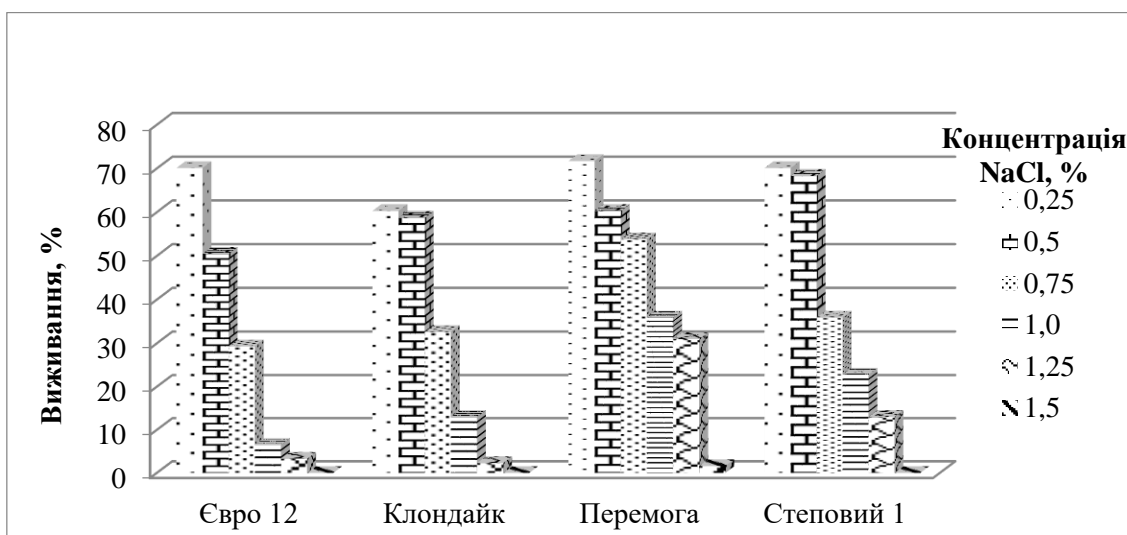


Рис. 1. Виживання мікрокалюсів рижію посівного за різних концентрацій NaCl, %

На 4–5 добу культивування в селективних умовах відмічено зниження проліфераційної активності, потемніння біомаси, порушення її структури та появу некротичних ділянок. Згодом фіксували відмирання мікрокалюсів чутливих до засолення генотипів.

За 0,25 % концентрації хлориду натрію рівень відмирання мікрокалюсів сортів Перемога, Степовий 1 та Євро 12 варіював від 28,3 до 29,9 %. У сорту Клондайк цей показник був значно вищим і становив 39,7 %. Підвищення рівня засолення до 0,5 % зумовлювало зниження виживання біоматеріалу. Для сорту Степовий 1 показник виживання мікрокалюсів становив 68,3 %, для сорту Перемога – 60,3 %, Клондайк – 58,7 %, Євро 12 – 50,5 %.

Підвищення концентрації NaCl до 0,75 % знижувало частку виживання калюсних тканину сорту Степовий 1 до 35,9 %, Клондайк – до 32,6 %, Євро 12 – до 29,3 %. Біоматеріали сорту Перемога за цих стресових умов зберігали життєздатність на рівні 53,8 %. Підвищення концентрації селективного чинника понад 1,0 % дало змогу диференціювати генотипи за рівнем стійкості до хлоридного засолення. Життєздатність калюсів сортів Перемога і Степовий 1 становила відповідно 35,9 % і 22,8 %, натомість у сортів Євро 12 і Клондайк цей показник знижувався до 6,5 % і 13,0 %.

Граничним рівнем солестійкості для калюсних тканин сортів Клондайк, Євро 12 і Степовий 1 зафіксовано концентрацію 1,25 %, за якої виживання експлантів становило відповідно 2,3 %, 3,3 % і 13,0 %. Найвищу стійкість продемонстрував сорт Перемога. За 1,25 % NaCl життєздатність калюсів зберігалася на рівні 31,0 %, натомість за 1,5 % рівня засолення – лише на 1,6 %.

Одним з показників рівень стійкості генотипів до дії селективного чинника є різниця між приростом біомаси в умовах контрольного варіанту із селективним чинником. Сорти рижію посівного відрізнялися за інтенсивністю проліферації калюсної маси (рис. 2).

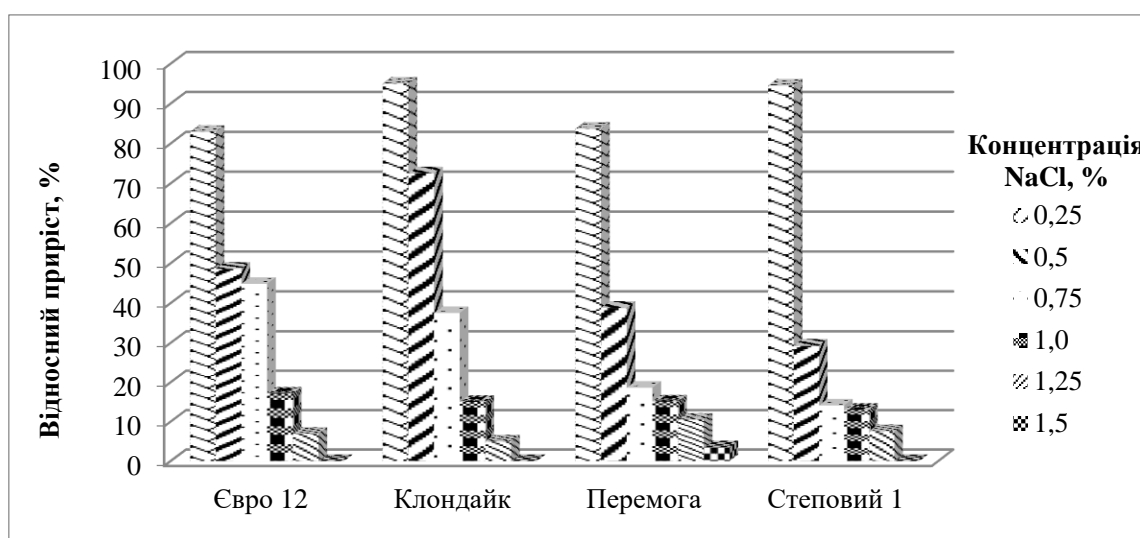


Рис. 2. Приріст калюсної тканини рижію посівного за різних концентрацій NaCl відносно контролю, %

Найвищі ростові показники калюсної маси зафіксовано у сортів Степовий 1 і Перемога. Відносний приріст біомаси відповідно становив 9,2 та 8,6 пункти. У сортів Євро 12 і Клондайк ці значення були значно нижчими – 3,5 і 4,0 пункти відповідно. За 0,25 % концентрації засолення живильного середовища

інтенсивність калюсогенезу, залежно від генотипу, знижувалася на 5,0–17,1 %. Більшість мікрокалюсів зберігали морфогенні характеристики на високому рівні.

Відносний приріст біомаси досліджуваних генотипів за концентрації NaCl 0,5 % варіював у межах 1,7–3,1 пункти. Найбільше зниження проліфераційної активності порівняно з контролем відмічено в сорту Степовий 1 (на 70,7 %), а найменше – у сорту Клондайк (на 27,5 %). Загалом понад 60 % поверхні калюсних тканин мала світло-жовтий колір і структуровану консистенцію.

Підвищення концентрації хлориду натрію до 0,75 % знижувало інтенсивність приросту біомаси на 55,2–85,9 % та фіксували значне зниження регенераційної здатності. Відносний приріст мікрокалюсів у сортів Степовий 1 і Євро 12 становив 1,3 пункти, у сорту Клондайк – 1,5, а у сорту Перемога – 1,6 пункти. За 1,0 % рівня засолення відмічено значне гальмування ростової активності калюсної тканини. Відносний приріст біомаси досліджуваних генотипів становив 13,0–17,1 % від контролю. Мікрокалюси характеризувалися низькою регенераційною здатністю. Тканина втрачала структурованість, а частка меристематично активних зон не перевищувала 10 % поверхні експлантів.

За 1,25 % концентрації NaCl відмічалось різке пригнічення проліферації та морфогенезу калюсної тканини. Інтенсивність приросту біомаси зменшувалася на 89,5–95,0 %. У сортів Євро 12 і Клондайк відносний приріст був незначним (0,2 пункти), натомість у сортів Степовий 1 і Перемога – 0,7 і 0,9 пункти відповідно. За максимального рівня засолення (1,5 %) лише незначна частина мікрокалюсів сорту Перемога зберігала здатність до проліферації, при цьому приріст біомаси становив 3,5 % від контролю, а калюсна тканина мала низькі морфогенні характеристики.

В адаптивній селекції для оцінки реакції генотипів на несприятливі умови використовують індекси стресостійкості. Вони базуються на порівнянні значень досліджуваної ознаки (продуктивність, збереженість, приріст біомаси) у контрольних і стресових умовах. Такі індекси дають змогу не лише визначити ступінь пригнічення ростових процесів, а й виділити генотипи з підвищеною стійкістю до стресора. Назважаючи на те, що індекси стійкості до стресу було відпрацьовано для польових досліджень, їх було використано за роботи з біооб'єктами в умовах *in vitro* [22].

Для оцінки ступеня зниження продуктивності або життєздатності генотипу під впливом стресового чинника відносно середньої реакції всіх досліджуваних зразків визначають індекс чутливості до стресору (SSI). Цей показник відтворює відносне зниження досліджуваної ознаки в умовах стресу порівняно з оптимальними умовами вирощування, нормовану на загальний рівень стресового впливу в експерименті. Значення SSI менше одиниці свідчить про підвищену стійкість генотипу до дії стресового чинника, оскільки його продуктивність менше знижується, ніж у середньому за вибіркою. Натомість значення індексу понад одиницю вказує на високу чутливість.

Отримані результати свідчать про виражену генотип-специфічну реакцію калюсної тканини рижю посівного на сольовий стрес. Найвищу чутливість до хлоридного засолення відмічено у мікрокалюсів сорту Євро 12. За 0,25 %

концентрації хлориду натрію в живильному середовищі індекс SSI становив 0,94, а за вищих концентрацій – перевищував 1.

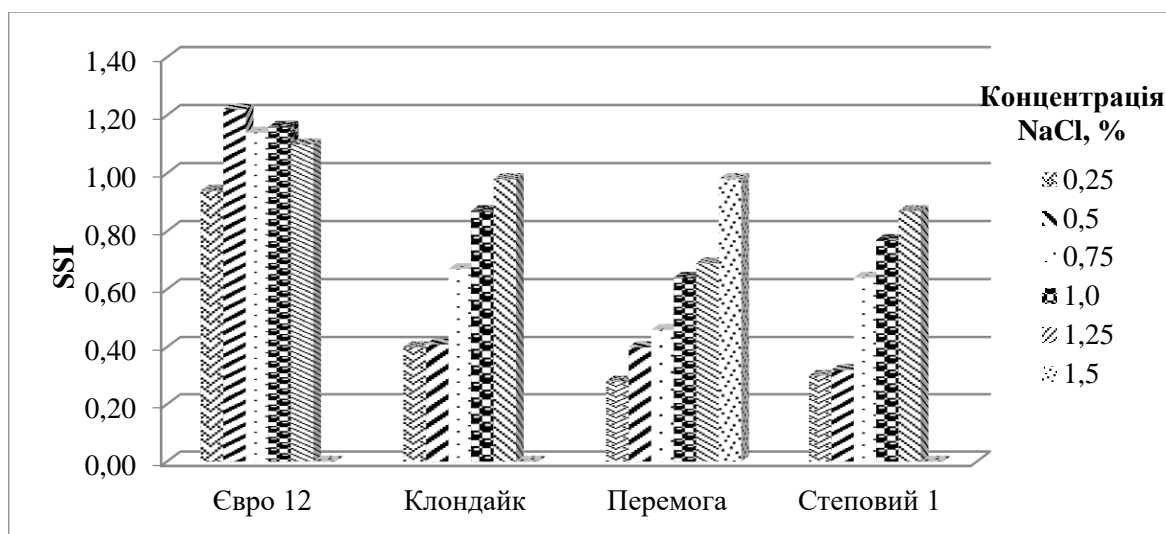


Рис. 3. Індекс чутливості до стресу рижію посівного за впливу NaCl на показник виживання мікрокалюсів.

Мінімальна концентрація селективного чинника (0,25 %) здійснювала майже рівнозначний стресовий вплив на біоматеріал сортів Перемога та Степовий 1 – індекс стресочутливості відповідно склав 0,28 і 0,30. Деяко вищий стресовий вплив вказана концентрація здійснювала на мікрокалюси сорту Клондайк – SSI становив 0,4. Зі зростанням концентрації NaCl до 0,5–0,75 % спостерігається поступове підвищення SSI для всіх досліджуваних сортів. За концентрації хлориду натрію 0,5 % у середньому за генотипами показник стресочутливості становив 0,59, а за концентрації 0,75 % – 0,73.

За вищих концентрацій NaCl (1,0–1,25) у більшості генотипів спостерігається подальше збільшення показника SSI. Для сорту Клондайк індекс стресового впливу становив відповідно 0,87 та 0,98, для сорту Степовий 1 – 0,77 та 0,87, для сорту Перемога – 0,64 та 0,69. За 1,5 % концентрації селективного чинника життєздатність зберігали лише мікрокалюси сорту Перемога, при цьому стресовий вплив на генотип підвищувався до показника 0,98.

Висновки. Хлоридне засолення впливає на життєздатність мікрокалюсів, активність проліферації та збереження морфогенної активності калусної тканини рижію посівного. Концентрація NaCl на рівні 1,0–1,25 % є оптимальною для ранжування генотипів за рівнем солестійкості та ведення клітинної селекції культури на солестійкість. Найвищу стійкість до хлоридного засолення відмічено у мікрокалюсів отриманих з сортів Перемога та Степовий 1.

Література:

1. Negacz K., Malek Ž., de Vos A., Vellinga P. Saline soils worldwide: Identifying the most promising areas for saline agriculture. *Journal of Arid Environments*. 2022. Vol. 203. 104775. DOI.10.1016/j.jaridenv.2022.104775.

2. Балюк С. А., Медведєв В. В., Мірошніченко М. М., Скрильник Є. В., Тимченко Д. О., Фатєєв А. І., Христенко А. О., Цапко Ю. Л. Екологічний стан ґрунтів України. *Український географічний журнал*. 2012. № 2. С. 38–42.
3. Volkov V. Salinity tolerance in plants. Quantitative approach to ion transport starting from halophytes and stepping to genetic and protein engineering for manipulating ion fluxes. *Frontiers in Plant Science*. 2015. Vol. 6. 873. DOI:10.3389/fpls.2015.00873
4. Rahdari P., Hoseini S. M. Salinity stress. *Technical Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2011. Vol. 1. (3). P. 63–66.
5. Balasubramaniam T., Shen G., Esmaeili N., Zhang H. Plants' response mechanisms to salinity stress. *Plants*. 2023. Vol. 12. 2253. DOI:10.3390/plants1212225
6. Shams M., Khadivi A. Mechanisms of salinity tolerance and their possible application in the breeding of vegetables. *BMC Plant Biology*. 2023. Vol. 23. DOI:10.1186/s12870-023-04152-8
7. Masarmi A. G., Solouki M., Fakheri B., Kalaji H. M., Mahgdingad N., Golkari S., Telesiński A., Lamlom S. F., Kociel H., Yousef A. F. Comparing the salinity tolerance of twenty different wheat genotypes on the basis of their physiological and biochemical parameters under NaCl stress. 2023. *PLoS One*. Vol. 18. (3). DOI:10.1371/journal.pone.0282606
8. Mazhar S., Pellegrini E., Contin M., Bravo C., De Nobili M. Impacts of salinization caused by sea level rise on the biological processes of coastal soils. *Frontiers in Environmental Science*. 2022. Vol. 10. 909415. DOI:10.3389/fenvs.2022.909415
9. Carmona R., Muñoz R., Niell F. X. Differential nutrient uptake by saltmarsh plants is modified by increasing salinity. 2021. *Frontiers in Plant Science*. Vol. 12. 709453. DOI:10.3389/FPLS.2021.709453
10. Tavakkoli E., Rengasamy P., McDonald G. K. High concentrations of Na⁺ and Cl⁻ ions in soil solution have simultaneous detrimental effects on growth of faba bean under salinity stress. *Journal of Experimental Botany*. 2010. Vol. 61. (15). P. 4449–4459. DOI:10.1093/jxb/erq251
11. Faten M. I., El Habbasha S. F. Chemical composition, medicinal impacts and cultivation of camelina (*Camelina sativa*). *International Journal of PharmTech Research*. 2015. Vol. 8. (10). P. 114–122.
12. Очеретна А. В., Фролова Н. Е. Дослідження якісного складу олії рижю та перспектив її використання в дієтичному харчуванні. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського*. 2020. Т. 31. (6). С. 76–81.
13. Neupane D., Lohaus R. H., Solomon J. K. Q., Cushman J. C. Realizing the potential of *Camelina sativa* as a bioenergy crop for a changing global climate. *Plants*. 2022. Vol. 11 (6). 772. DOI:10.3390/plants11060772
14. Sainger M., Jaiwal A., Sainger P. A., Chaudhary D., Jaiwal R., Jaiwal P. K. Advances in genetic improvement of *Camelina sativa* for biofuel and industrial bio-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 68. (1). P. 623–637.
15. Zanetti F., Alberghini B., Marjanović-Jeromela A., Grahovac N., Rajković D., Kiproviski B., Monti A. Camelina, an ancient oilseed crop actively contributing to the rural renaissance in Europe. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2021. Vol. 41. (2). DOI:10.1007/s13593-020-00663-y
16. Morales D., Potlakayala S., Soliman M., Daramola J., Weeden H., Jones A., Kovak E., Lowry E., Patel P., Puthiyaparambil J., Goldman S.,

Rudrabhatla S. Effect of biochemical and physiological response to salt stress in *Camelina sativa*. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2017. Vol. 48. (7). P. 716–729. DOI:10.1080/00103624.2016.1254237

17. Vello E., Letourneau M., Aguirre J., Bureau T. E. Integrated web portal for non-destructive salt sensitivity detection of *Camelina sativa* seeds using fluorescent and visible light images coupled with machine learning algorithms. *Frontiers in Plant Science*. 2024. Vol. 14. 1303429. DOI:10.3389/fpls.2023.1303429

18. Jovičić D., Jocković J., Jeromela A. M., Zanetti F., Mastroberardino R., Nikolić Z., Ovuka J. Salinity stress tolerance in camelina: A focus on the germination stage for crop improvement. *Industrial Crops and Products*. 2025. Vol. 227. 120773. DOI:10.1016/j.indcrop.2025.120773

19. Khalid H., Kumari M., Grover A., Nasim M. (2015). Salinity stress tolerance of camelina investigated *in vitro*. *Scientia Agriculturae Bohemica*. Vol. 46. P. 224–229. DOI:10.1515/sab-2015-0028

20. Caplin S. M., Steward F. C. Effect of coconut milk on the growth of explants from carrot root. *Science*. 1948. Vol. 108. (2815). P. 655–657. DOI:10.1126/science.108.2815.655

21. Fischer R. A. Maurer R. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research*. 1978. Vol. 29. P. 897–912. DOI:10.1071/AR9780897

22. Пикало С. В., Волощук С. І. Вивчення стійкості до засолення генотипів тритикале озимого з використанням культури ізольованих мікроспор. *Физиология растений и генетика*. 2014. Т. 46. (3). С. 267–273.

References:

1. Negacz, K., Malek, Ž., de Vos, A., & Vellinga, P. (2022). Saline soils worldwide: Identifying the most promising areas for saline agriculture. *Journal of Arid Environments*, 203, 104775. doi:10.1016/j.jaridenv.2022.104775

2. Baliuk, S. A., Medvediev, V. V., Miroschnyenko, M. M., Skrylnyk, Ye. V., Tymchenko, D. O., Fatieiev, A. I., ... Tsapko, Yu. L. (2012). Ekologichnyi stan hruntiv Ukrainy [Ecological state of soils of Ukraine]. *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal*, (2), 38–42. [in Ukrainian].

3. Volkov, V. (2015). Salinity tolerance in plants. Quantitative approach to ion transport starting from halophytes and stepping to genetic and protein engineering for manipulating ion fluxes. *Frontiers in Plant Science*, 6, 873. doi:10.3389/fpls.2015.00873

4. Rahdari, P., & Hoseini, S. M. (2011). Salinity stress. *Technical Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(3), 63–66.

5. Balasubramaniam, T., Shen, G., Esmaili, N., & Zhang, H. (2023). Plants' response mechanisms to salinity stress. *Plants*, 12(12), 2253. doi:10.3390/plants12122253

6. Shams, M., & Khadivi, A. (2023). Mechanisms of salinity tolerance and their possible application in the breeding of vegetables. *BMC Plant Biology*, 23, 1–19. doi:10.1186/s12870-023-04152-8

7. Masarmi, A. G., Solouki, M., Fakheri, B., Kalaji, H. M., Mahgdingad, N., Golkari, S., Yousef, A. F. (2023). Comparing the salinity tolerance of twenty different wheat genotypes on the basis of their physiological and biochemical parameters under NaCl stress. *PLoS ONE*, 18(3), e0282606. doi:10.1371/journal.pone.0282606

8. Mazhar, S., Pellegrini, E., Contin, M., Bravo, C., & De Nobili, M. (2022). Impacts of salinization caused by sea level rise on the biological processes of coastal soils. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 909415. doi:10.3389/fenvs.2022.909415
9. Carmona, R., Muñoz, R., & Niell, F. X. (2021). Differential nutrient uptake by saltmarsh plants is modified by increasing salinity. *Frontiers in Plant Science*, 12, 709453. doi:10.3389/fpls.2021.709453
10. Tavakkoli, E., Rengasamy, P., & McDonald, G. K. (2010). High concentrations of Na⁺ and Cl⁻ ions in soil solution have simultaneous detrimental effects on growth of faba bean under salinity stress. *Journal of Experimental Botany*, 61(15), 4449–4459. doi:10.1093/jxb/erq251
11. Faten, M. I., & El Habbasha, S. F. (2015). Chemical composition, medicinal impacts and cultivation of camelina (*Camelina sativa*). *International Journal of PharmTech Research*, 8(10), 114–122.
12. Ocheretna, A. V., & Frolova, N. E. (2020). Doslidzhennia yakisnoho skladu olii ryzhiiu ta perspektyv yii vykorystannia v diietychnomu kharchuvanni [Research on the qualitative composition of camelina oil and prospects for its use in dietary nutrition]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho*, 31(6), 76–81. [in Ukrainian]
13. Neupane, D., Lohaus, R. H., Solomon, J. K. Q., & Cushman, J. C. (2022). Realizing the potential of *Camelina sativa* as a bioenergy crop for a changing global climate. *Plants*, 11(6), 772. doi:10.3390/plants11060772
14. Sainger, M., Jaiwal, A., Sainger, P. A., Chaudhary, D., Jaiwal, R., & Jaiwal, P. K. (2017). Advances in genetic improvement of *Camelina sativa* for biofuel and industrial bio-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(1), 623–637. doi:10.1016/j.rser.2016.10.023
15. Zanetti, F., Alberghini, B., Marjanović-Jeromela, A., Grahovac, N., Rajković, D., Kiprovski, B., & Monti, A. (2021). Camelina, an ancient oilseed crop actively contributing to the rural renaissance in Europe. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(2), 20. doi:10.1007/s13593-020-00663-y
16. Morales, D., Potlakayala, S., Soliman, M., Daramola, J., Weeden, H., Jones, A., Kovak, E., Lowry, E., Patel, P., Puthiyaparambil, J., Goldman, S., Rudrabhatla, S. (2017). Effect of biochemical and physiological response to salt stress in *Camelina sativa*. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(7), 716–729. doi:10.1080/00103624.2016.1254237
17. Vello, E., Letourneau, M., Aguirre, J., & Bureau, T. E. (2024). Integrated web portal for non-destructive salt sensitivity detection of *Camelina sativa* seeds using fluorescent and visible light images coupled with machine learning algorithms. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1303429. doi:10.3389/fpls.2023.1303429
18. Jovičić, D., Jocković, J., Jeromela, A. M., Zanetti, F., Mastroberardino, R., Nikolić, Z., & Ovuka, J. (2025). Salinity stress tolerance in camelina: A focus on the germination stage for crop improvement. *Industrial Crops and Products*, 227, 120773. doi:10.1016/j.indcrop.2025.120773
19. Khalid, H., Kumari, M., Grover, A., & Nasim, M. (2015). Salinity stress tolerance of camelina investigated in vitro. *Scientia Agriculturae Bohemica*, 46(4), 224–229. doi:10.1515/sab-2015-0028
20. Caplin, S. M., & Steward, F. C. (1948). Effect of coconut milk on the growth of explants from carrot root. *Science*, 108(2815), 655–657. doi:10.1126/science.108.2815.655

21. Fischer, R. A., & Maurer, R. (1978). Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29(5), 897–912. doi:10.1071/AR9780897

22. Pykalo, S. V., & Voloshchuk, S. I. (2014). Vyvchennia stiikosti do zasolennia henotypiv trytykale ozymoho z vykorystanniam kultury izolvanykh mikrosporon [Study of salt tolerance in winter triticale genotypes using isolated microspore culture]. *Fiziolohiia rastenii i henetyka*, 46(3), 267–273. [in Ukrainian].

Annotation

Liubchenko A. I., Liubchenko I. O., Riabovol L. O., Serzhuk O. P.

Analysis of salt tolerance under the influence of sodium chloride on the callus tissue of camelina sativa

One of the most harmful environmental stress factors is soil salinity, caused by the presence of high concentrations of salt solutions in the soil absorption complex. Salinization leads to deterioration of the agrophysical and agrochemical properties of the soil and reduces plant viability and productivity. Crop production on saline soils requires the implementation of a complex of reclamation and management measures. The introduction of salt-tolerant varieties is a key prerequisite for obtaining stable yields of agricultural crops in such regions. Incorporating biotechnological approaches into the breeding process for developing salt-tolerant varieties significantly increases the efficiency of creating genotypes with desirable traits.

The aim of the study was to determine the stress effect of sodium chloride on the callus culture of camelina sativa. To create an in vitro selective system, sodium chloride (NaCl) was added to the Murashige and Skoog nutrient medium at concentrations of 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, and 1.5 %. Morphogenic callus tissue of the camelina varieties Yevro 12, Klondike, Peremoha, and Stepovyi 1 was used in the study. In each experimental variant, 50 microcalli were cultured. The experiment was conducted in four replicates.

The biomaterial was cultivated at a temperature of 24–25 °C, relative air humidity of 75 %, and a 16-hour photoperiod. At the end of each passage, the viability of the microcalli, growth intensity, and morphogenic characteristics of the induced biomaterials were evaluated. Based on the obtained data, the stress susceptibility index (SSI) was determined, characterizing the viability of the genotype under stress conditions relative to the average response of all studied samples.

The conducted studies revealed the stress effect of sodium chloride on the callus tissue of camelina sativa. Chloride salinity affected the viability of microcalli, proliferation activity, and maintenance of morphogenic activity. An NaCl concentration of 1.0–1.25 % was found to be optimal for ranking genotypes according to salt tolerance and for conducting cell selection for salt tolerance. The highest resistance to chloride salinity was observed in microcalli obtained from the varieties Peremoha and Stepovyi 1.

Key words: *Camelina sativa, variety, salinity stress, sodium chloride, callus, in vitro culture*