УДК 581.143.6:582.998.1:57.086.83 https://doi.org/10.7124/FEEO.v39.1838

СОРОКА О. В.✉
ПРОКОП'ЯК М. З.
ДРОБИК Н. М.

Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка,
Україна, 46015, м. Тернопіль, вул. Максима Кривоноса, 2
✉ *soroka-o@tnpu.edu.ua*

ІНДУКЦІЯ КАЛЮСОГЕНЕЗУ З РІЗНИХ ТИПІВ ЕКСПЛАНТІВ РОСЛИН РІДКІСНИХ ВИДІВ РОДУ *CARLINA* L.

Мета. Дослідити особливості індукції калюсогенезу з різних типів експлантів рослин видів роду *Carlina* L. і визначити умови для формування калюсної тканини. ***Методи.*** Об'єкти дослідження: види *Carlina onopordifolia* Besser ex Szafer, Kulcz. et Pawł, *Carlina cirsioides* Klokov, *Carlina acaulis* L. Для індукції калюсогенезу кореневі та листкові експланти культивували на живильному середовищі Мурасіге-Скуга (МС), доповненому різними комбінаціями ауксинів – індоліл-3-оцтової кислоти (ІОК), 2,4-дихлорфеноксиоцтової кислоти (2,4-Д) і цитокінінів – кінетину (КІН), 6-бензиламінопурину (БАП). Ефективність калюсогенезу оцінювали за відсотком експлантів, здатних до утворення калюсу. ***Результати.*** Рослини досліджених видів здатні до утворення калюсної тканини *in vitro*. Ефективність індукції калюсогенезу залежить від типу експланта, складу живильного середовища, концентрацій і співвідношення регуляторів росту. Найвищу калюсогенну активність проявили листкові експланти, для яких частота калюсоутворення на більшості варіантах середовищ становила 80–100%; для кореневих експлантів цей показник був нижчим і характеризувався більшою варіабельністю. Найефективнішими для індукції калюсогенезу виявилися живильні середовища, доповнені ІОК у концентраціях 1,0–3,0 мг/л у поєднанні з КІН (0,1–0,5 мг/л), на яких частота калюсоутворення досягала 90–100% незалежно від типу експланта. Концентрації 2,4-Д 0,5–1,0 мг/л забезпечували високі показники калюсоутворення, тоді як підвищення вмісту цього регулятора росту до 2,0–3,0 мг/л призводило до пригнічення калюсогенезу. Листкові експланти на середовищах для дедиференціації зберігали здатність до формування морфогенних структур. ***Висновки.*** Визначено умови індукції калюсогенезу для рослин видів роду *Carlina*. Отримані результати можуть бути використані для збереження рідкісних видів *Carlina* та подальших досліджень біосинтетичної активності калюсних культур і створення біотехнологічних систем отримання біологічно активних речовин.

Ключові слова: види роду *Carlina* L., лікарські рослини, калюсогенез, *in vitro*, регулятори росту рослин, біотехнологія рослин.

Рід *Carlina* L. (родина Asteraceae) об'єднує види, які мають важливе фітогеографічне, екологічне та фармакологічне значення. Їх ареал охоплює території Європи, Азії та Північної Африки, а також частково Північну Америку. В Україні рослини цих видів поширені переважно у західних і правобережних регіонах, зокрема на півдні Полісся, у межах Поділля та в Карпатській гірській системі, де вони займають специфічні екологічні ніші, зокрема сухі луки, степові ділянки, кам'янисті схили (Soroka et al,. 2024).

В Україні представлені такі види роду *Carlina*: відкасник татарниколистий або дев'ятисил татарниколистий (*Carlina onopordifolia* Besser ex Szafer, Kulcz. et Pawł), відкасник осотоподібний або дев'ятисил осотовий (*Carlina cirsioides* Klokov), відкасник безстебловий або дев'ятисил безстебловий (*Carlina acaulis* L.). Відкасники здавна вважаються цінними лікарськими рослинами, які використовувалися в народній медицині багатьох європейських народів. Надмірна експлуатація ресурсів *C. onopordifolia* та *C. cirsioides* та їхня вузька екологічна пластичність обумовили їх віднесення до Червоної

© 2026 Сорока О. В., Прокоп'як М. З., Дробик Н. М. This work is licensed under CC BY 4.0. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

книги України (2009) з природоохоронним статусом вразливі. Також вони включені до Червоного списку Міжнародного союзу охорони природи (IUCN) (The IUCN Red List…). Водночас, в Україні спостерігається тенденція до зменшення чисельності популяцій і *C. acaulis*, який належить до регіонально рідкісних видів (Kolisnyk et al., 2023).

Відкасники є цінним джерелом біологічно активних речовин (БАР), зокрема полісахаридів, ефірних олій, дубильних та смолистих речовин, флавоноїдів, терпенів та терпеноїдів, сапонінів, алкалоїдів, глікозидів, кетонових, поліацетиленових та альдегідних сполук (Soroka et al., 2024). Екстракти із рослин роду *Carlina* характеризуються широким спектром фармакологічної активності, а саме діуретичною, антигельмінтною, седативною, відхаркувальною, протизапальною, потогінною, протигемороїдальною, антимікробною, антисептичною та ранозагоювальною (Link et al., 2016; Soroka et al., 2025; Kavallieratos et al., 2022; Soroka et al., 2024; Puk et al., 2023). Особливий інтерес дослідників викликає карліна оксид – фуранова сполука, що вирізняється потужною антимікробною, фунгіцидною, антипаразитарною та антивірусною дією. Окрім цього, встановлено токсичний вплив на пухлинні клітини, що свідчить про перспективність використання цієї речовини у створенні нових лікарських препаратів. Також карліна оксид розглядають як основу для розроблення екологічно безпечних інсектицидних і акарицидних засобів (Kavallieratos et al., 2022; Soroka et al., 2025). Отже, види роду *Carlina* мають важливе значення як у народній, так і в офіційній медицині, а також у косметологічній галузі.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю збереження рідкісних і зникаючих видів, а також пошуку альтернативних шляхів отримання БАР без вилучення рослин із природних популяцій.

Незважаючи на значний інтерес до біотехнологічного потенціалу рослин родини Asteraceae, питання отримання культури тканин у представників роду *Carlina* вивчене недостатньо. Наявні дослідження мають фрагментарний характер і переважно стосуються окремих видів або загальних аспектів культури тканин (Petrina et al., 2013; Strzemski et al., 2019; Zahorodnia et al., 2021).

Метою цієї роботи є підбір оптимальних умов для індукції калюсних тканин і вивчення особливостей калюсогенезу з різних типів експлантів видів роду *Carlina*.

Матеріали і методи

Матеріалом для дослідження було насіння *C. cirsioides* та *C. onopordifolia*, зібране в їхніх природних біотопах, зокрема в околицях гори Голиці (село (с.) Гутисько, Тернопільський район (р-н), Тернопільська область (обл.), Україна). Насіння *C. acaulis* зібране на території с. Лазещина (Рахівський р-н, Закарпатська обл.).

Для індукції калюсогенезу використовували кореневі і листкові експланти довжиною 5–7 мм, отримані з рослин відкасників, які культивували на живильному середовищі Мурасіге-Скуга (МС), доповненому різними концентраціями цитокінів – кінетину (КІН), 6-бензиламінопурину (БАП) і ауксинів – індоліл-3-оцтової кислоти (ІОК), 2,4-дихлорфеноксиоцтової кислоти (2,4-Д). Дослідні варіанти: **I** – 1,0 мг/л ІОК + 0,1 мг/л КІН; **II** – 3,0 мг/л ІОК + 0,1 мг/л КІН; **III** – 1,5 мг/л ІОК + 0,1 мг/л КІН; **IV** – 2,0 мг/л ІОК + 0,5 мг/л КІН; **V** – 3,0 мг/л ІОК + 0,5 мг/л КІН; **VI** – 3,0 мг/л ІОК + 1,0 мг/л КІН; **VII** – 1,0 мг/л 2,4 Д + 0,5 мг/л БАП; **VIII**– 1,5 мг/л 2,4 Д + 0,5 мг/л БАП; **IX** – 2,0 мг/л 2,4 Д + 0,5 мг/л БАП; **X** – 3,0 мг/л 2,4 Д + 0,5 мг/л БАП; **XI** – 0,5 мг/л 2,4 Д + 1,0 мг/л БАП. Кожний варіант досліду закладали у трьох повторах.

Індукцію калюсогенезу, а також культивування отриманих культур проводили в умовах темряви за температури +22 °С, за відносної вологості повітря 80%. Пересаджували через кожні 4 тижні.

Відсоток калюсогенезу (ВК) визначали за формулою:

$$ВК = \frac{N_k}{N} \times 100\%,$$

де ВК – відсоток калюсогенезу,

N_k – кількість експлантів з утвореним калюсом;

N – кількість висаджених експлантів.

Отримані результати опрацьовували статистично. Для цього використовували однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA) із подальшим post hoc тестом Тьюкі (Tukey HSD) (Varalakshmi, 2025).

Результати та обговорення

Перші ознаки калюсогенезу для усіх досліджених видів на листкових експлантах фіксували через 7–8 діб після закладання експерименту, для кореневих – на 10–12 добу. Встановлено, що інтенсивність утворення калюсу залежить від концентрації й співвідношення регуляторів росту та типу експланта (рис. 1–3).

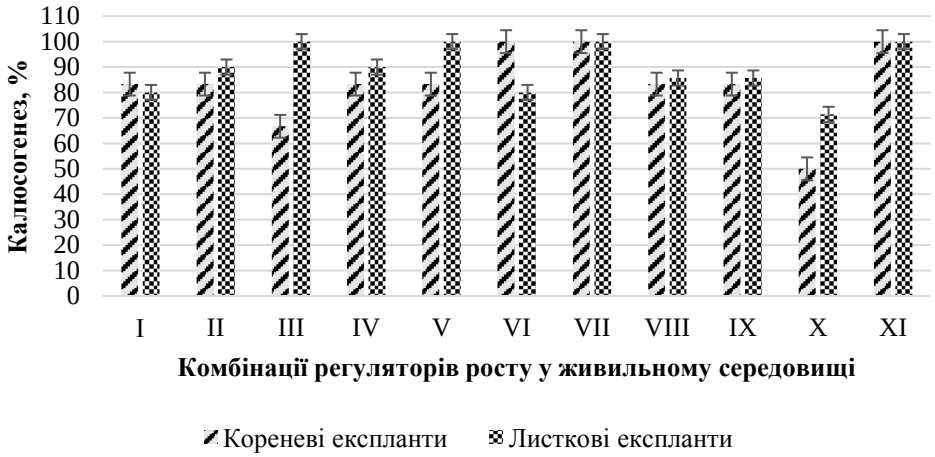


Рис. 1. Частота калюсогенезу (%) з кореневих і листкових експлантів *C. acaulis* на живильному середовищі Мурасіге–Скуга (МС) із різними концентраціями ауксинів та цитокінінів.

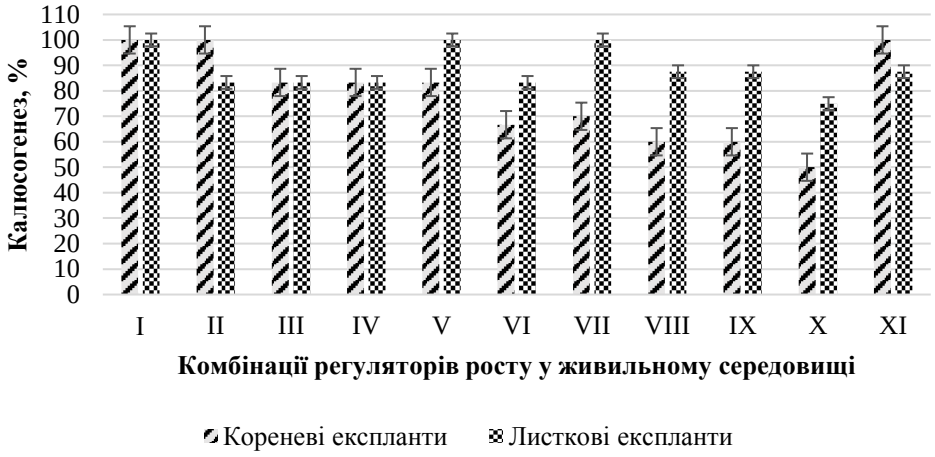


Рис. 2. Частота калюсогенезу (%) з кореневих і листкових експлантів *C. cirsioides* на живильному середовищі МС із різними концентраціями ауксинів та цитокінінів.

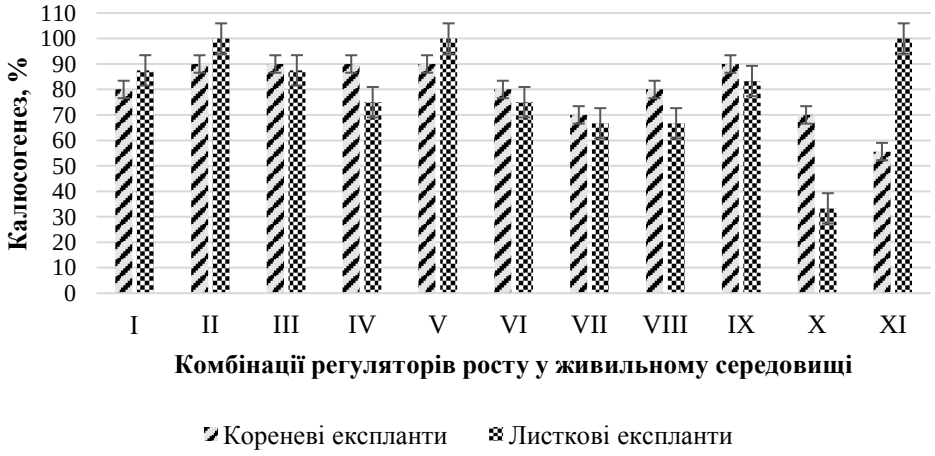


Рис. 3. Частота калюсогенезу (%) з кореневих і листкових експлантів *C. onopordifolia* на живильному середовищі МС із різними концентраціями ауксинів та цитокінінів.

Залежність інтенсивності утворення калюсу від типу експланта. У всіх досліджуваних видів роду *Carlina* листкові експланти характеризувалися вищою частотою калюсоутворення, порівняно з кореневими, або ж демонстрували більш стабільнішу калюсогенну активність в широкому діапазоні концентрацій регуляторів росту. Зокрема, для листкових експлантів *C. acaulis* показник калюсогенезу на більшості варіантів живильних середовищ становив 80–100%, тоді як для кореневих – варіював від 50 до 100%. Аналогічна тенденція простежувалася у *C. cirsioides,* відсоток калюсоутворення з листкових експлантів яких був високим (83,3–100%) на усіх протестованих середовищах, тоді як на кореневих експлантах цей показник на живильних середовищах з підвищеним вмістом 2,4-Д (2–3 мг/л) був значно нижчим (до 50–60%). У *C. onopordifolia* також відзначено вищу калюсогенну активність листкових експлантів на живильному середовищі із додаванням ІОК і КІН, у той же час за використання 2,4-Д інтенсивність калюсогенезу знижувалася до 33,3%.

Виявлено, що, поряд із дедиференціацією, за різних дослідних варіантів, відбуваються процеси регенерації (рис. 4). Для листкових експлантів була характерна вища морфогенна компетентність, що проявляється у здатності до формування у *C. onopordifolia* та *C. acaulis* морфогенних структур поряд із індукцією калюсогенезу. Це, на наш погляд, може бути пов'язано з анатомо-фізіологічними особливостями листкових тканин, зокрема ендогенним фітогормональним балансом, наявністю більшої кількості паренхімних клітин, здатних до дедиференціації, а також активнішим метаболізмом і вищою чутливістю до дії екзогенних регуляторів росту.

Водночас, кореневі експланти характеризувалися варіабельнішою реакцією на зміни концентрації ауксину ІОК у живильному середовищі. Найвищі показники формування калюсу *C. cirsioides* спостерігали за концентрацій ІОК 1–3 мг/л.

За оптимальних концентрацій ІОК і КІН, калюсоутворення спостерігали на усіх кореневих експлантах. Проте за підвищення концентрації 2,4-Д, на кореневих експлантах відбувалося суттєвіше зниження інтенсивності калюсогенезу, ніж на листкових.

Залежність інтенсивності утворення калюсу від концентрації й співвідношення регуляторів росту. Виявлено, що у варіантах із використанням ІОК у поєднанні з КІН рівень калюсоутворення є стабільно високим для усіх досліджених видів. Підвищення концентрації цитокініну (КІН) до 1,0 мг/л у складі середовища супроводжувалося зниженням частоти калюсогенезу, що особливо проявлялося на кореневих експлантах рослин *C. cirsioides* і *C. onopordifolia.* Найбільш ефективними виявилися варіанти з ІОК (1,0–3,0 мг/л) та КІН (0,1–0,5 мг/л), на яких частота калюсогенезу досягала 80–100%, незалежно від виду і типу експланта.

Використання 2,4-Д у поєднанні з БАП показало залежність калюсогенезу від концентрації ауксину. При низьких концентраціях 2,4-Д (0,5–1,0 мг/л) у поєднанні з БАП (0,5–1,0 мг/л) спостерігалися високі показники калюсоутворення (до 100%). Водночас підвищення концентрації 2,4-Д до 2,0–3,0 мг/л призводило до поступового зниження частоти калюсогенезу як на кореневих, так і на листкових експлантах усіх досліджуваних видів.



а *б*

Рис. 4. Індукція калюсоутворення з листкових експлантів *C. onopordifolia* (*а*) та *C. acaulis* (*б*) на живильних середовищах МС, доповнених 1,0 мг/л ІОК + 0,1 мг/л КІН (*а*) і 1,5 мг/л ІОК + 0,1 мг/л КІН (*б*).

Виражений інгібуючий ефект високих концентрацій 2,4-Д спостерігали у *C. acaulis* та *C. cirsioides*: за таких умов інтенсивність калюсогенезу з обох типів експлантів знижувалася до 50%; у випадку *C. onopordifolia* цей показник досягав мінімального значення (33,3%) на листкових експлантах.

Порівняльний аналіз показав, що серед ауксинів більш ефективним для індукції калюсогенезу є ІОК. Його використання у концентраціях 1,0–3,0 мг/л у поєднанні з цитокінінами забезпечувало високі показники калюсоутворення у рослин усіх досліджуваних видів. Натомість 2,4-Д виявляв високу ефективність лише у вузькому діапазоні концентрацій (0,5–1,5 мг/л), тоді як його підвищений вміст (3,0 мг/л) призводив до пригнічення калюсогенезу.

Серед цитокінінів ефективнішим виявився КІН порівняно з БАП. Комбінації ІОК із КІН забезпечували стабільніші та вищі показники калюсоутворення незалежно від типу експланта. БАП також сприяв індукції калюсу, однак ефективність його впливу значною мірою залежала від концентрації 2,4-Д і була менш стабільною.

Слід зазначити, що дослідні варіанти з вмістом БАП 1,0 мг/л у поєднанні з низькою концентрацією 2,4-Д (0,5 мг/л) забезпечували високий рівень калюсоутворення (до 100%) для обох типів експлантів трьох досліджених видів (рис. 1–3, 5).

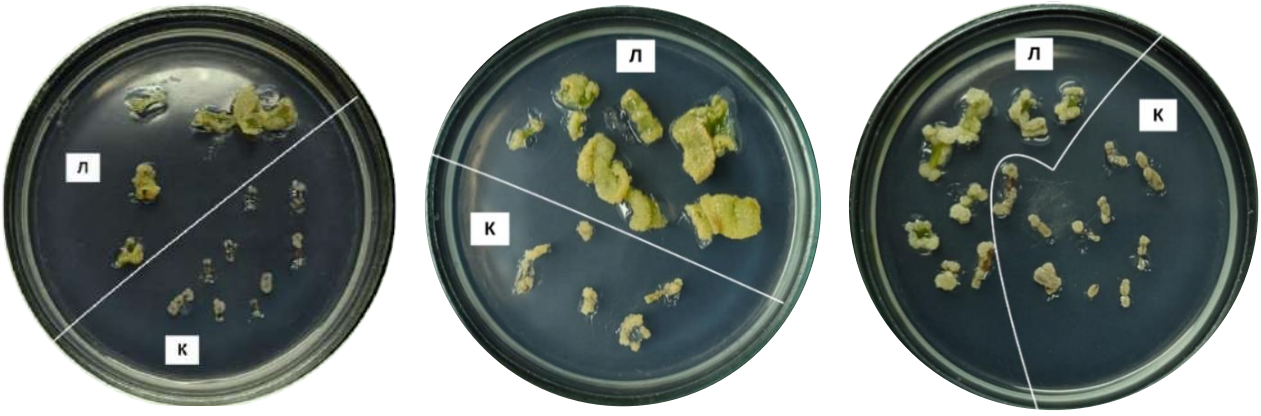
Встановлено, що найвищі значення калюсогенезу (80–100%) спостерігали у варіантах із співвідношенням ауксину ІОК і цитокініну КІН (10 : 1; 15 : 1; 30 : 1; 20 : 5; 30 : 5). Такі умови були сприятливими не лише для ініціації калюсу. Натомість, при вищих концентраціях ауксину (особливо, 2,4-Д – 2–3 мг/л) відзначалося зниження частоти калюсогенезу.

Порівняльна характеристика видів роду Carlina за їх здатністю до калюсоутворення. Стабільно високі показники калюсогенезу (90–100%) для всіх трьох видів відкасників отримано при використанні живильного середовища, доповненого ІОК у концентраціях 1,0–3,0 мг/л у поєднанні з КІН (0,1–0,5 мг/л) як для кореневих, так і для листкових експлантів.

Водночас підвищення концентрації 2,4-Д до 3,0 мг/л для всіх досліджуваних видів призводило до зниження частоти калюсоутворення, особливо у випадку листкових експлантів.

Найвищу здатність до калюсогенезу виявлено у випадку *C. acaulis*. Цей вид характеризується стабільно високими показниками калюсоутворення (переважно 80–100%) у широкому діапазоні концентрацій як природного ауксину ІОК, так і синтетичного – 2,4-Д. Навіть при зміні співвідношення ауксин/цитокінін ефективність калюсогенезу залишається високою, що свідчить про толерантність до фітогормональних коливань. Однак при підвищенні концентрації 2,4-Д до 3,0 мг/л спостерігається зниження інтенсивності калюсоутворення, що вказує на наявність межі гормональної стійкості.

C. cirsioides демонструє дещо нижчу, але все ж високу ефективність калюсогенезу, яка значною мірою залежить від типу ауксину. У середовищах із поєднанням ІОК і КІН цей вид забезпечує стабільно високі показники (до 100%), що свідчить про оптимальність використання природного ауксину.



а *б* *в*

Рис. 5. Калюсогенез на кореневих і листкових експлантах на живильному середовищі МС, доповненому 0,5 мг/л 2,4 Д та 1,0 мг/л БАП: *C. onopordifolia* (*а*), *C. acaulis* (*б*) та *C. cirsioides* (*в*).

Водночас при застосуванні 2,4-Д відзначається зниження ефективності калюсогенезу (до 50–70%), особливо у випадку кореневих експлантів. Це вказує на підвищену чутливість *C. cirsioides* до синтетичних ауксинів і більш вужчий діапазон оптимальних концентрацій, порівняно з *C. acaulis*. Найбільш специфічну реакцію на дію регуляторів росту виявлено у *C. onopordifolia*. Для цього виду характерна висока залежність калюсогенезу від концентрації ауксину, особливо 2,4-Д. За концентрацій 1,5–2,0 мг/л спостерігається достатньо високий рівень калюсоутворення (до 90%), однак подальше підвищення концентрації до 3,0 мг/л призводить до різкого зниження ефективності, особливо у випадку листкових експлантів (до 33,3%). Це свідчить про низьку толерантність до надлишку синтетичного ауксину та високу чутливість до порушення фітогормонального балансу. Водночас, у варіантах із поєднанням ІОК і КІН цей вид демонструє відносно стабільні, хоча і дещо нижчі показники (75–100%), що підтверджує перевагу використання природних ауксинів.

Проведений однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA) із подальшим post hoc тестом Тьюкі дозволив оцінити вплив різних варіантів живильних середовищ із регуляторами росту рослин на інтенсивність калюсоутворення на кореневих і листкових експлантах досліджених видів. Отримані результати свідчать про наявність видоспецифічної реакції рослин на склад живильного середовища та концентрації регуляторів росту.

Для *C. cirsioides* встановлено найбільш виражену диференціацію між варіантами середовищ. Найвищий рівень калюсоутворення спостерігався у варіанті XI, який статистично достовірно переважав більшість інших варіантів ($p < 0,001$). Високою калюсогенною активністю також характеризувався варіант VII. Найнижчі значення були характерні для варіанту VI, який статистично поступався найбільш ефективним варіантам. Для *C. onopordifolia* загальний рівень калюсоутворення був вищим і більш вирівняним між більшістю варіантів. Максимальні середні значення зафіксовано у варіантах II та III, IV, V і IX. Водночас найнижчу ефективність виявлено у варіанті XI, який достовірно відрізнявся від усіх інших варіантів ($p < 0,01$). Більшість інших варіантів живильних середовищ не демонстрували статистично значущих відмінностей між собою, що може свідчити про ширший адаптивний діапазон даного виду до різних концентрацій регуляторів росту. У *C. acaulis* показники калюсоутворення на кореневих експлантах були менш контрастними порівняно з попередніми видами. Статистично значущі відмінності виявлено лише між варіантом X та варіантами VI, VII і XI ($p = 0,006$), тоді як для більшості інших порівнянь достовірних відмінностей не встановлено. Це свідчить про нижчу чутливість цього виду до змін фітогормонального складу живильного середовища (табл. 1).

Таблиця. 1. Оцінка міжвидових відмінностей комплексної реакції кореневих експлантів рослин відкасників на вплив різних варіантів живильних середовищ

Варіант	*C. cirsioides*	*C. onopordifolia*	*C. acaulis*
	M ± SD	M ± SD	M ± SD*
I	5,75 ± 0,50 c*	8,25 ± 0,50 ab*	5 ± 0,82 ab*
II	5,75 ± 0,50 c	9,00 ± 0,82 a	4,75 ± 0,96 ab
III	5,25 ± 0,96 c	9,00 ± 0,82 a	4,00 ± 0,82 b
IV	5,00 ± 0,82 c	8,75 ± 0,96 a	5,25 ± 0,50 ab
V	5,25 ± 0,96 c	8,75 ± 0,50 a	5,25 ± 0,96 ab
VI	4,25 ± 0,50 d	8,00 ± 0,82 ab	5,75 ± 0,50 a
VII	7,25 ± 0,50 b	7,25 ± 0,50 b	5,75 ± 0,50 a
VIII	6,25 ± 0,50 bc	8,00 ± 0,82 ab	5,25 ± 0,50 ab
IX	6,25 ± 0,50 bc	8,75 ± 0,96 a	4,75 ± 0,96 ab
X	5,25 ± 0,50 c	7,25 ± 0,50 b	3,25 ± 1,50 c
XI	9,75 ± 0,50 a	4,75 ± 0,50 c	5,75 ± 0,50 a

Примітка. * Різні літери вказують на статистично значущі відмінності між варіантами за тестом Тьюкі при $p < 0,05$.

Найвищі показники калюсогенезу на листкових експлантах *C. cirsioides* спостерігалися у варіантах VII, VIII, IX та XI, які сформували окрему статистичну групу та достовірно переважали більшість інших варіантів досліду. Найнижчі показники калюсоутворення зафіксовано у варіантах II, III, IV та VI. Отримані результати свідчать про високу чутливість листкових експлантів *C. cirsioides* до співвідношення та концентрації регуляторів росту у живильному середовищі, що визначає інтенсивність процесів дедиференціації та формування калюсної тканини. Листкові експланти *C. onopordifolia* загалом характеризувалися невисокою диференціацією між варіантами живильних середовищ. Найвищий середній показник калюсоутворення спостерігався у варіанті VI, що суттєво перевищувало значення інших варіантів досліду. Проте через значну внутрішньогрупову варіабельність статистично достовірних відмінностей між варіантами не встановлено ($p > 0,05$). Отримані результати можуть вказувати на високу індивідуальну варіабельність процесів калюсоутворення у *C. onopordifolia* та необхідність подальшої оптимізації концентрацій регуляторів росту. Найвищу калюсогенну активність у *C. acaulis* виявлено у варіантах III, IV та V, які сформували групу з найвищими показниками та достовірно переважали інші варіанти. Отримані результати свідчать про високу залежність процесів калюсоутворення на листкових експлантах *C. acaulis* від складу живильного середовища та концентрації регуляторів росту. Підвищені показники калюсогенезу у певних варіантах можуть бути пов'язані з оптимальним співвідношенням ауксинів і цитокінінів, що стимулює дедиференціацію клітин (табл. 2).

Отримані результати загалом узгоджуються з наявними у літературі даними щодо особливостей калюсогенезу у представників роду *Carlina, а саме C. acaulis, C. cirsioides* та *C. onopordifolia*. Зокрема, встановлено високу здатність експлантів різного походження до утворення калюсної тканини за використання живильного середовища МС, доповненого ауксинами та цитокінінами (Petrina et al., 2013; Strzemski et al., 2019; Zahorodnia et al., 2021). Наші результати показують, що поєднання ІОК і КІН забезпечує високі показники калюсоутворення (до 90–100%), що співвідноситься з літературними даними про ефективність середовищ з добавлянням ІОК (3 мг/л), НОК (0,5 мг/л) і КІН (0,5 мг/л), де частота калюсогенезу досягає 87–99% залежно від виду та типу експланта (Petrina et al., 2013; Zahorodnia et al., 2021).

Отримані результати узгоджуються з наявними у літературі даними про регуляцію морфогенезу *in vitro*, згідно з якими ауксини відіграють ключову роль у процесах дедиференціації клітин та ініціації калюсогенезу, тоді як цитокініни регулюють проліферацію клітин та подальший розвиток калюсної тканини. Високі концентрації ауксину забезпечують дедиференціацію клітин, активацію клітинного циклу та формування калюсної тканини, тоді як помірні концентрації цитокініну підтримують проліферацію клітин і стабілізують ріст калюсу (Sánchez-Ramos et al., 2018; Großkinsky et al., 2019). Оптимальний рівень калюсоутворення досягається лише за умов збалансованого співвідношення цих регуляторів, тоді як його порушення, зокрема надлишок ауксинів або цитокінінів, призводить до зниження ефективності морфогенетичних процесів дедиференціювання (Efferth et al., 2019; Sosnowski et al., 2023).

Подібно до результатів досліджень інших авторів (Petrina et al., 2013; Strzemski et al., 2019; Zahorodnia et al., 2021), нами встановлено, що найвища ефективність калюсогенезу спостерігається за умов переважання ауксину ІОК (1,0–3,0 мг/л) у поєднанні з невисокими концентраціями цитокініну КІН (0,1–0,5 мг/л). Поряд із цим, нами показано, що підвищення концентрації цитокініну до 1,0 мг/л не покращує, а іноді навіть знижує інтенсивність калюсоутворення, особливо у випадку кореневих експлантів. Нами встановлено, що підвищення концентрації КІН до 1,0 мг/л у більшості випадків не супроводжується підвищенням частоти калюсоутворення, а інколи навіть знижує її. Це може бути пов'язано зі зміщенням фітогормонального балансу у бік цитокінінів, що стимулює морфогенетичні процеси і знижує ефективність дедиференціації клітин.

Таблиця. 2. Оцінка міжвидових відмінностей комплексної реакції листкових експлантів рослин відкасників на вплив різних варіантів живильних середовищ

Варіант	*C. cirsioides*	*C. onopordifolia*	*C. acaulis*
	M ± SD	M ± SD	M ± SD
I	5,75 ± 0,50 bc*	7,25 ± 0,50 b*	8,00 ± 0,82 ab*
II	5,25 ± 0,50 c	2,75 ± 0,50 b	8,75 ± 0,50 ab
III	5,25 ± 0,50 c	7,25 ± 0,50 b	9,75 ± 0,50 a
IV	5,25 ± 0,50 c	6,00 ± 0,82 b	9,25 ± 0,96 a
V	5,75 ± 0,50 bc	4,75 ± 0,50 b	9,75 ± 0,50 a
VI	5,25 ± 0,50 c	6,25 ± 0,50 a	8,25 ± 0,96 ab
VII	7,75 ± 0,50 a	4,25 ± 0,50 b	6,75 ± 0,50 bc
VIII	7,00 ± 0,82 ab	4,25 ± 0,50 b	6,00 ± 0,85 c
IX	7,00 ± 0,82 ab	4,50 ± 0,58 b	6,25 ± 0,50 c
X	6,25 ± 0,50 abc	2,25 ± 0,50 b	5,25 ± 0,50 c
XI	7,25 ± 0,50 a	5,75 ± 0,50 b	6,75 ± 0,50 bc

Примітка. * Різні літери вказують на статистично значущі відмінності між варіантами за тестом Тьюкі при $p < 0,05$.

Нами встановлено негативний вплив високих концентрацій 2,4-Д на калюсогенез. Зокрема, досліджено, що підвищення його вмісту до 2–3 мг/л призводить до пригнічення калюсогенезу. Такий ефект можна пояснити тим, що високі концентрації 2,4-Д викликають фізіологічний стрес, порушують фітогормональний баланс клітин і можуть мати токсичний вплив, що пригнічує клітинний поділ і проліферацію. У той же час, нами виявлено, що концентрації 2,4-Д (0,5–1,0 мг/л) у поєднанні з БАП можуть забезпечувати високі показники калюсоутворення, однак цей ефект є менш стабільним порівняно з комбінацією ІОК і КІН.

Нами показано, що листкові експланти характеризуються вищою калюсогенною здатністю, порівняно з кореневими. Вони забезпечують більший відсоток калюсоутворення (до 100%), що узгоджується з дослідженнями інших авторів про вищу морфогенну компетентність листкових тканин (Petrina et al., 2013).

Поряд із цим, отримані нами результати розширюють існуючі уявлення про калюсогенез у представників роду *Carlina*. Зокрема, показано видоспецифічні відмінності у реакції експлантів на додавання регуляторів росту, а також встановлено, що кореневі експланти демонструють вищу чутливість до змін концентрації регуляторів росту, особливо 2,4-Д. Крім того, експериментально підтверджено міжвидові відмінності реакції експлантів: навіть за однакових умов культивування інтенсивність калюсогенезу може суттєво варіювати. Різну потребу у регуляторах росту, що використовуються для індукції калюсу, мають кореневі і листкові експланти. Усе це в комплексі свідчить про важливість індивідуального підбору умов як для кожного виду, так і для кожного типу експланту.

Висновки

У результаті проведеного дослідження підібрано умови для індукції калюсоутворення з листкових та кореневих експлантів рослин видів роду *Carlina* L. (*C. acaulis, C. cirsioides, C. onopordifolia*).

Отримані результати свідчать про виражену видоспецифічність процесів калюсогенезу у досліджених представників роду *Carlina*. Найвищу морфогенетичну пластичність і толерантність до фітогормональних коливань виявлено у *C. acaulis*, тоді як *C. cirsioides* та *C. onopordifolia* характеризуються більшою чутливістю до концентрації та типу ауксину. Для всіх досліджених видів ефективнішим виявилось використання ІОК у поєднанні з КІН, тоді як високі концентрації 2,4-Д пригнічують процеси калюсогенезу. Отримані дані підтверджують необхідність індивідуального підбору фітогормонального складу живильних середовищ для оптимізації культивування видів роду *Carlina in vitro*.

На протестованих варіантах живильних середовищ листкові експланти характеризуються вищою калюсогенною активністю та здатністю отриманого калюсу до проліферації, порівняно з кореневими.

Подальші дослідження будуть спрямовані на оптимізацію як процесів калюсогенезу, так і регенерації рослин, вивчення біосинтетичної ак-

тивності культур *in vitro* з метою їх використання як альтернативного джерела сировини цінних біологічно активних речовин.

Інформація про фінансову підтримку, подяки: відсутня.

Конфлікт інтересів: автори Прокоп'як М. З. і Дробик Н. М. є членами редакційної колегії збірника наукових праць «Фактори експериментальної еволюції організмів». Автор Сорока О.В. заявляє про відсутність конфлікту інтересів.

References

1. Efferth T. Biotechnology Applications of Plant Callus Cultures. *Engineering*. 2019. Vol. 5 (1). P. 50–59. https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.11.006.
2. Großkinsky D. K., Petrášek J. Auxins and cytokinins – the dynamic duo of growth-regulating phytohormones heading for new shores. *New Phytologist*. 2019. Vol. 221 (3). P. 1187–1190. https://doi.org/10.1111/nph.15556.
3. Kavallieratos N. G., Nika E. P., Skourti A., Boukouvala M. C., Ntalaka C. T., Maggi F., Spinozzi E., Petrelli R., Perinelli D. R., Benelli G., Canale A., Bonacucina G. *Carlina acaulis* essential oil nanoemulsion as a new grain protectant against different developmental stages of three stored-product beetles. *Pest Management Science*. 2022. Vol. 78 (6). P. 2434–2442. https://doi.org/10.1002/ps.6877.
4. Kolisnyk Kh. M., Hrytsak L. R., Prokopiak M. Z., Drobyk N. M. The chorology and bioecological features of species of the genus *Carlina* L. flora of Ukraine. *Scientific Issue Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. Series: Biology*. 2023. Vol. 83 (3–4). P. 48–57. https://doi.org/10.25128/2078-2357.23.3-4.6 [in Ukrainian]
5. Link P., Roth K., Sporer F., Wink M. *Carlina acaulis* exhibits antioxidant activity and counteracts Aβ toxicity in *Caenorhabditis elegans*. *Molecules*. 2016. Vol. 21 (7). https://doi.org/10.3390/molecules21070871.
6. Petrina R., Konechna R., Pobigushka O., Matvijkiv S. Vvedennia v kul'turu *in vitro* vidkasnyka bezsteblevogo. *Lviv Polytechnic National University Institutional Repository. Series of Chemistry, Materials Technology and their Application.* 2013. Vol. 761. P. 169–172.
7. Puk K., Wawrzykowski J., Guz L. Evaluation of the anti-mycobacterial activity and composition of *Carlina acaulis* L. root extracts. *Polish Journal of Veterinary Sciences*. 2023. Vol. 26 (1). P. 57–63. https://doi.org/10.24425/pjvs.2023.145007.
8. Sánchez-Ramos M., Bahena S., Romero-Estrada A., Bernabé-Antonio A., Cruz-Sosa F., Gonzálesssz-Christen J., Acevedo-Fernández J., Perea-Arango I., Alvarez L. Establishment and phytochemical analysis of a callus culture from *Ageratina pichinchensis* (Asteraceae) and its anti-inflammatory activity. *Molecules*. 2018. Vol. 23 (6). https://doi.org/10.3390/molecules23061258.
9. Soroka O. V., Hrytsak L. R., Prokopiak M. Z., Drobyk N. M. Biologically active compounds in species of *Carlina* L. genus of flora of Ukraine. *Scientific Issue Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. Series: Biology*. 2024. Vol. 84 (3–4). P. 89–99. https://doi.org/10.25128/2078-2357.24.3-4.10 [in Ukrainian]
10. Soroka O. V., Prokopiak M. Z., Hrytsak L. R., Drobyk N. M. Application of *Carlina* L. plants in traditional and folk medicine *Scientific Issue Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. Series: Biology*. 2025. Vol. 85 (3). P. 54–64. https://doi.org/10.25128/2078-2357.25.3.8 [in Ukrainian]
11. Sosnowski J., Truba M., Vasileva V. The impact of auxin and cytokinin on the growth and development of selected cops. *Agriculture*. 2023. Vol. 13 (3). https://doi.org/10.3390/agriculture13030724.
12. Strzemski M., Dresler S., Sowa I., Czubacka A., Agacka-Mołdoch M., Płachno B. J., Granica S., Feldo M., Wójciak-Kosior M. The impact of different cultivation systems on the content of selected secondary metabolites and antioxidant activity of *Carlina acaulis* plant material. *Molecules*. 2019. Vol. 25 (1). P. 146. https://doi.org/10.3390/molecules25010146.
13. The IUCN Red List of Threatened Species. 2026. Retrieved from: https://www.iucnredlist.org/.
14. Varalakshmi G. Application of analysis of variance (ANOVA) in biological science research. *Journal of Experimental Agriculture International*. 2025. Vol. 47 (9). P. 520–527. https://doi.org/10.9734/jeai/2025/v47i93772.
15. Zahorodnia D. S., Huzko K. I., Petrina R. O. Investigation of the influence of growth regulators on the growth of callula biomass *Carlina acaulis*. *Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2021. Vol. 32 (71). P. 161–166. https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.6/26.

SOROKA O. V., PROKOPIAK M. Z., DROBYK N. M.
Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University,
Ukraine, 46015, Ternopil, Maksyma Kryvonosa str., 2

INDUCTION OF CALLUSOGENESIS FROM DIFFERENT TYPES OF EXPLANTS OF RARE PLANT SPECIES OF THE GENUS *CARLINA* L.

Aim. To investigate the characteristics of callus induction from different types of explants of *Carlina* L. species and to determine the optimal conditions for callus tissue formation. ***Methods***. The objects of the study were *Carlina onopordifolia* Besser ex Szafer, Kulcz. et Pawł., *Carlina cirsioides* Klokov, and *Carlina acaulis* L. Root and leaf explants were cultured on Murashige and Skoog (MS) medium supplemented with different combinations of the auxins indole-3-acetic acid (IAA) and 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D), and the cytokinins kinetin (KIN) and 6-benzylaminopurine (BAP). The efficiency of callus induction was evaluated as the percentage of explants capable of callus formation. ***Results***. Plants of all studied species were capable of forming callus tissue *in vitro*. The efficiency of callus induction depended on the explant type, the composition of the nutrient medium, and the concentrations and ratios of plant growth regulators. Leaf explants exhibited the highest callogenic activity, with callus induction frequencies ranging from 80% to 100% on

most media, whereas root explants showed lower and more variable responses. The most effective media for callus induction were those supplemented with IAA at concentrations of 1.0–3.0 mg/L in combination with KIN (0.1–0.5 mg/L), where callus induction frequencies reached 90–100% regardless of explant type. The addition of 2,4-D at concentrations of 0.5–1.0 mg/L also ensured high callus induction rates, whereas increasing its concentration to 2.0–3.0 mg/L inhibited callus formation. Leaf explants cultured on dedifferentiation media retained their ability to form morphogenic structures. ***Conclusions***. The optimal conditions for callus induction in *Carlina* species were determined. The obtained results may be applied to the conservation of rare *Carlina* species and to further studies of the biosynthetic activity of callus cultures, as well as to the development of biotechnological systems for the production of biologically active compounds.
Keywords: species of the genus *Carlina* L., medicinal plants, callusogenesis, *in vitro*, plant growth regulators, plant biotechnology.

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