

АГРОНОМІЯ

УДК 575.16:57.062

Онтогенез рослин в ізольованих штучних екосистемах: огляд

Іванчук А.В. 

Білоцерківський національний аграрний університет



Іванчук А.В. E-mail: antonii.ivanchuk@gmail.com



Іванчук А.В. Онтогенез рослин в ізольованих штучних екосистемах: огляд. «Агробіологія», 2025. № 1. С. 55–64.

Ivanchuk A. Plant Ontogenesis in Isolated Artificial Ecosystems. «Agrobiology», 2025. no. 1, pp. 55–64.

Рукопис отримано: 31.03.2025 р.

Прийнято: 15.04.2025 р.

Затверджено до друку: 22.05.2025 р.

doi: 10.33245/2310-9270-2025-195-1-55-64

У статті висвітлено всебічний аналіз онтогенезу рослин в ізольованих штучних екосистемах, зосереджуючись на оптимізації методів мікроклонального розмноження *in vitro* та узагальненні сучасних наукових знань з цієї тематики. Ключовим результатом стало визначення критичних чинників, таких як склад поживного середовища, баланс фітогормонів та фізіологічний стан рослин-донорів, які суттєво впливають на органогенез та успіх акліматизації.

Зростаючий антропогенний тиск на природні екосистеми, зокрема зміна клімату, потребує впровадження інноваційних підходів до збереження біорізноманіття та відновлення екосистем. Метод мікроклонального розмноження рослин *in vitro* відкриває нові можливості для вирішення цих проблем.

У дослідженні розглянуто етапи онтогенезу рослин в штучних умовах, включаючи підготовку рослин-донорів, ініціацію експлантів, мультиплікацію, ризогенез та постасептичну адаптацію, з акцентом на відмінності від природного розвитку.

Було проведено бібліографічний аналіз рецензованих публікацій для систематизації знань про особливості фаз онтогенезу рослин в штучних умовах. Результати показали, що тривалість етапів онтогенезу, морфогенетичні процеси та фізіологічні механізми *in vitro* значною мірою залежать від контрольованих екологічних чинників, гормональної стимуляції та штучного живлення. Поступові протоколи акліматизації та оптимізовані умови культивування сприяли підвищенню ефективності морфогенезу та зменшенню стресу під час переходу до автотрофного живлення.

Отримані результати підкреслюють потенціал методів мікроклонального розмноження у збереженні біорізноманіття, відновленні екосистем, адаптації сільського господарства до зміни клімату та зменшенні використання пестицидів в агрофітоценозах. Цей огляд поглиблює теоретичне розуміння розвитку рослин у штучних екосистемах та надає основу для вдосконалення протоколів мікроклонального розмноження, зважаючи на перспективи сталого виробництва якісного рослинного матеріалу та масштабного екологічного відновлення.

Ключові слова: мікроклональне розмноження, біотехнологія, онтогенез рослин, екологія, *in vitro*, штучні екосистеми, асептична культура, мультиплікація, ризогенез, постасептична адаптація.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень. Зростаючі антропогенні навантаження на природні екосистеми, такі як зміна клімату та деградація земель, потребують розробки інноваційних підходів до збереження біорізноманіття та відновлення порушених екосистем. Метод мікроклонального розмноження (МКР) рослин *in vitro* відкриває нові можливості для вирішення цих проблем.

Методи мікроклонального розмноження, які передбачають вивчення біологічних процесів поза їхнім природним контекстом, стали неоціненними в екологічних дослідженнях. Вони дозволяють швидко та ефективно відтворювати рослини, зокрема ті, що мають низьку насінневу продуктивність або важко відтворюються в природних умовах, забезпечуючи їх збереження *ex situ*. Це важливо для підтримки генетичної різноманітності та створення резервних популяцій, що можуть бути використані для відновлення природних екосистем [1, 2].

Використання методів мікроклонального розмноження сприяє зниженню потреби в хімічних засобах захисту рослин, оскільки дає можливість швидко відтворювати рослини, стійкі до шкідників та хвороб. Можливість отримання рослин, вільних від хвороб, зменшує ризики, пов'язані з патогенами, які можуть знищити популяції видів, що перебувають під загрозою зникнення [3].

Методом відбору та розмноження рослин з корисними ознаками, таких як стійкість до посухи, засолення або високих температур, можна створювати популяції, які краще адаптовані до нових кліматичних умов.

За допомогою методів мікроклонального розмноження можливо швидко отримати значну кількість садивного матеріалу для відновлення екосистем, які постраждали від природних катаклізмів або антропогенного впливу. Наприклад, використання саджанців місцевих видів дерев для відновлення лісів, які постраждали від пожеж [4].

Успішне мікроклональне розмноження *Quercus robur*, навіть з дерев віком близько 800 років, ілюструє потенціал методів *in vitro* для відновлення давніх лісів та підтримки генетичного різноманіття в цих екосистемах. Можливість отримання значної кількості генетично ідентичних рослин гарантує, що зусилля з відновлення можуть бути здійснені ефективно і результативно, задовольняючи нагальну потребу у відновленні оселищ в умовах зміни клімату і антропогенного впливу [5].

Інтеграція методів мікроклонального розмноження *in vitro* з іншими біотехнологічними досягненнями, такими як генна інженерія та кріоконсервація, розширює можливості його застосування в екологічному контексті. Наприклад, використання методів кріоконсервації в поєднанні з методами МКР дозволяє довгостроково зберігати генетичний матеріал зникаючих видів, забезпечуючи збереження їх генетичного різноманіття для майбутніх поколінь. Таке поєднання технологій забезпечує надійну основу для вирішення проблем, пов'язаних із втратою біорізноманіття [6].

Хоча початкові витрати на впровадження технології *in vitro* можуть бути вищими через потребу в спеціалізованому обладнанні та навчанні персоналу, довгострокові переваги, такі як підвищена продуктивність, якість рослинного матеріалу та зменшення втрат від хвороб, компенсують ці інвестиції. Дослідження показують, що основними складовими вартості рослин, вирощених методом тканинної культури, є електроенергія, оплата праці та хімікати [7].

Дослідження підтверджують комерційну доцільність використання методів МКР для розмноження багатьох культур. Зокрема, у роботі В.В. Мацкевича розглянуто методи МКР та постасептичної адаптації різних видів рослин, що сприяє підвищенню їхньої життєздатності та продуктивності [8].

Однією з головних переваг методів мікроклонального розмноження рослин є можливість виробляти якісний садивний матеріал, незалежно від пори року. Цей безперервний виробничий цикл забезпечує постійне постачання матеріалу для фермерів і роздрібних торговців. Крім того, вирощування з використанням методів МКР потребує значно менше простору порівняно з традиційними методами, оскільки значну кількість рослин можна культивувати *in vitro* у відносно невеликих лабораторних приміщеннях. Така економія простору означає економію коштів на утримання приміщень [9].

Останні розробки біореакторних систем значно підвищили ефективність і масштабованість комерційного мікроклонального розмноження. Біореактори забезпечують контрольоване середовище для культивування рослинних тканин, дозволяючи автоматизувати процеси та зменшити ручну працю. Ці системи сприяють кращому засвоєнню поживних речовин і газообміну, що приводить до покращених темпів росту та якості саджанців [10].

Методи мікроклонального розмноження використовують для створення нових сортів рослин, адаптованих до специфічних умов, таких як посуха чи холодний клімат, що дозволяє підвищити ефективність сільськогосподарського виробництва, збільшити врожайність і розширити географію вирощування культур. Крім того, значно знижуються витрати на вирощування в довгостроковій перспективі завдяки зменшенню потреби у великій кількості посівного матеріалу. Швидке розмноження рослин скорочує час необхідний для вирощення готової до продажу продукції, підвищуючи рентабельність агробізнесу і задовольняючи попит споживачів [11].

Незважаючи на свої переваги, комерційне мікроклональне розмноження стикається з певними проблемами, серед яких можливість бактеріального зараження, потреба у кваліфікованій робочій силі та початкові витрати на створення лабораторій. Вирішення цих проблем потребує ретельної оптимізації протоколів, включаючи відбір експлантів, процедури стерилізації, формули живильних середовищ і умови навколишнього середовища. Впровадження суворих заходів контролю якості та застосування передових технологій, таких як автоматизація і використання біореакторів, може пом'якшити ці проблеми, забезпечуючи стабільне виробництво високоякісного садивного матеріалу [12, 13].

Глибоке розуміння процесів онтогенезу рослин в штучних екосистемах *in vitro* та *ex vitro* дозволить:

- Оптимізувати екологічні дослідження: використання ізолюваних умов для детального вивчення впливу окремих чинників на онтогенез рослин, дотримуючись принципу єдиної логічної відміни, дозволяє ідентифікувати причинно-наслідкові зв'язки між чинниками середовища та фізіологічними реакціями рослин.
- Зберегти генетичне різноманіття: мікроклональне розмноження може бути використане для збереження генетичного матеріалу цінних сортів рослин та дикорослих видів.
- Адаптувати сільське господарство до кліматичних змін: швидке розмноження високопродуктивних сортів дозволить оперативно замінювати культури, нестійкі до посух та інших стресів, на стійкіші сорти, що підвищить стабільність врожаїв в умовах мінливого клімату.
- Зменшити пестицидне навантаження на агрофітоценози: швидке розмноження стійких до хвороб і шкідників сортів сприятиме зменшенню використання хімічних засобів захисту рослин.

- Швидко реагувати на зміни ринку: можливість швидкого розмноження нових сортів дозволить аграріям оперативно реагувати на зміни попиту споживачів та потреби ринку, без значних додаткових витрат.

Дослідження онтогенезу рослин *in vitro* та *ex vitro* є актуальним і перспективним напрямом, який має значний потенціал для вирішення глобальних екологічних проблем в агросекторі з використанням біотехнологічних методів.

Мета дослідження. Узагальнення та аналіз сучасних наукових даних щодо особливостей онтогенезу рослин в ізолюваних штучних екосистемах, визначення ключових чинників, що впливають на їхній розвиток, а також оцінка перспектив подальших досліджень у цій сфері.

Методи дослідження. У дослідженні використано методи бібліографічного аналізу, систематизації та узагальнення наукової літератури з тематики онтогенезу рослин в ізолюваних штучних екосистемах. Інформаційною базою слугували наукові статті, опубліковані у рецензованих журналах, монографії та інші наукові джерела. Для керування бібліографічними даними та оформлення посилань застосовано менеджер джерел Zotero.

Результати дослідження та обговорення. Онтогенезом називають сукупність процесів, які визначають розвиток організму від моменту його утворення до природного завершення життєвого циклу. Ці процеси включають ряд послідовних стадій, кожна з яких характеризується фізіологічними, морфологічними та біохімічними змінами [14].

Ключовим аспектом онтогенезу є взаємодія генетичної програми організму із зовнішніми чинниками. Рослини демонструють феномен пластичності, що дозволяє їм змінювати напрямок росту або розвиток органів залежно від умов середовища, таких як освітленість, температура, наявність води чи поживних речовин. Наприклад, фотоперіодизм визначає час цвітіння багатьох рослин, тимчасом тривалі водні дефіцити порушують репродуктивні процеси та пригнічують ріст рослин, але водночас стимулюють утворення захисних структур, таких як трихоми [15].

Онтогенез рослин поділяється на наступні етапи:

1. *Ембріональний етап* починається з утворення зиготи та триває до формування зародка. На цьому етапі закладаються всі основні органи рослини. Сформоване насіння переходить в стан спокою. Цей період є критичним для подальшого розвитку, оскільки

будь-які порушення можуть призвести до аномалій або загибелі зародка.

2. *Ювенільний етап (молодість)*. За сприятливих умов навколишнього середовища насіння виходить з періоду спокою, після чого рослина переходить до стану активного наростання вегетативної маси (коренів, стебел та листків). Цей етап характеризується високою швидкістю поділу клітин та переходом рослини до автотрофного живлення.

3. *Генеративний етап* триває від початку формування генеративних органів рослини до припинення репродукції. Зменшується здатність рослини до регенерації, а також знижується активність росту вегетативних органів через перерозподіл поживних речовин та пріоритет репродукції. Цей етап є кульмінацією онтогенезу, адже впродовж нього забезпечується передача генетичної інформації наступному поколінню.

4. *Сенільний етап (старість)* – це період що триває від припинення репродукції до повного відмирання рослини. На цьому етапі поступово знижується інтенсивність життєвих процесів рослини, порушується синтез білків та накопичуються мертві клітини [14, 16].

Особливості онтогенезу *in vitro*. Культивування рослин *in vitro* забезпечує унікальні можливості для дослідження онтогенезу в контрольованих умовах. Цей процес охоплює дві основні стратегії: органогенез (формування нових органів із соматичних тканин) та соматичний ембріогенез (створення структур, подібних до зародкових, для регенерації цілої рослини) [17].

Етапи онтогенезу рослин *in vitro* подібні до тих, що відбуваються в природних умовах, однак мають специфічні особливості через контрольоване середовище, гормональну стимуляцію та штучне живлення [18].

1. Ембріональний етап:

- Утворення зародків можливе без генеративних органів через соматичний ембріогенез із калусної тканини або суспензійних культур.

- Соматичний ембріогенез імітує природний ембріогенез, але ініціюється в умовах живильного середовища за наявності ауксинів.

- Відсутність стадії спокою: розвиток ембріонів часто відбувається без перерви, що скорочує цикл [19].

2. Ювенільний етап:

- Ювенільність підтримується штучним середовищем, багатим на поживні речовини, гормони (цитокініни, ауксини) і безперервним освітленням.

- У рослин *in vitro* зберігається висока регенераційна здатність завдяки контролю умов, що затримує перехід до наступних фаз.

- Можливе явище реювенілізації: дорослі тканини повертаються до ювенільного стану під впливом специфічних умов (наприклад, культивування експлантів із генеративних рослин).

3. Генеративний етап:

- Формування генеративних органів відбувається лише за специфічного складу середовища.

4. Сенільний етап:

- Цей етап значно затримується через контрольовані умови культивування, що дозволяють подовжити життєвий цикл рослини.

- В умовах гетеротрофного живлення та додавання гормонів життєздатність клітин може підтримуватися тривалий час [14, 18].

Ключові чинники, що впливають на успішність *in vitro* онтогенезу, включають склад поживного середовища, тип фітогормонів, джерело експлантів та фізіологічні властивості вихідних рослин. Наприклад, використання цитокінінів у поєднанні з ауксинами суттєво покращує формування калусів та їх перехід до стадії регенерації органів. Вибір середовища та його модифікація впливають на детермінацію органогенезу, морфогенетичні реакції та швидкість росту [20].

Підготовчий етап МКР (етап «0»). Етап 0 мікроклонального розмноження, який ще називають етапом «відбору та підготовки рослин-донорів», має вирішальне значення для успіху наступних етапів культивування. Цей початковий етап передбачає відбір здорових рослин та оптимізацію їх фізіологічних умов.

Вирощування вихідних рослин відбувається в спеціальних депозитаріях з контрольованими умовами навколишнього середовища, такими як регульоване освітлення, температура і вологість, що покращує якість експлантів. Здійснюють попередню обробку регуляторами росту, наприклад цитокінінами чи гібереловою кислотою, для стимуляції розвитку експлантного матеріалу [1].

Перед вилученням експлантів рослини-донори піддають спеціальній обробці для покращення їхньої придатності для культивування. Використовують такі методи як обрізка для стимулювання розвитку бічних пагонів або застосування стимулюючих розчинів, що містять сахарозу і регулятори росту. Ці методи спрямовані на зміну фізіологічного стану рослини-донора, у такий спосіб покращуючи успішність ініціації культивування [21].

Важливим аспектом етапу 0 в МКР є забезпечення відсутності на рослинах-донорах патогенів, таких як грибки, бактерії, віруси та інші мікроорганізми, які можуть поставити під загрозу успіх культивування *in vitro*. Зараження патогенами призводить до погіршення приживлюваності культури, зниження темпів росту або повної зупинки процесу. Тому для ізоляції та захисту рослин-донорів від патогенів застосовують комплекс діагностичних, профілактичних та лікувальних заходів [22].

I етап МКР (отримання асептичної культури). Перший етап розмноження *in vitro* передбачає отримання асептичної культури у контрольованому середовищі, забезпечення її виживання та оптимізацію початкового росту. Він включає відбір відповідного матеріалу для експлантації та внесення експлантату у відповідне живильне середовище в стерильних умовах [14].

Експланти можуть бути отримані з різних частин рослин, включаючи кінчики пагонів, вузлові сегменти, листя або інші тканини, залежно від виду та бажаних результатів. Незрілі органи зазвичай мають вищу здатність до морфогенезу *in vitro*. Наприклад, за мікроклонального розмноження *Aloe trichosantha* для розробки ефективного протоколу розмноження *in vitro* як експланти використовували відгалуження пагонів [23].

Застосування відповідних препаратів має вирішальне значення для усунення або пригнічення патогенів і шкідників, які можуть зашкодити культурам *in vitro*. Для дезінфекції експлантатів зазвичай використовують засоби поверхневої стерилізації, такі як етанол і гіпохлорит натрію. Для захисту від ендofітних мікроорганізмів на первинні експланти наносять системні фунгіциди та бактерициди. Оптимізація цих обробок є життєво важливою для забезпечення балансу між знищенням патогенів і збереженням життєздатності експлантатів [14, 24].

Після стерилізації експланти поміщають на відповідне живильне середовище в асептичних умовах, щоб стимулювати початковий ріст і розвиток. До поживного середовища додають регулятори росту рослин, щоб стимулювати поділ і диференціацію клітин. Чинники навколишнього середовища, включаючи світло, температуру і вологість, ретельно контролюють для підтримки оптимального росту [14, 25].

Перший етап розмноження *in vitro* має вирішальне значення для приживлення експлантатів і значною мірою залежить від генетичних, фізіологічних та екологічних

чинників. Такі методи як оптимізація поживних середовищ і відбір ювенільних тканин, підвищують ймовірність успіху. Успішне завершення першого етапу приводить до створення асептичних культур з активним ростом, закладаючи основу для наступних етапів мікроклонального розмноження [26, 27].

II етап МКР (мультиплікація). Другий етап розмноження *in vitro*, який зазвичай називають мультиплікацією або живцюванням, зосереджений на швидкому збільшенні кількості пагонів, отриманих від первинного експланта. Ця фаза має вирішальне значення для отримання значної кількості саджанців за відносно короткий період [14].

Етап мультиплікації включає субкультивування нових пагонів на свіже живильне середовище для сприяння подальшій проліферації з метою експоненціального збільшення кількості пагонів. Зазвичай використовують модифіковані середовища, такі як MS (Murashige і Skoog) або WPM (Wood Plant Medium) [28].

Підтримання оптимальних умов навколишнього середовища також має важливе значення на етапі мультиплікації, оскільки ці чинники впливають на швидкість проліферації пагонів і загальний стан здоров'я рослин.

Успіх цього етапу значною мірою залежить від складу живильного середовища, зокрема від концентрації цитокинінів та ауксинів – регуляторів росту рослин, які сприяють поділу клітин та утворенню пагонів. Оптимізація балансу цитокинінів та ауксинів у середовищі, а також регулювання інтервалів субкультивування має важливе значення для досягнення максимальної швидкості проліферації [4, 29].

III етап МКР (ініціація ризогенезу). III етап мікроклонального розмноження, який зазвичай називають індукцією ризогенезу, є ключовим для успішного перетворення пагонів, вирощених *in vitro*, на повністю розвинені рослини, здатні до самостійного росту. На цьому етапі відбувається стимулювання коренеутворення, у такий спосіб саджанці готуються до аклімації та подальшого перенесення в умови відкритого ґрунту [14, 30].

На етапі ініціації ризогенезу пагони, отримані раніше, переносять у сприятливе для розвитку коренів середовище. Склад цього середовища має вирішальне значення – воно містить підвищений вміст ауксинів – регуляторів росту рослин, які сприяють ініціації ризогенезу та подовженню коренів. До найпоширеніших ауксинів, які використовують на цьому етапі належать індол-3-масляна

кислота (ІМК) та нафталіноцтова кислота (НОК). Формули середовищ ретельно оптимізують з урахуванням реакції конкретного виду, оскільки невідповідні концентрації можуть пригнічувати укорінення або призводити до аномальних змін в структурі коренів [31].

Середовище Мурасіге і Скуга (МС) та його модифікації широко використовують на цьому етапі завдяки їхній адаптивності. Зменшення вмісту азоту або зміна концентрації солей може покращити ефективність укорінення. Іноді для поглинання токсичних метаболітів і створення більш сприятливого середовища для росту коренів додають активоване вугілля [14, 30].

Ауксини можна використовувати в поєднанні з іншими регуляторами росту рослин, такими як цитокініни, щоб збалансувати співвідношення пагонів до коренів. Попередня обробка експлантів розчинами ауксинів також є поширеною практикою для підвищення швидкості ініціації ризогенезу та якості коренів, особливо у видів, які важко вкорінюються [32].

IV етап МКР (постасептична адаптація). Аклімація, або постасептична адаптація передбачає поступове перенесення рослин розмножених методами МКР з контрольованого стерильного середовища до більш динамічних і складних умов теплиці або польових умов [33].

Основна мета полягає в тому, щоб підготувати саджанці до стресів, таких як коливання температури, вологості та інтенсивності світла.

Успіх акліматизації залежить від здатності саджанця адаптуватися до нових умов навколишнього середовища. Це потребує значних фізіологічних та морфологічних змін. Умови *in vitro* зазвичай характеризуються високою вологістю та низькою інтенсивністю транспірації, що може призвести до фізіологічного шоку, коли рослини потрапляють у більш сухі та мінливі умови зовнішнього середовища. Щоб пом'якшити цей шок, зазвичай саджанці спочатку розміщують у контрольованому середовищі, наприклад, у теплиці, де вологість можна поступово знижувати. Такий поступовий вплив допомагає підвищити здатність рослин регулювати втрату води та адаптуватися до нових умов поглинання поживних речовин, що є критично важливим для їхнього приживання в польових умовах [34, 35].

Вибір субстрату і способу посадки під час акліматизації може суттєво вплинути на рівень успіху. Використання добре дренованого субстрату, який утримує достатню

кількість вологи, забезпечуючи необхідну аерацію, є життєво важливим. Дослідження показали, що субстрати, збагачені органічними речовинами, можуть покращити укорінення коренів і загальну життєздатність рослин після акліматизації [36]. Крім того, час перенесення з умов *in vitro* в умови *ex vitro* має вирішальне значення – саджанці мають бути достатньо вкоріненими і демонструвати здоровий ріст перед тим, як потрапити в зовнішні умови [37].

Умови освітлення також відіграють важливу роль у процесі аклімації. Надалі та ін. повідомили, що застосування монохроматичного світла позитивно вплинуло на успішність аклімації орхідей, вказуючи на те, що якість світла може впливати на пристосованість рослин до умов *ex vitro*. Цей висновок узгоджується з більш широким розумінням того, що інтенсивність і якість світла слід ретельно контролювати для запобігання стресу під час фази аклімації [38].

Мохаммед та ін. підкреслюють, що коливання температури навколишнього середовища та відносної вологості можуть негативно впливати на ріст рослин під час цього переходу. Тому підтримка стабільних умов навколишнього середовища має важливе значення для мінімізації стресу та сприяння успішній аклімації [39].

Висновки. Аналіз наукової літератури показав, що онтогенез рослин в умовах *in vitro* має специфічні особливості порівняно з природними умовами, включаючи відмінності у тривалості етапів розвитку, перебігу морфогенетичних процесів та фізіологічних механізмів, що зумовлено контрольованим середовищем та гормональною регуляцією.

Ключовими чинниками, що впливають на успішність онтогенезу *in vitro*, є склад поживного середовища, баланс фітогормонів, фізіологічний стан та генетичні особливості вихідних рослин, а також параметри мікроклімату (освітлення, температура, вологість). Оптимізація цих чинників дозволяє суттєво підвищити ефективність МКР.

Постасептична адаптація є критично важливим етапом, що забезпечує перехід рослин до автотрофного живлення та їх пристосування до умов відкритого середовища. Успішність цього етапу залежить від поступовості зміни умов культивування, вибору відповідного субстрату та регуляції освітлення й вологості.

Методи мікроклонального розмноження мають значний потенціал для вирішення глобальних екологічних проблем, зокрема

для збереження генетичного різноманіття, відновлення порушених екосистем, адаптації сільського господарства до кліматичних змін та зменшення пестицидного навантаження на агрофітоценози.

Перспективними напрямками досліджень онтогенезу рослин в ізолюваних штучних екосистемах є вдосконалення протоколів розмноження, оптимізація процесів постасептичної адаптації та інтеграція методів МКР з іншими біотехнологічними підходами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. In vitro Propagation of Some Threatened Plant Species of India / C.R. Deb et al. *Current Science*. 2018. Vol. 114. No 03. P. 567. DOI: 10.18520/cs/v114/i03/567-575.
2. Ghareb H.E.-S., Ibrahim S.D., Hegazi G.A. E.-M. In vitro propagation and DNA barcode analysis of the endangered *Silene schimperiana* in Saint Katherine protectorate. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*. 2020. Vol. 18. No 1. 41 p. DOI: 10.1186/s43141-020-00052-8.
3. In vitro Propagation Journey of Ornamental *Gladiolus* (*Gladiolus* Species): A Systematic Review Analysis Based on More Than 50 Years Research / M. Kumar et al. *Horticulturae*. 2024. Vol. 10. No 2. 148 p. DOI: 10.3390/horticulturae10020148.
4. Plants in vitro propagation with its applications in food, pharmaceuticals and cosmetic industries; current scenario and future approaches / A. Hasnain et al. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. 21 p. DOI: 10.3389/fpls.2022.1009395.
5. Successful In vitro Shoot Multiplication of *Quercus robur* L. / P. Chmielarz et al. *Trees Aged up to 800 Years*. *Plants*. 2023. Vol. 12. No 12. 2230 p. DOI: 10.3390/plants12122230.
6. Al-Ahmad H. In vitro Decoated Seed Germination and Seedling Development for Propagation of Wild Mandrake (*Mandragora autumnalis* Bertol.). *Plants*. 2020. Vol. 9. No 10. 1339 p. DOI: 10.3390/plants9101339.
7. Tomar U., Neg U., Sinha A.K., Dantu P. An Overview of the Economic Factors Influencing Micropropagation. *My Forest*. 2008. URL: https://www.researchgate.net/publication/236149384_An_Overview_of_the_Economic_Factors_Influencing_Micropropagation.
8. Мацкевич В.В. Мікроклональне розмноження видів рослин in vitro та їх постасептична адаптація. Суми: Сумський національний аграрний університет, 2021. 402 с. URL: https://science.snau.edu.ua/wp-content/uploads/2021/01/dis_matkevitch_compressed-1-190.pdf.
9. Chen J., Henny R.J. Commercial Production of Ornamental Tropical Foliage Plants: Micropropagation: ENH1259/EP520, 5/2015. *EDIS*. 2015. Vol. 2015. No 5. 4 p. DOI: 10.32473/edis-ep520-2015.
10. Murthy H.N., Joseph K.S., Paek K.Y., Park S.Y. Bioreactor systems for micropropagation of plants: present scenario and future prospects. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. 17 p. DOI: 10.3389/fpls.2023.1159588.
11. Chawla H.S. Introduction to plant biotechnology. Enfield, NH Jersey Plymouth: Science Publishers. 2009. 698 p.
12. Kitto S.L. Commercial Micropropagation. *HortScience*. 1997. Vol. 32. No 6. P. 1012–1014. DOI: 10.21273/HORTSCI.32.6.1012.
13. An Academic and Technical Overview on Plant Micropropagation Challenges / N. Abdalla et al. *Horticulturae*. 2022. Vol. 8. No 8. 677 p. DOI: 10.3390/horticulturae8080677.
14. Мікроклональне розмноження рослин / В.В. Мацкевич та ін. Суми, 2023. 209 с. URL: <http://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/9275>.
15. Plant Adaptation and Tolerance to Environmental Stresses: Mechanisms and Perspectives / A. Raza et al. *Plant Ecophysiology and Adaptation under Climate Change: Mechanisms and Perspectives* I. Singapore: Springer Singapore, 2020. P. 117–145. DOI: 10.1007/978-981-15-2156-0_5.
16. Григорчук І.В. Фізіологія рослин (курс лекцій): навч. посіб. Кам'янець-Подільський: ТОВ «Друкарня «Рута», 2021. 194 с. URL: https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/1298573/mod_resource/content/0/Hryhorchuk-I.D.-Fiziologia-roslyn-%28kurs-lektsii%29.pdf.
17. Bhatia S., Bera T. Somatic Embryogenesis and Organogenesis. *Modern Applications of Plant Biotechnology in Pharmaceutical Sciences*. Elsevier. 2015. P. 209–230. DOI: 10.1016/B978-0-12-802221-4.00006-6.
18. Подгаєцький А.А., Мацкевич В.В., Подгаєцький А.А. Особливості мікроклонального розмноження видів рослин: монографія. Біла Церква: БНАУ, 2018. 209 с. URL: <http://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/2015>.
19. Gaj M.D. Factors Influencing Somatic Embryogenesis Induction and Plant Regeneration with Particular Reference to *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. *Plant Growth Regulation*. 2004. Vol. 43. No 1. P. 27–47. DOI: 10.1023/B:GROW.0000038275.29262.fb.
20. Thorpe T.A. History of plant tissue culture. *Molecular Biotechnology*. 2007. Vol. 37. No 2. P. 169–180. DOI: 10.1007/s12033-007-0031-3.
21. Rathour A., Kumar R. Plant Propagation Techniques in Horticulture. *Recent Trend in Agriculture*. New Delhi, 2023. P. 125–140. URL: https://www.researchgate.net/publication/375342362_Plant_Propagation_Techniques_in_Horticulture.
22. Leifert C., Cassells A.C. Microbial hazards in plant tissue and cell cultures. *In vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*. 2001. Vol. 37. No. 2. P. 133–138. DOI: 10.1007/s11627-001-0025-y.
23. Hailu A., Sbhatu D.B., Abraha H.B. In vitro Micropropagation of Industrially and Medicinally Useful Plant *Aloe trichosantha* Berger Using Offshoot Cuttings. *The Scientific World Journal*. 2020. Vol. 2020. P. 1–7. DOI: 10.1155/2020/3947162.
24. Phytotoxicity and Other Adverse Effects on the In vitro Shoot Cultures Caused by Virus

Elimination Treatments: Reasons and Solutions / K. Magyar-Tábori et al. *Plants*. 2021. Vol. 10. No 4. 670 p. DOI: 10.3390/plants10040670.

25. Tesliuk N.I., Lytvyn M.L., Hudzenko T.V. Optimization of the nutrient medium for the primary stages of common walnut microclonal propagation in vitro. *Microbiology & Biotechnology*. 2023. No 3(56). P. 24–33. DOI: 10.18524/2307-4663.2022.3(56).265806.

26. Krivmane B., Ruņģe K.S., Samsone I., Ruņģis D.E. Differentially Expressed Conserved Plant Vegetative Phase-Change-Related microRNAs in Mature and Rejuvenated Silver Birch In vitro Propagated Tissues. *Plants*. 2023. Vol. 12. No 10. 1993 p. DOI: 10.3390/plants12101993.

27. Light condition, flask sealing, and cultivation time on the germination and initial in vitro development of *Dendrobium nobile* Lindl / I.D.S. Ribeiro et al. *Ornamental Horticulture*. 2022. Vol. 28. No 4. P. 407–413. DOI: 10.1590/2447-536x.v28i4.2515.

28. Gashi B., Abdullai K., Sota V., Kongjika E. Micropropagation and in vitro conservation of the rare and threatened plants *Ramonda serbica* and *Ramonda nathaliae*. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2015. Vol. 21. No 1. P. 123–136. DOI: 10.1007/s12298-014-0261-3.

29. Kumar N., Reddy M. In vitro Plant Propagation: A Review. *Journal of Forest and Environmental Science*. 2011. Vol. 27. URL: https://www.researchgate.net/publication/263638941_In_vitro_Plant_Propagation_A_Review.

30. Torres K.C. Stages of Micropropagation. *Tissue Culture Techniques for Horticultural Crops*. Boston, MA: Springer US, 1989. P. 52–65. DOI: 10.1007/978-1-4615-9756-8_3.

31. Genome size analysis of field grown and somatic embryo regenerated plants in *Allium sativum* L. / M.Q. Malik et al. *Journal of Applied Genetics*. 2020. Vol. 61. No 1. P. 25–35. DOI: 10.1007/s13535-019-00536-5.

32. Pacholczak A., Nowakowska K. Optimizing micropropagation of *Miscanthus sinensis* ‘Gold Bar’ by shortening the production cycle and reducing acclimation stress through the use of selected growth regulators. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*. 2024. Vol. 159. No 2. 28 p. DOI: 10.1007/s11240-024-02886-3.

33. Jagiełło-Kubiec K., Nowakowska K., Łukaszevska A. J., Pacholczak A. Acclimation to Ex Vitro Conditions in Ninebark. *Agronomy*. 2021. Vol. 11. No 4. 612 p. DOI: 10.3390/agronomy11040612.

34. Identification and micropropagation of virus-free black pepper genotypes (*Piper nigrum* L.) / G.K.S. Ramos et al. *Revista Ciência Agrícola*. 2020. Vol. 18. No 1. P. 57–64. DOI: 10.28998/rca.v18i1.7049.

35. Purmale L., Osvalde A., Karlsons A., Ievinsh G. Comparison of two subspecies of a halophytic multi-use plant *Mertensia maritima* in vitro and ex vitro: propagation, salinity tolerance and mineral nutrition. *Environmental and Experimental Biology*. 2024. Vol. 22. No 1. P. 29–40. DOI: 10.22364/eeb.22.04.

36. Fan C., Manivannan A., Wei H. Light Quality-Mediated Influence of Morphogenesis in Micropropagated Horticultural Crops: A Comprehensive Overview. *BioMed Research International*. 2022. Vol. 2022. P. 1–11. DOI: 10.1155/2022/4615079.

37. Micropropagation and Production of Health Promoting Lignans in *Linum usitatissimum* / I. Khan et al. *Plants*. 2020. Vol. 9. No 6. 728 p. DOI: 10.3390/plants9060728.

38. Impact of monochromatic lights on the in vitro development of *Cattleya walkeriana* and effects on acclimatization / M.C. Nadal et al. *Ornamental Horticulture*. 2023. Vol. 29. No 2. P. 238–248. DOI: 10.1590/2447-536x.v29i2.2610.

39. Mohammed M., Munir M., Ghazzawy H.S. Design and Evaluation of a Smart Ex Vitro Acclimatization System for Tissue Culture Plantlets. *Agronomy*. 2022. Vol. 13. No 1. 78 p. DOI: 10.3390/agronomy13010078.

REFERENCES

1. Deb, C.R., Rout, G.R., Mao, A.A., Nandi, S.K., Nilasana Singha, R.K., Vijayan, D., Langhu, T., Kikon, Z.P., Pradhan, S., Tariq, M., Swain, D. (2018). In vitro Propagation of Some Threatened Plant Species of India. *Current Science*. Vol. 114, no. 03, 567 p. DOI: 10.18520/cs/v114/i03/567-575.

2. Ghareb, H.E.-S., Ibrahim, S.D., Hegazi, G.A.E.-M. (2020). In vitro propagation and DNA barcode analysis of the endangered *Silene schimperiana* in Saint Katherine protectorate. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*. Vol. 18, no. 1, 41 p. DOI: 10.1186/s43141-020-00052-8.

3. Kumar, M., Chaudhary, V., Sirohi, U., Singh, J., Yadav, M.K., Prakash, S., Kumar, A., Kumar, V., Pal, V., Chauhan, C., Kaushik, K., Shukla, D., Motla, R., Kumar, S., Malik, S. (2024). In vitro Propagation Journey of Ornamental *Gladiolus* (*Gladiolus* Species): A Systematic Review Analysis Based on More Than 50 Years Research. *Horticulturae*. Vol. 10, no. 2, 148 p. DOI: 10.3390/horticulturae10020148.

4. Hasnain, A., Naqvi, S.A.H., Ayesha, S.I., Khalid, F., Ellahi, M., Iqbal, S., Hassan, M.Z., Abbas, A., Adamski, R., Markowska, D., Baazeem, A., Mustafa, G., Moustafa, M., Hasan, M.E., Abdelhamid, M.M.A. (2022). Plants in vitro propagation with its applications in food, pharmaceuticals and cosmetic industries; current scenario and future approaches. *Frontiers in Plant Science*. Vol. 13, 21 p. DOI: 10.3389/fpls.2022.1009395.

5. Chmielarz, P., Kotlarski, S., Kalembe, E.M., Martins, J.P.R., Michalak, M. (2023). Successful In vitro Shoot Multiplication of *Quercus robur* L. Trees Aged up to 800 Years. *Plants*. Vol. 12, no. 12, 2230 p. DOI: 10.3390/plants12122230.

6. Al-Ahmad, H. (2020). In vitro Decoated Seed Germination and Seedling Development for Propagation of Wild Mandrake (*Mandragora autumnalis* Bertol.). *Plants*. Vol. 9, no. 10, 1339 p. DOI: 10.3390/plants9101339.

7. Tomar, U., Neg, U., Sinha, A.K., Dantu, P. (2008). An Overview of the Economic Factors Influ-

encing Micropropagation. My Forest. Available at: https://www.researchgate.net/publication/236149384_An_Overview_of_the_Economic_Factors_Influencing_Micropropagation.

8. Matskevych, V.V. (2021) Mikroklonalne rozmnozhenia vydiv roslyn in vitro ta yikh postaseptychna adaptatsiia [Microclonal propagation of plant species in vitro and their post-septic adaptation]. Sumy, 402 p. Available at: https://science.snau.edu.ua/wp-content/uploads/2021/01/dis_mackevit_compressed-1-190.pdf.

9. Chen, J., Henny, R.J. (2015). Commercial Production of Ornamental Tropical Foliage Plants: Micropropagation: ENH1259/EP520, 5/2015. EDIS. Vol. 2015, no. 5, 4 p. DOI: 10.32473/edis-ep520-2015.

10. Murthy, H.N., Joseph, K.S., Paek, K.Y., Park, S.Y. (2023). Bioreactor systems for micropropagation of plants: present scenario and future prospects. *Frontiers in Plant Science*. Vol. 14, 17 p. DOI: 10.3389/fpls.2023.1159588.

11. Chawla, H.S. (2009). Introduction to plant biotechnology. Third edition. Enfield, NH Jersey Plymouth, Science Publishers, 698 p.

12. Kitto, S.L. (1997). Commercial Micropropagation. *HortScience*. Vol. 32, no. 6, pp. 1012–1014. DOI: 10.21273/HORTSCI.32.6.1012.

13. Abdalla, N., El-Ramady, H., Seliem, M.K., El-Mahrouk, M.E., Taha, N., Bayoumi, Y., Shalaby, T.A., Dobránszki, J. (2022). An Academic and Technical Overview on Plant Micropropagation Challenges. *Horticulturae*. Vol. 8, no. 8, 677 p. DOI: 10.3390/horticulturae8080677.

14. Matskevych, V.V., Kravchenko, N.V., Podhaietskyi, A.A., Matskevych, O.V., Shyta, O.P., Hnitskyi, M.O. (2023) Mikroklonalne rozmnozhenia roslyn [Microclonal propagation of plants]. Sumy, 209 p. Available at: <http://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/9275>.

15. Raza, A., Ashraf, F., Zou, X., Zhang, X., Tosif, H. (2020). Plant Adaptation and Tolerance to Environmental Stresses: Mechanisms and Perspectives. *Plant Ecophysiology and Adaptation under Climate Change: Mechanisms and Perspectives I*. Singapore, Springer Singapore, pp. 117–145. DOI: 10.1007/978-981-15-2156-0_5.

16. Hryhorchuk, I.V. (2021). Fiziologhiia roslyn (kurs lektii): navch. posib. [Physiology of plants (course of lectures)]. Kamianets-Podilskyi, «Ruta Printing House» LLC, 194 p. Available at: https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/1298573/mod_resource/content/0/Hryhorchuk-I.D.-Fiziologhiia-roslyn-%28kurs-lektii%29.pdf.

17. Bhatia, S., Bera, T. (2015). Somatic Embryogenesis and Organogenesis. *Modern Applications of Plant Biotechnology in Pharmaceutical Sciences*. Elsevier, pp. 209–230. DOI: 10.1016/B978-0-12-802221-4.00006-6.

18. Podhaietskyi, A.A., Matskevych, V.V., Podhaietskyi, A.A. (2018). Osoblyvosti mikroklonalnoho rozmnozhenia vydiv roslyn: monohrafiia [Features of microclonal reproduction of plant species]. Bila Tserkva, BNAU, 209 p. Available at: <http://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/2015>.

19. Gaj, M.D. (2004). Factors Influencing Somatic Embryogenesis Induction and Plant Regeneration with Particular Reference to *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. *Plant Growth Regulation*. Vol. 43, no. 1, pp. 27–47. DOI: 10.1023/B:GROW.0000038275.29262.fb.

20. Thorpe, T.A. (2007). History of plant tissue culture. *Molecular Biotechnology*. Vol. 37, no. 2, pp. 169–180. DOI: 10.1007/s12033-007-0031-3.

21. Rathour, A., Kumar, R. (2023). Plant Propagation Techniques in Horticulture. *Recent Trend in Agriculture*. New Delhi, pp. 125–140. Available at: https://www.researchgate.net/publication/375342362_Plant_Propagation_Techniques_in_Horticulture.

22. Leifert, C., Cassells, A.C. (2001). Microbial hazards in plant tissue and cell cultures. In *vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*. Vol. 37, no. 2, pp. 133–138. DOI: 10.1007/s11627-001-0025-y.

23. Hailu, A., Sbhatu, D.B., Abraha, H.B. (2020). In vitro Micropropagation of Industrially and Medicinally Useful Plant *Aloe trichosanthes* Berger Using Offshoot Cuttings. *The Scientific World Journal*. Vol. 2020, pp. 1–7. DOI: 10.1155/2020/3947162.

24. Magyar-Tábori, K., Mendler-Drienyovszki, N., Hanász, A., Zsombik, L., Dobránszki, J. (2021). Phytotoxicity and Other Adverse Effects on the In vitro Shoot Cultures Caused by Virus Elimination Treatments: Reasons and Solutions. *Plants*. Vol. 10, no. 4, 670 p. DOI: 10.3390/plants10040670.

25. Tesliuk, N.I., Lytvyn, M.L., Hudzenko, T.V. (2023). Optimization of the nutrient medium for the primary stages of common walnut microclonal propagation in vitro. *Microbiology & Biotechnology*. no. 3(56), pp. 24–33. DOI: 10.18524/2307-4663.2022.3(56).265806.

26. Krivmane, B., Ruņģe, K.S., Samsone, I., Ruņģis, D.E. (2023). Differentially Expressed Conserved Plant Vegetative Phase-Change-Related microRNAs in Mature and Rejuvenated Silver Birch In vitro Propagated Tissues. *Plants*. Vol. 12, no. 10, 1993 p. DOI: 10.3390/plants12101993.

27. Ribeiro, I.D.S., Ribeiro, L.M., Soares, J.S., Ramos, J.C.M., Sorgato, J.C. (2022). Light condition, flask sealing, and cultivation time on the germination and initial in vitro development of *Dendrobium nobile* Lindl. *Ornamental Horticulture*. Vol. 28, no. 4, pp. 407–413. DOI: 10.1590/2447-536x.v28i4.2515.

28. Gashi, B., Abdullai, K., Sota, V., Kongjika, E. (2015). Micropropagation and in vitro conservation of the rare and threatened plants *Ramonda serbica* and *Ramonda nathaliae*. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. Vol. 21, no. 1, pp. 123–136. DOI: 10.1007/s12298-014-0261-3.

29. Kumar, N., Reddy, M. (2011). In vitro Plant Propagation: A Review. *Journal of Forest and Environmental Science*. Vol. 27. Available at: https://www.researchgate.net/publication/263638941_In_vitro_Plant_Propagation_A_Review.

30. Torres, K.C. (1989). Stages of Micropropagation. *Tissue Culture Techniques for Horticultural Crops*. Boston, MA, Springer US, pp. 52–65. DOI: 10.1007/978-1-4615-9756-8_3.

31. Malik, M.Q., Mujib, A., Gulzar, B., Zafar, N., Syeed, R., Mamgain, J., Ejaz, B. (2020). Genome size analysis of field grown and somatic embryo regenerated plants in *Allium sativum* L. *Journal of Applied Genetics*. Vol. 61, no. 1, pp. 25–35. DOI: 10.1007/s13353-019-00536-5.

32. Pacholczak, A., Nowakowska, K. (2024). Optimizing micropropagation of *Miscanthus sinensis* “Gold Bar” by shortening the production cycle and reducing acclimation stress through the use of selected growth regulators. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*. Vol. 159, no. 2, 28 p. DOI: 10.1007/s11240-024-02886-3.

33. Jagiełło-Kubiec, K., Nowakowska, K., Łukaszevska, A.J., Pacholczak, A. (2021). Acclimation to Ex Vitro Conditions in Ninebark. *Agronomy*. Vol. 11, no. 4, 612 p. DOI: 10.3390/agronomy11040612.

34. Ramos, G.K.S., Lemos, O.F.D., Cunha, E.F.M., Boari, A.D.J., Mendonça, D.P., Dos Santos, L.R.R., Rodrigues, S.D.M., De Menezes, I.C. (2020). Identification and micropropagation of virus-free black pepper genotypes (*Piper nigrum* L.). *Revista Ciência Agrícola*. Vol. 18, no. 1, pp. 57–64. DOI: 10.28998/rca.v18i1.7049.

35. Purmale, L., Osvalde, A., Karlsons, A., Ievinsh, G. (2024). Comparison of two subspecies of a halophytic multi-use plant *Mertensia maritima* in vitro and ex vitro: propagation, salinity tolerance and mineral nutrition. *Environmental and Experimental Biology*. Vol. 22, no. 1, pp. 29–40. DOI: 10.22364/eeb.22.04.

36. Fan, C., Manivannan, A., Wei, H. (2022). Light Quality-Mediated Influence of Morphogenesis in Micropropagated Horticultural Crops: A Comprehensive Overview. *BioMed Research International*. Vol. 2022, pp. 1–11. DOI: 10.1155/2022/4615079.

37. Khan, I., Khan, M.A., Shehzad, M.A., Ali, A., Mohammad, S., Ali, H., Alyemeni, M.N., Ahmad, P. (2020). Micropropagation and Production of Health Promoting Lignans in *Linum usitatissimum*. *Plants*. Vol. 9, no. 6, 728 p. DOI: 10.3390/plants9060728.

38. Nadal, M.C., Machado, N.B., Santos, C.S.D., Flores, J.H.N., Dória, J., Pasqual, M. (2023). Impact of monochromatic lights on the in vitro development of *Cattleya walkeriana* and effects on acclimatization. *Ornamental Horticulture*. Vol. 29, no. 2, pp. 238–248. DOI: 10.1590/2447-536x.v29i2.2610.

39. Mohammed, M., Munir, M., Ghazzawy, H.S. (2022). Design and Evaluation of a Smart Ex Vitro Acclimatization System for Tissue Culture Plantlets. *Agronomy*. Vol. 13, no. 1, 78 p. DOI: 10.3390/agronomy13010078.

Plant ontogenesis in isolated artificial ecosystems: a review

Ivanchuk A.

This paper presents a comprehensive analysis of plant ontogenesis in isolated artificial ecosystems, focusing on optimizing in vitro microclonal propagation techniques and generalization of current scientific knowledge on this topic. The key result was the identification of critical factors, including nutrient medium composition, phytohormonal balance, and donor plant physiological conditions, significantly affecting organogenesis and acclimatization success.

Increasing anthropogenic pressure on natural ecosystems, such as climate changes requires innovative approaches to biodiversity conservation and ecosystems restoration. In vitro microclonal propagation of plants opens up new possibilities for solving these problems. This research investigated the distinct phases of plant ontogenesis in artificial conditions, including donor plant preparation, explant initiation, multiplication, rooting and post-aseptic adaptation, with an emphasis on the difference from natural development.

A bibliographic analysis of peer-reviewed publications was conducted to systematize knowledge on the peculiarities of plant development phases in artificial conditions. The results showed that the duration of ontogenetic stages, morphogenetic processes, and physiological mechanisms in vitro depend heavily on controlled environmental factors, hormonal stimulation and artificial nutrition. Gradual acclimatization protocols and optimized cultivation conditions resulted in increased efficiency of morphogenesis and decreased stress during the transition to autotrophic nutrition.

The obtained results highlight the potential of micropropagation techniques in biodiversity conservation, ecosystems restoration, agriculture adaptation to climate changes, and reduction of pesticide use in agrophytocenoses. This review deepens the theoretical understanding of plant development in artificial ecosystems and provides a basis for improving micropropagation protocols, taking into account the prospects for sustainable production of high-quality plant material and large-scale ecological restoration.

Key words: micropropagation, biotechnology, plant tissue culture, plant ontogenesis, ecology, in vitro, artificial ecosystems, aseptic culture, multiplication, rhizogenesis, post-aseptic adaptation.



Copyright: Іванчук А.В. © This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

ORCID iD:

Іванчук А.В.

<https://orcid.org/0009-0007-9358-6678>

