

UDC 663.81:579.864:634.723

DOI: 10.58407/bht.2.26.20



Copyright (c) 2026 Iryna Korotkova, Tetiana Chaika, Kateryna Kozhushko, Daria Trystan, Olha Barabolia

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Ірина Короткова, Тетяна Чайка, Катерина Кожушко,
Дар'я Тристан, Ольга Бараболя

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФЕРМЕНТАЦІЇ СОКУ ЧОРНОЇ СМОРОДИНИ
КУЛЬТУРОЮ *LACTOBACILLUS PLANTARUM* LP-115



Iryna Korotkova, Tetiana Chaika, Kateryna Kozhushko,
Daria Trystan, Olha Barabolia

STUDY OF BLACK CURRANT JUICE FERMENTATION PROCESS BY
LACTOBACILLUS PLANTARUM LP-115

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Дослідити особливості процесу молочнокислої ферментації соку чорної смородини культурою *Lactobacillus plantarum* LP-115 шляхом оцінювання динаміки фізико-хімічних, мікробіологічних і біохімічних показників для визначення особливостей його перебігу й обґрунтування перспектив використання культури у ферментації плодово-ягідної сировини.

Методологія. Проведено дослідження процесу ферментації соку чорної смородини культурою *L. plantarum* LP-115 у статичних мікроаерофільних умовах. У процесі ферментації оцінювали динаміку активної та титрованої кислотності, чисельності життєздатних клітин, вмісту розчинних цукрів і антиоксидантної активності. Активну та титровану кислотність визначали потенціометричним і титриметричним методами, чисельність життєздатних клітин – методом серійних десятикових розведень із поверхневим висівом на поживне середовище, вміст розчинних цукрів – рефрактометричним методом, антиоксидантну активність – спектрофотометричним методом із використанням DPPH. Взаємозв'язки між дослідними показниками аналізували методом головних компонент (PCA).

Наукова новизна. На основі комплексного аналізу фізико-хімічних, мікробіологічних і біохімічних показників та методу головних компонент встановлено закономірності перебігу ферментаційного процесу й взаємозв'язки між його основними показниками. Підтверджено перспективність використання культури *L. plantarum* LP-115 для ферментації плодово-ягідної сировини.

Висновки. Встановлено, що впродовж ферментації (із фазою найактивнішого метаболізму в інтервалі 12–24 год) чисельність *L. plantarum* LP-115 збільшилася на 2,29 lg КУО/мл. Активний ріст культури супроводжувався переважним споживанням глюкози (зниження на 54,3 %) порівняно з фруктозою (на 40,3 %), інтенсивним кислотоутворенням зі зниженням рН до 2,88, підвищенням титрованої кислотності до 70,2 °Т та зростанням антиоксидантної активності ферментованої основи з 42,5 до 70,6 % унаслідок мікробній біотрансформації фенольних сполук чорної смородини.

Дослідження підтвердило ефективність використання *L. plantarum* LP-115 для ферментації соку чорної смородини, що проявилось в інтенсивному кислотоутворенні, активному рості культури, споживанні розчинних цукрів і підвищенні антиоксидантної активності. Найбільш інтенсивний перебіг процесу відзначено в інтервалі 12–24 год, що дозволяє рекомендувати 24 години як оптимальну тривалість ферментації за досліджених умов.

Ключові слова: сік чорної смородини, *Lactobacillus*, молочнокисла ферментація, титрована кислотність, антиоксидантна активність, споживання вуглеводів, функціональні продукти

ABSTRACT

Purpose of the work. To investigate the characteristics of the lactic acid fermentation of blackcurrant juice by the *Lactobacillus plantarum* LP-115 culture through the evaluation of the dynamics of physicochemical, microbiological, and biochemical parameters in order to determine the features of its course and substantiate the prospects for using the culture in the fermentation of fruit and berry raw materials.

Methodology. The fermentation process of blackcurrant juice by *L. plantarum* LP-115 culture was investigated under static microaerophilic conditions. During fermentation, the dynamics of active and titrated acidity, viable cell counts, soluble sugar content, and antioxidant activity were evaluated. Active and titratable acidity were determined using potentiometric and

titrimetric methods, viable cell counts were enumerated by the serial decimal dilutions followed by surface plating on a culture medium, soluble sugar content was measured refractometrically; and antioxidant activity was determined spectrophotometrically using the DPPH assay. Relationships among the studied parameters were analyzed using principal component analysis (PCA).

Scientific novelty. Based on the integrated analysis of physicochemical, microbiological, and biochemical parameters and the principal component analysis, the patterns of blackcurrant juice fermentation process and the relationships among its key indicators were established. The prospects of *L. plantarum* LP-115 for the fermentation of fruit and berry raw materials was confirmed.

Conclusions. It was established that during fermentation, with the most intensive metabolic activity occurring between 12 and 24 h, the viable cell count of *L. plantarum* LP-115 increased by 2.29 log CFU/mL. Active growth of the culture was accompanied by the predominant consumption of glucose (a decrease of 54.3 %) compared to fructose (by 40.3 %), intensive acid formation with a decrease in pH to 2.88, an increase in titrated acidity to 70.2 °T and an increase in the antioxidant activity of the fermented base from 42.5 to 70.6 % due to microbial biotransformation of blackcurrant phenolic compounds.

The study confirmed the suitability of *L. plantarum* LP-115 for the fermentation of blackcurrant juice, as evidenced by intensive organic acid production, active culture growth, soluble sugar consumption, and increased antioxidant activity. The most intensive phase of the fermentation process occurred between 12 and 24 h, supporting the recommendation of 24 h as the optimal fermentation time under the studied conditions.

Key words: blackcurrant juice, *Lactobacillus*, lactic acid fermentation, titratable acidity, antioxidant activity, carbohydrate consumption, functional foods

Вступ

Ферментація фруктових соків за допомогою бактеріальних культур є одним із перспективних підходів до створення функціональних напоїв, оскільки забезпечує поєднання природних біологічно активних компонентів рослинної сировини з метаболітами, що синтезуються мікроорганізмами під час ферментації. Найбільшого поширення у технологіях ферментації набули представники родів *Lactobacillus* та *Bifidobacterium*, які переважно використовувалися у виробництві ферментованих молочних продуктів. Однак нещодавні дослідження продемонстрували їхню життєздатність і метаболічну активність у рослинних субстратах (Garcia et al., 2020; Žvirdauskienė et al., 2025).

Вибір штамів для виготовлення ферментованих рослинних напоїв визначається їхньою здатністю перетворювати складні вуглеводи та формувати бажані сенсорні властивості продукту (da Silva Vale et al., 2023). Крім того, вони не повинні утворювати небажані метаболіти, сторонні присмаки або біогенні аміни під час ферментації (Buruleanu et al., 2009; Fessard & Remize, 2019). Оскільки властивості обраної бактеріальної культури суттєво впливають на фізико-хімічні та функціональні характеристики кінцевого продукту, вона повинна характеризуватися високою адаптивністю до умов ферментації та позитивно впливати на органолептичний

профіль напою (Terpou et al., 2019; Ayed et al., 2020).

Найчастіше для ферментації рослинної сировини використовують представників родів *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Enterococcus*, *Lactococcus*, *Streptococcus* та термостійкі спороутворювальні бактерії роду *Bacillus*, проте провідне місце у виробництві ферментованих рослинних продуктів займають бактерії роду *Lactobacillus*.

Ферментація фруктових соків молочнокислими бактеріями супроводжується біотрансформацією фенольних сполук, що призводить до підвищення антиоксидантної активності продукту (Selvaraj & Gurumurthy, 2023). Фенольні сполуки діють як потужні антиоксиданти, нейтралізуючи вільні радикали за допомогою певних механізмів, наприклад, перенесення атома водню або перенесення електрона (Wu et al., 2020). Хоча рослинні фенольні сполуки існують переважно у зв'язаних формах, таких як глікозиди, естери або полімери, що обмежує їхню антиоксидантну ефективність, мікробна ферментація може підвищити їхню біодоступність.

Lactobacillus – це грампозитивні, неспороутворювальні, непатогенні бактерії, зазвичай анаеробні або факультативно анаеробні, які метаболізують вуглеводи з утворенням молочної кислоти (Rodríguez et al., 2021), беруть участь у біотрансформації компонентів рослинної сировини, сприяючи

перетворенню білків, целюлози та інші речовин шляхом вивільнення антиоксидантних пептидів та модифікації фенольних сполук (Li et al., 2022; Ayar-Sümer et al., 2024). Крім того, вони синтезують широкий спектр біологічно активних метаболітів, включаючи коротколанцюгові жирні кислоти, аміни, бактеріоцини, вітаміни та екзополісахариди, що сприяє подовженню терміну придатності, покращенню сенсорних властивостей та підвищенню функціональної цінності ферментованої продукції (Anumudu et al., 2024). Зокрема, використання різних штамів *Lactobacillus* під час ферментації грушевого соку забезпечило підвищення антиоксидантної активності та модифікацію фенольного профілю (Han et al., 2021; Wang et al., 2021), полуничного соку – зростання антиоксидантної активності внаслідок збільшення вмісту фенольних сполук (Chen et al., 2023).

Одним із найбільш перспективних представників молочнокислих бактерій для ферментації рослинної сировини є *Lactobacillus plantarum* (Satora et al., 2025). Численні дослідження підтверджують ефективність застосування *L. plantarum* в різних харчових матрицях, від традиційних молочних до інноваційних рослинних (Liu et al., 2024). Автори дослідження (Wu et al., 2020) показали, що під час ферментації яблучного соку за участі *L. plantarum* утворюються леткі сполуки (включаючи спирти, кетони, альдегіди та кислоти), що сприяє зменшенню вмісту небажаних смакових компонентів і покращенню загального сенсорного профілю ферментованого яблучного соку. Процес ферментації чорничного соку з додаванням *L. plantarum* призводить до значного збільшення активності поглинання радикалів DPPH (Dumuta et al., 2025). Ферментація соку шовковиці із застосуванням *L. plantarum* M3 сприяла покращенню його біоактивного профілю (Zhong et al., 2026). Ефективність ферментації фруктової та овочевої сировини також підтверджено для штаму *Lactiplantibacillus plantarum* LMG 17673 (Yi et al., 2021).

Однак, ефективність ферментації визначається не лише вибором бактеріальної культури, але й закономірностями її росту та метаболічної активності. Саме кінетика розвитку мікроорганізмів визначає

швидкість споживання субстрату, накопичення органічних кислот, зміну pH середовища та біотрансформацію фенольних сполук, що безпосередньо впливає на формування функціональних властивостей ферментованого продукту.

В даній роботі використано штам *Lactobacillus plantarum* LP-115, виділений з рослинного матеріалу, який характеризується високою ферментативною активністю, здатністю ефективно адаптуватися до рослинних субстратів та накопичувати значну кількість органічних кислот (DuPont Nutrition & Biosciences, 2018). На відміну від традиційної молочної сировини, рослинний матрикс відзначається високою структурною складністю через наявність клітинних стінок, пектинів і зв'язаних форм фенольних сполук, що вимагає використання ферментативно активних штамів, таких як *L. plantarum*. На сьогодні, штам LP-115 залишається недостатньо вивченим у технологіях ферментації рослинної сировини. Відомі лише окремі дослідження його застосування у виготовленні ферментованої рослинної продукції. Так, ферментація виноградного соку з додаванням молока за допомогою *L. plantarum* LP-115 сприяла усуненню небажаних смакових відтінків та покращенню функціональних властивостей ферментованого напою. Зокрема, після 16 год ферментації спостерігали підвищення вмісту антиоксидантів (543,56 мг/л), незамінних амінокислот (49,66 мг/л) та ненасичених жирних кислот (2774,51 мг/л) (Mirsalami & Alihosseini, 2023).

Як рослинну матрицю для виробництва функціонального напою ми використали сік чорної смородини (*Ribes nigrum* L.) завдяки високому вмісту біологічно активних фітохімічних речовин, включаючи фенольні кислоти, антоціани, флавоноли, гідролізовані та конденсовані таніни та вітамін С, оскільки біотрансформація цих компонентів сприяє підвищенню антиоксидантної активності готового продукту (Laaksonen et al., 2014; Yang et al., 2019), а висока природна кислотність і значний вміст фенольних сполук можуть впливати на перебіг ферментаційного процесу. Незважаючи на значний обсяг досліджень, більшість робіт зосереджена на оцінюванні кінцевих показників якості ферментованих продук-

тів. Натомість закономірності перебігу ферментації, взаємозв'язок між ростом культури, споживанням цукрів, накопиченням органічних кислот і зміною антиоксидантної активності залишаються недостатньо дослідженими.

Матеріали та методи дослідження

Для дослідження використано чорну смородину сорту Софіївська української селекції. Сік чорної смородини отримували шляхом подрібнення свіжих ягід, пресування та подальшої фільтрації. Основні параметри отриманого соку: рН 3,35, титрована кислотність 24,0 °Т, вміст сухих розчинних речовин 15,8 %, вміст розчинних цукрів 40,0 г/л, вміст вітаміну С – 208,2 мг/100 мл. Після пастеризації за температури 72 °С протягом 15 с сік розділяли на дві частини: контрольну та дослідну, до якої вносили інокулят *L. plantarum* LP-115. Штам *Lactobacillus plantarum* LP-115 був отриманий з Української колекції мікроорганізмів (Інститут мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України). Ферментацію проводили у статичних мікроаерофільних умовах за температури 37 ± 1 °С протягом 36 год. Інокулят *L. plantarum* LP-115 з концентрацією клітин $\sim 9,12 \lg \text{ КУО/мл}$ ($\approx 1,3 \times 10^9 \text{ КУО/мл}$) вносили в кількості 0,1 % (v/v), що забезпечувало початкову концентрацію бактеріальної культури у ферментаційному середовищі на рівні $6,12 \pm 0,08 \lg \text{ КУО/мл}$.

Активну кислотність (рН) визначали потенціометричним методом за допомогою лабораторного рН-метра (рН-150МІ) відповідно до ДСТУ EN ISO 10523:2022; абсолютна похибка вимірювання рН становила $\pm 0,05$ одиниці рН.

Титровану кислотність визначали методом кислотно-лужного титрування відповідно до ДСТУ ISO 750:2019. Для аналізу відбирали 10 мл зразка соку та титрували стандартизованим 0,1 н NaOH з використанням фенолфталеїну як індикатора. Титровану кислотність виражали у градусах Тернера (°Т) та розраховували за формулою:

$$T = V \cdot 10, \quad (1)$$

де Т – титрована кислотність, °Т;

V – об'єм 0,1 н розчину NaOH, витрачений на титрування, мл.

Визначення чисельності життєздатних клітин *L. plantarum* LP-115 проводили методом серійних десяткових розведень із поверхневим висівом 0,1 мл відповідного розведення на поживне середовище MRS-агар. Посіви інкубували за температури (37 ± 1) °С протягом 48 год, після чого підраховували кількість колонієутворювальних одиниць (КУО). Чисельність життєздатних клітин у кожному зразку визначали у двох паралельних повтореннях і виражали у колонієутворювальних одиницях на 1 мл ферментаційного середовища (КУО/мл), а результати подавали у логарифмічній формі ($\lg \text{ КУО/мл}$).

Чисельність життєздатних клітин розраховували за формулою:

$$N = C / (V \cdot d), \quad (2)$$

де N – чисельність життєздатних клітин, КУО/мл;

C – середня кількість колоній на двох паралельних чашках;

V – об'єм інокуляту, внесеного на поживне середовище (0,1 мл);

d – відповідне десяткове розведення.

Сік перед визначенням ретельно перемішували та доводили до температури приблизно 20 °С ($\pm 0,5$ °С). Перед аналізом із проб видаляли етанол випаровуванням для мінімізації його впливу на показник заломлення. Вміст розчинних цукрів оцінювали рефрактометричним методом за допомогою рефрактометра Аббе за масовою часткою розчинних сухих речовин, визначеною відповідно до ДСТУ ISO 2173:2007. Перерахунок у г/л здійснювали за співвідношенням $1^\circ \text{Brix} \approx 10 \text{ г/л}$.

Оскільки рефрактометричний метод не дає змоги диференційовано визначати окремі моносахариди, орієнтовні концентрації глюкози та фруктози оцінювали за загальним вмістом розчинних цукрів із використанням середнього співвідношення основних моносахаридів у ягодах чорної смородини, наведеного в літературі (46 % глюкози та 54 % фруктози) (Tian et al., 2019).

Антиоксидантну активність визначали спектрофотометрично за методом DPPH відповідно до (Dumuta et al., 2025) із використанням спектрофотометра UV/Vis Precision P2 (Mapada Instruments Co., Ltd.).

Метод ґрунтується на здатності антиоксидантних компонентів ферментованої основи напою відновлювати стабільний радикал 2,2-дифеніл-1-пікрилгідразилу (DPPH). Оптичну густину дослідних і контрольного зразків вимірювали за довжини хвилі $\lambda = 517$ нм. Антиоксидантну активність виражали у відсотках інгібування радикала DPPH та розраховували за формулою:

$$\text{Антиоксидантна активність (\%)} = [1 - D_{\text{зр}}/D_{\text{кон}}] \cdot 100, \quad (3)$$

де $D_{\text{зр}}$, $D_{\text{кон}}$ – оптична густина дослідного і контрольного зразка, відповідно.

Статистичну обробку виконано за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA) з розрахунком середнього арифметичного значення (SE) та стандартного відхилення (SD). Багатовимірний аналіз взаємозв'язків реалізовано методом головних компонент (PCA). Графічне представлення результатів виконували у програмному середовищі R версії 4.4.3 (R Core Team, 2025).

Результати дослідження та обговорення

Для оцінки ефективності ферментації соку чорної смородини за участю *L. plantarum* LP-115 було досліджено зміну основних фізико-хімічних, мікробіологічних та біохімічних показників ферментаційного середовища в часі. Кінетику процесу оцінювали за зміною активної та титрованої кислотності, динамікою споживання вуглеводів, чисельністю життєздатних клітин *L. plantarum* LP-115 та антиоксидантною активністю ферментованої основи напою.

Одними із основних показників перебігу молочнокислої ферментації є зміна активної (pH) та титрованої кислотності ферментаційного середовища, що відображають інтенсивність метаболічної діяльності молочнокислих бактерій та накопичення органічних кислот у процесі бродіння. Результати дослідження зміни pH під час ферментації соку чорної смородини наведено на рис. 1.

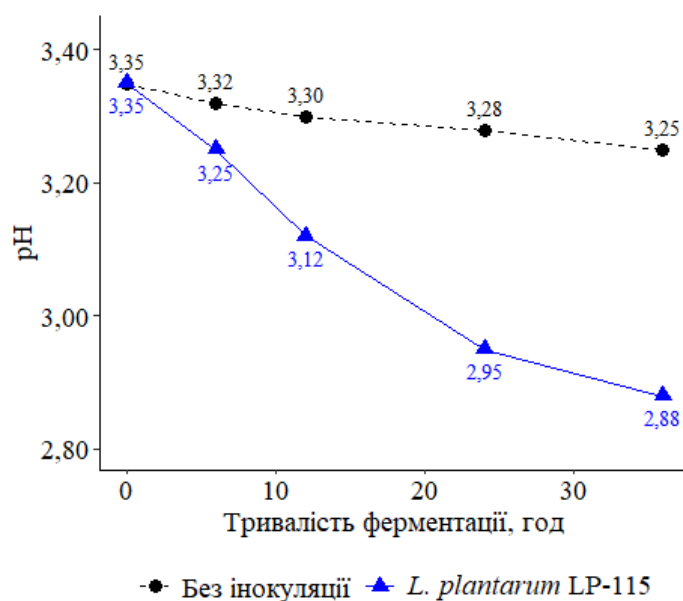


Рис. 1. Кінетика зміни активної кислотності (pH) ферментаційного середовища в процесі культивування *L. plantarum* LP-115 (дані pH наведено як середнє значення $\pm$ SE, $n = 3$)

У всіх дослідних варіантах на початку експерименту значення pH становило 3,35, що зумовлено природною кислотністю соку чорної смородини. У контрольному варіанті, без інокуляції *L. plantarum* LP-115, зміни активної кислотності протягом усього періоду спостережень були незначними: за 36 год

ферментації pH знизився лише до 3,25, що свідчить про відсутність інтенсивних процесів кислотоутворення.

У варіанті з інокуляцією *L. plantarum* LP-115 спостерігалось поступове зниження pH протягом усього періоду ферментації. Уже через 6 год значення pH зменшилося до 3,25, а через

12 год досягло 3,12. Найбільш інтенсивне кислотоутворення відбувалося в інтервалі від 12 до 24 год культивування, коли рН знизився до 2,95. Наприкінці ферментації (36 год) показник досяг мінімального значення 2,88.

Загальне зниження активної кислотності у дослідному варіанті становило 0,47 одиниці, тоді як у контролі лише 0,10 одиниці. Така різниця підтверджує визначальну роль *L. plantarum* LP-115 у процесах кислотоутворення та формуванні мікробіологічної стабільності ферментованого продукту.

Зниження активної кислотності супроводжувалося закономірним підвищенням титрованої кислотності ферментаційного середовища. На відміну від рН, який характеризує активну кислотність середовища, титрована кислотність відображає загальний вміст органічних кислот, насамперед молочної кислоти, а також незначних кількостей оцтової, янтарної та інших органічних кислот, що утворюються в процесі метаболічної діяльності молочнокислих бактерій. У даному дослідженні основним продуктом метаболізму *L. plantarum*

LP-115 є молочна кислота, яка робить найбільший внесок у формування титрованої кислотності ферментаційного середовища.

Як відомо, ефективна ферментація рослинної сировини молочнокислими бактеріями значною мірою залежить від здатності штаму адаптуватися до специфічного рослинного матриксу, інтенсивно споживати наявні вуглеводи та синтезувати органічні кислоти (Fessard & Remize, 2019).

На рис. 2 представлено динаміку титрованої кислотності під час ферментації соку чорної смородини за участю *L. plantarum* LP-115.

У процесі культивування *L. plantarum* LP-115 титрована кислотність поступово зростала від $24,0 \pm 1,0$ °Т на початку ферментації до $70,2 \pm 2,0$ °Т через 36 год. Найбільш інтенсивне підвищення показника спостерігалось в інтервалі 12–24 год, коли титрована кислотність збільшилася з 43,8 до 63,4 °Т, що свідчить про максимальну інтенсивність накопичення органічних кислот у цей період.

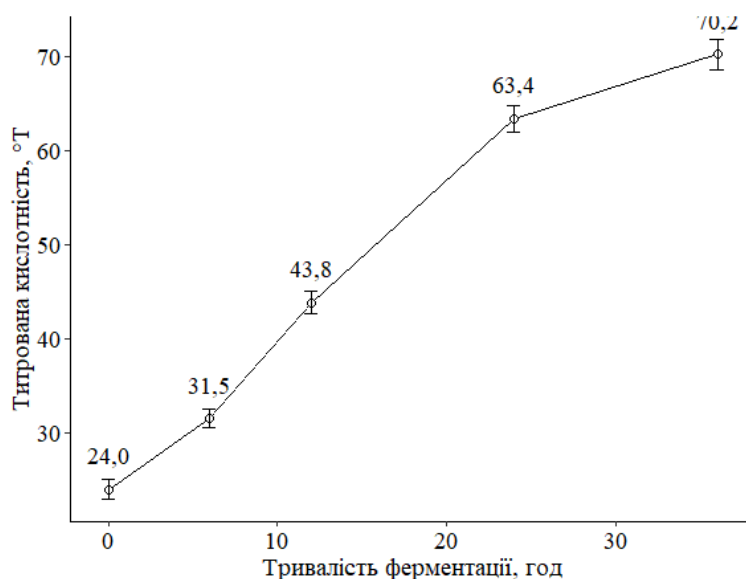


Рис. 2. Титрована кислотність під час ферментації

Таким чином, молочнокисла ферментація соку чорної смородини культурою *L. plantarum* LP-115 супроводжується закономірним зниженням активної кислотності та одночасним підвищенням титрованої кислотності ферментаційного середовища. Найбільш інтенсивні зміни обох показників відбувалися в інтервалі 12–24 год ферментації, що вказує на активне

накопичення органічних кислот у ферментаційному середовищі та ефективний перебіг молочнокислого бродіння.

Оскільки інтенсивність кислотоутворення безпосередньо залежить від росту бактеріальної культури, перебіг ферментаційного процесу оцінювали за динамікою чисельності життєздатних клітин *L. plantarum* LP-115 (рис. 3).

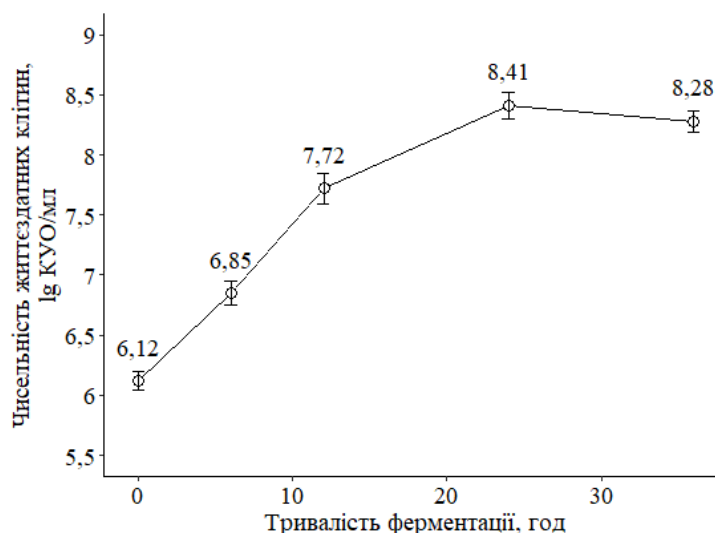


Рис. 3. Динаміка чисельності життєздатних клітин *L. plantarum* LP-115 під час ферментації

Як видно з отриманої графічної залежності, під час ферментації відбувається активний розвиток культури *L. plantarum* LP-115 у ферментаційному середовищі. Початкова чисельність життєздатних клітин становила $6,12 \pm 0,08$ lg КУО/мл і протягом перших 6 год культивування спостерігалось зростання цього показника до $6,85 \pm 0,10$ lg КУО/мл, що свідчить про успішну адаптацію мікроорганізмів до умов середовища та перехід культури до фази активного росту. Через 12 год ферментації чисельність клітин досягла $7,72 \pm 0,13$ lg КУО/мл, а через 24 год було зафіксовано максимальне значення показника – $8,41 \pm 0,11$ lg КУО/мл. Надалі чисельність життєздатних клітин практично не змінювалася і наприкінці ферментації, через 36 год, чисельність життєздатних клітин становила $8,28 \pm 0,09$ lg КУО/мл. Імовірною причиною такого зниження є поступове виснаження поживного середовища та накопиченням органічних кислот, що супроводжувалося зниженням рН до 2,88.

Отримані результати свідчать, що найінтенсивніший ріст *L. plantarum* LP-115 відбувався в інтервалі 12–24 год ферментації, що збігається з періодом найбільш інтенсивного кислотоутворення, встановленого за зміною активної та титрованої кислотності. Загалом за період культивування чисельність життєздатних клітин збільшилася на 2,16 lg КУО/мл, що підтверджує високу адаптаційну здатність штаму до середовища на основі соку чорної смородини та його ефективний розвиток у

процесі ферментації. Швидке накопичення біомаси *L. plantarum* на тлі зниження рН відіграє критичну роль у забезпеченні мікробіологічної безпеки напою, пригнічуючи розвиток патогенної мікрофлори (Anumudu et al., 2024).

Активний ріст бактеріальної культури супроводжувався споживанням природних вуглеводів ферментаційного середовища, які є основним джерелом енергії та вуглецю для молочнокислих бактерій. З огляду на те, що глюкоза та фруктоза є основними ферментованими моносахаридами соку чорної смородини, зміна їх концентрації характеризує інтенсивність використання вуглеводного субстрату *L. plantarum* LP-115 і дає змогу оцінити перебіг метаболічних процесів під час ферментації (рис. 4).

Як видно з графічної залежності, споживання глюкози протягом ферментації відбувалось більш інтенсивно порівняно з фруктозою. Протягом перших 12 год культивування розрахункова концентрація глюкози зменшилася на 22,8 %, тоді як концентрація фруктози – на 17,1 % (з 21,6 до 17,9 г/л), що свідчить про використання обох моносахаридів у процесі ферментації.

Найбільш інтенсивне споживання вуглеводів відбувалося в інтервалі 12–24 год ферментації. За цей період концентрація глюкози зменшилася на 25,4 %, а фруктози – на 17,3 %. Така динаміка узгоджується з фазою найактивнішого росту культури *L. plantarum* LP-115, протягом якої чисельність життєздатних клітин зросла з $7,72 \pm 0,13$ до $8,41 \pm 0,11$ lg КУО/мл (рис. 4).

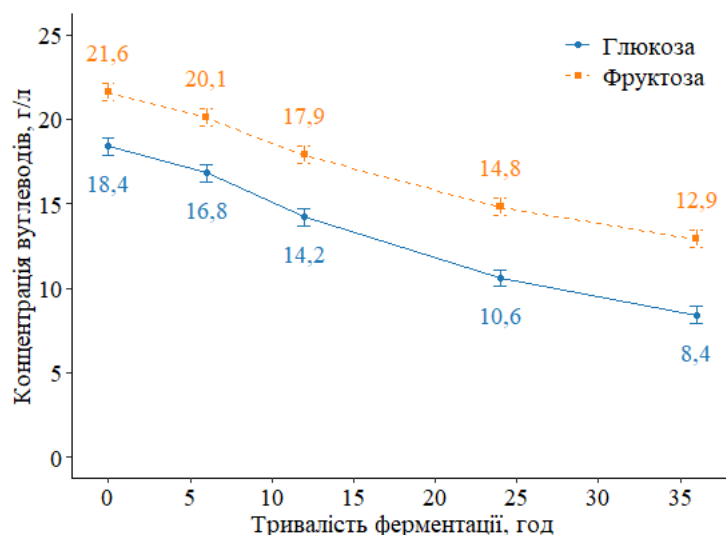


Рис. 4. Динаміка зміни концентрації глюкози та фруктози під час ферментації соку чорної смородини культурою *L. plantarum* LP-115

Наприкінці ферментації (36 год) концентрація глюкози становила 8,4 г/л, а фруктози – 12,9 г/л. Загалом за період культивування концентрація глюкози зменшилася на 54,3 %, тоді як фруктози – на 40,3 %, що свідчить про її більш інтенсивне використання бактеріальними клітинами як джерела енергії та вуглецю.

Отримані результати свідчать про високу метаболічну активність *L. plantarum* LP-115 у середовищі на основі соку чорної смородини. Інтенсивне споживання глюкози та фруктози супроводжувалося зниженням рН середовища та підвищенням титрованої кислотності, що відображає взаємозв'язок між використанням вуглеводного субстрату й перебігом

молочнокислого бродіння й узгоджується з даними інших дослідників, які відзначали високу виживаність і метаболічну активність лактобактерій у фруктових та овочевих соках (Buruleanu et al., 2009; Ayed et al., 2020).

Метаболічна активність *L. plantarum* LP-115, що супроводжується біотрансформацією фенольних сполук, антоціанів та інших біологічно активних компонентів чорної смородини, під час ферментації відображалася не лише зміною фізико-хімічних показників середовища, а й підвищенням антиоксидантної активності ферментованої основи напою, що характеризує її здатність нейтралізувати вільні радикали (рис. 5).

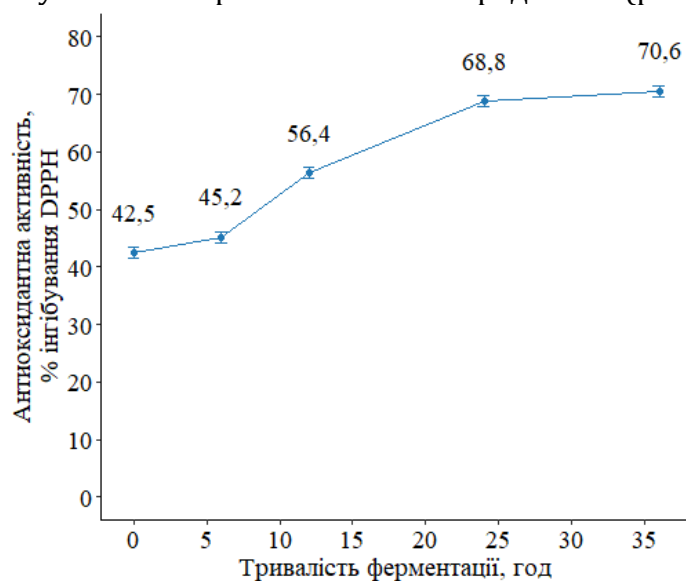


Рис. 5. Динаміка зміни антиоксидантної активності ферментованої основи напою під час ферментації

Як видно з рис. 5, антиоксидантна активність ферментаційного середовища поступово зростала протягом усього періоду культивування. На початку ферментації ступінь інгібування радикалу DPPH становила 42,5 %. Через 6 год цей показник збільшився до 45,2 %, а через 12 год – до 56,4 %, ймовірно через активізацію процесів біотрансформації компонентів рослинного матриксу та підвищення доступності біоактивних сполук.

Динаміка зміни антиоксидантної активності мала нелінійний характер. У перші 6 год ферментації приріст показника був незначним, після чого в інтервалі 6–24 год спостерігалось його найінтенсивніше зростання – від 45,2 до 68,8 %. На завершальному етапі культивування (24–36 год) швидкість підвищення антиоксидантної активності істотно зменшилася, і наприкінці ферментації показник досяг максимального значення – 70,6 %. Загалом порівняно з початком процесу антиоксидантна активність зросла на 66,1 %.

Найбільш значущим результатом нашого дослідження є істотне підвищення антиоксидантної активності ферментованої основи напою, ймовірно пов'язане з ферментативною біотрансформацією компонентів рослинного матриксу, зумовленою особливостями вихідного хімічного складу сировини. Згідно з сучасними дослідженнями, штами *L. plantarum* містять широкий спектр ферментів, зокрема бета-глюкозидази та декарбоксилази, які здатні руйнувати складні поліфенольні комплекси кислоти (Liu et al.,

2024). У процесі молочнокислої ферментації відбувається гідроліз зв'язаних фенольних глікозидів з утворенням вільних агліконів, які демонструють значно вищий антиоксидантний потенціал (Wu et al., 2020; Chen et al., 2023). Подібне зростання антиоксидантної активності за рахунок мікробної конверсії фенольних сполук раніше спостерігалось при ферментації яблучного та грушевого соків (Han et al., 2021; Wang et al., 2021), а також низки рослинних екстрактів (Ayar-Sümer et al., 2024).

Отже, найбільш інтенсивне підвищення антиоксидантної активності відбувалося в інтервалі 6–24 год ферментації, коли інтенсивне споживання глюкози (на 39,8 %) забезпечувало активний ріст культури *L. plantarum* LP-115 (від $6,85 \pm 0,10$ до $8,41 \pm 0,11$ lg КУО/мл), що супроводжувалося зниженням активної кислотності середовища від 3,25 до 2,95 та підвищенням титрованої кислотності від $43,8 \pm 1,5$ до $63,4 \pm 2,0$ °T (рис. 2).

Для комплексної оцінки динаміки процесу ферментації та виявлення закономірностей між досліджуваними показниками було застосовано метод аналізу головних компонент (РСА). Як видно з рис. 6, перші дві головні компоненти спільно описують 99,2 % загальної варіабельності даних, причому абсолютна більшість дисперсії (97,8 %) пояснюється першою головною компонентою (PC1). Це свідчить про високу надійність отриманої моделі.

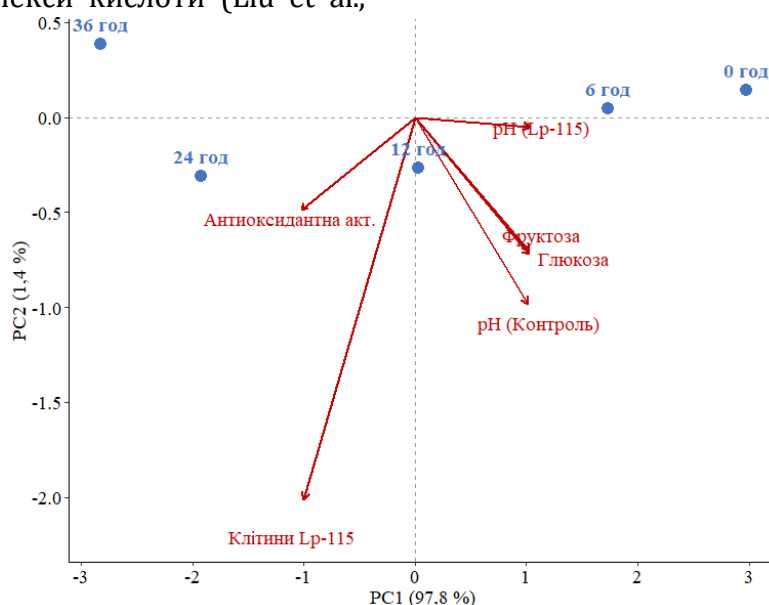


Рис. 6. РСА-біплат просторового розподілу та взаємозв'язку фізико-хімічних, мікробіологічних та біологічних показників у процесі ферментації за участі *L. plantarum* LP-115

На PCA-біплаті чітко прослідковується часовий вектор процесу: точки, що відповідають початковим етапам ферментації (0 та 6 год), локалізовані у правій півплощині (позитивні значення PC1). У міру протікання процесу відбувається закономірне зміщення показників у ліву півплощину, де згруповані кінцеві етапи (24 та 36 год).

Напрямок векторів наочно ілюструє характер кореляційних зв'язків між показниками. Вектори концентрації вуглеводів (глюкози та фруктози) і значень pH щільно згруповані та спрямовані в бік початкових годин процесу, що підтверджує їх високі вихідні значення та подальше синхронне зниження. Натомість вектори чисельності життєздатних клітин *L. plantarum* LP-115 та антиоксидантної активності спрямовані у протилежний бік (до 24 і 36 год). Таке просторове розмежування векторів на майже 180° статистично підтверджує наявність сильної зворотної залежності: інтенсивне споживання вуглеводів та кислотоутворення є прямими драйверами накопичення біомаси лактобактерій та зростання антиоксидантного потенціалу середовища.

Встановлений PCA-аналізом тісний обернений зв'язок між споживанням вуглеводів/кислотоутворенням і накопиченням біомаси й антиоксидантної активності узгоджується з висновком (Zhong et al., 2026), за яким саме мікробна конверсія вуглеводів є основним драйвером вивільнення біоактивних сполук.

Таким чином, отримані дані підтверджують високий технологічний потенціал штаму *L. plantarum* LP-115 та свідчать про перспективність його використання для ферментації плодово-ягідної сировини, що дозволяє не лише поліпшити фізико-хімічні показники, а й суттєво підвищити функціональну цінність кінцевого продукту. Це відповідає сучасним тенденціям щодо біотехнологічних підходів до виробництва функціональних ферментованих напоїв на рослинній основі (Terrou et al., 2019; Rodríguez et al., 2021; Žvirdauskienė et al., 2025).

Практична реалізація запропонованого підходу сприятиме розширенню асортименту функціональних ферментованих продуктів рослинного походження.

Висновки

Дослідження кінетики молочнокислої ферментації соку чорної смородини культурою *L. plantarum* LP-115 показало закономірне зниження активної кислотності (з 3,35 до 2,88) та зростання титрованої кислотності (з 24,0 до 70,2 °T), що супроводжувалося активним розвитком бактеріальної культури – чисельність життєздатних клітин зростає на 2,16 lg КУО/мл. Найбільш інтенсивні зміни всіх досліджених показників відбувалися в інтервалі 12–24 год ферментації, що відповідає фазі активного росту штаму. Протягом цього періоду спостерігалось інтенсивне споживання глюкози та фруктози (загальне зниження на 54,3 % та 40,3 % відповідно), яке супроводжувалося зростанням антиоксидантної активності ферментованої основи з 42,5 до 70,6 %. Зниження швидкості змін більшості досліджених показників після 24 год ферментації свідчить про завершення найбільш інтенсивної фази процесу та дає підстави розглядати 24 год як рекомендовану тривалість ферментації за встановлених умов: температури 37 ± 1 °C, статичних мікроаерофільних умов, дози інокуляту 0,1 % (v/v) та початкової концентрації *L. plantarum* LP-115 $6,12 \pm 0,08$ lg КУО/мл. Результати багатовимірного аналізу статистично підтвердили тісний взаємозв'язок між споживанням вуглеводів, кислотоутворенням, накопиченням біомаси *L. plantarum* LP-115 та підвищенням антиоксидантного потенціалу середовища.

Практичне значення отриманих результатів полягає в обґрунтуванні оптимальних параметрів процесу молочнокислої ферментації соку чорної смородини, що може бути використано для удосконалення технології виробництва ферментованих функціональних напоїв.

Фінансування / Funding

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Набір даних доступний за запитом до авторів/ Dataset available on request from the authors.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Не застосовується/ Not applicable.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується/ Not applicable.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Не застосовується/ Not applicable.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

Під час підготовки цього рукопису використовувалися технології генеративного штучного інтелекту Gemini (Google) для написання програмного коду в середовищі R. Після використання цього інструменту автори ретельно переглянули і відредагували вміст за потреби та несуть повну відповідальність за остаточну опубліковану версію / During the preparation of this manuscript, the generative artificial intelligence technology Gemini (Google) was used to write programming code in the R environment. After using this tool, the authors carefully reviewed and edited the content as needed and takes full responsibility for the final published version.

References

- Anumudu, C. K., Miri, T., & Onyeaka, H. (2024). Multifunctional applications of lactic acid bacteria: Enhancing safety, quality, and nutritional value in foods and fermented beverages. *Foods*, 13, 3714. <https://doi.org/10.3390/foods13233714>
- Ayar-Sümer, E. N., Verheust, Y., Özçelik, B., & Raes, K. (2024). Impact of lactic acid bacteria fermentation based on biotransformation of phenolic compounds and antioxidant capacity of mushrooms. *Foods*, 13(11), 1616. <https://doi.org/10.3390/foods13111616>
- Ayed, L., M'hir, S., & Hamdi, M. (2020). Microbiological, biochemical, and functional aspects of fermented vegetable and fruit beverages. *Journal of Chemistry*, 2020, 5790432. <https://doi.org/10.1155/2020/5790432>
- Buruleanu, L., Nicolescu, C. L., Avram, D., Bratu, M. G., & Manea, I. (2009). Survival of probiotic bacteria during lactic acid fermentation of vegetable juices. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*, 15(1), 132–139.
- Chen, W., Xie, C., He, Q., Sun, J., & Bai, W. (2023). Improvement in color expression and antioxidant activity of strawberry juice fermented with lactic acid bacteria: A phenolic-based research. *Food Chemistry: X*, 17, 100535. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100535>
- da Silva Vale, A., Venturim, B. C., da Silva Rocha, A. R. F., Martin, J. G. P., Maske, B. L., Balla, G., De Dea Lindner, J., Soccol, C. R., & de Melo Pereira, G. V. (2023). Exploring microbial diversity of non-dairy fermented beverages with a focus on functional probiotic microorganisms. *Fermentation*, 9(6), 496. <https://doi.org/10.3390/fermentation9060496>

Dumuta, A., Vosgan, Z., Giurgiulescu, L., Mihali, C., & Mihalescu, L. (2025). Kefir and *Lactobacillus plantarum* cultures in the production of fermented blueberry juices. *Sustainability*, 17, 10488. <https://doi.org/10.3390/su172310488>

DuPont Nutrition & Biosciences. (2018). *Lactobacillus plantarum* Lp-115®: Technical memorandum (TM 50-2E). https://probiom.com/wp-content/uploads/2020/05/TM-50_2e-Lactobacillus-Plantarum-LP_115_d.pdf

Fessard, A., & Remize, F. (2019). Genetic and technological characterization of lactic acid bacteria isolated from tropically grown fruits and vegetables. *International Journal of Food Microbiology*, 301, 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2019.05.003>

Garcia, C., Guerin, M., Souidi, K., & Remize, F. (2020). Lactic fermented fruit or vegetable juices: Past, present and future. *Beverages*, 6(1), 8. <https://doi.org/10.3390/beverages6010008>

Han, M., Zhang, M., Wang, X., Bai, X., Yue, T., & Gao, Z. (2021). Cloudy apple juice fermented by *Lactobacillus* prevents obesity via modulating gut microbiota and protecting intestinal tract health. *Nutrients*, 13(3), 971. <https://doi.org/10.3390/nu13030971>

Laaksonen, O. A., Mäkilä, L., Sandell, M. A., Salminen, J.-P., Liu, P., Kallio, H. P., & Yang, B. (2014). Chemical-sensory characteristics and consumer responses of blackcurrant juices produced by different industrial processes. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 2877–2888. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1316-8>

Li, R., Zhang, Y., Zhang, T., Liu, J., Liu, H., & Duan, C. (2022). The investigation on the characteristic metabolites of *Lactobacillus plantarum* RLL68 during fermentation of beverage from by-products of black tea manufacture. *Current Research in Food Science*, 5, 1320–1329. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.07.014>

Liu, S., He, Y., He, W., Song, X., Peng, Y., Hu, X., Bian, S., Li, Y., Nie, S., & Yin, J. (2024). Exploring the biogenic transformation mechanism of polyphenols by *Lactobacillus plantarum* NCU137 fermentation and its enhancement of antioxidant properties in wolfberry juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72, 12752–12761. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c01393>

Mirsalami, S. M., & Alihosseini, A. (2023). The effect of *Lactobacillus plantarum* LP-115 strain on improving the savor and aroma of milk containing grape sap through fermentation. *Food and Humanity*, 1, 404–414. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2023.06.013>

Rodríguez, L. G. R., Gasga, V. M. Z., Pescuma, M., Van Nieuwenhove, C., Mozzi, F., & Burgos, J. A. S. (2021). Fruits and fruit by-products as sources of bioactive compounds: Benefits and trends of lactic acid fermentation in the development of novel fruit-based functional beverages. *Food Research International*, 140, 109854. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109854>

Satora, P., Skotniczny, M., & Maziarek, M. (2025). Characteristics of novel fermented cloudy fruit juices produced using *Lactiplantibacillus plantarum* and lactic acid-producing *Lachancea* spp. yeasts. *Molecules*, 30, 3928. <https://doi.org/10.3390/molecules30193928>

Selvaraj, S., & Gurumurthy, K. (2023). An overview of probiotic health booster-kombucha tea. *Chinese Herbal Medicines*, 15(1), 27–32. <https://doi.org/10.1016/j.chmed.2022.06.010>

- Terpou, A., Papadaki, A., Lappa, I. K., Kachrimanidou, V., Bosnea, L. A., & Kopsahelis, N. (2019). Probiotics in food systems: Significance and emerging strategies towards improved viability and delivery of enhanced beneficial value. *Nutrients*, 11(7), 1591. <https://doi.org/10.3390/nu11071591>
- Tian, Y., Laaksonen, O., Haikonen, H., Vanag, A., Ejaz, H., Linderborg, K., Karhu, S., & Yang, B. (2019). Compositional diversity among blackcurrant (*Ribes nigrum*) cultivars originating from European countries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(19), 5621–5633. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00033>
- Wang, L., Zhang, H., & Lei, H. (2021). Phenolics profile, antioxidant activity and flavor volatiles of pear juice: Influence of lactic acid fermentation using three *Lactobacillus* strains in monoculture and binary mixture. *Foods*, 11(1), 11. <https://doi.org/10.3390/foods11010011>
- Wu, C., Li, T., Qi, J., Jiang, T., Xu, H., & Lei, H. (2020). Effects of lactic acid fermentation-based biotransformation on phenolic profiles, antioxidant capacity and flavor volatiles of apple juice. *LWT*, 122, 109064. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109064>
- Yang, W., Kortensniemi, M., Ma, X., Zheng, J., & Yang, B. (2019). Enzymatic acylation of blackcurrant (*Ribes nigrum*) anthocyanins and evaluation of lipophilic properties and antioxidant capacity of derivatives. *Food Chemistry*, 281, 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.111>
- Yi, C., Li, Y., Zhu, H., Liu, Y., & Quan, K. (2021). Effect of *Lactobacillus plantarum* fermentation on the volatile flavors of mung beans. *LWT*, 146, 111434. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111434>
- Zhong, X.-S., Fan, S.-L., Keremu, B., Zhao, J.-Y., Duan, Y.-N., Yang, L., & Shi, L. (2026). *Lactobacillus plantarum* M3 fermentation enhances mulberry juice antioxidant capacity: Metabolomic analysis. *Foods*, 15(5), 906. <https://doi.org/10.3390/foods15050906>
- Žvirdauskienė, R., Jonik, V., Bašinskienė, L., & Čižeikienė, D. (2025). Fruit and vegetable juices as functional carriers for probiotic delivery: Microbiological, nutritional, and sensory perspectives. *Microorganisms*, 13, 1272. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13061272>

Received: 23.07.2026. Accepted: 19.08.2026. Published: 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Короткова І., Чайка Т., Кожушко К., Тристан Д., Бараболя О. Дослідження процесу ферментації соку чорної смородини культурою *Lactobacillus plantarum* LP-115. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. С. 279-292. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.20>

Cite this article in APA style as:

Korotkova, I., Chaika, T., Kozhushko, K., Trystan, D., & Barabolia, O. (2026). Doslidzhennia protsesu fermentatsii soku chornoi smorodyny kulturoiu *Lactobacillus plantarum* LP-115 [Study of black currant juice fermentation process by *Lactobacillus plantarum* LP-115]. *Biota. Human. Technology*, (2), 279-292. <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.20> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Korotkova I. [*in Ukrainian: Короткова І.*] ¹, PhD in Chem. Sc., Assoc. Prof., email: 2irinakorotkova10@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0577-9634

Department of Agriculture and Agrochemistry named after V.I. Sazanov, Poltava State Agrarian University
1/3 Skovorody Street, Poltava, 36003, Ukraine

Chaika T. [*in Ukrainian: Чайка Т.*] ², PhD in Econ. Sc., email: chayka_ta@ukr.net
ORCID: 0000-0002-5980-7517

Department for Ecological and Economic Development of Rural Areas, Academy of Sciences of Technological
Cybernetics of Ukraine, Poltava Department
3 Ivan Bank Street, Poltava, 36003, Ukraine

Kozhushko K. [*in Ukrainian: Кожушко К.*] ³, PhD Student, email: kateryna.blahodar@pdau.edu.ua
ORCID: 0009-0002-5697-283X

Department of Agriculture and Agrochemistry named after V.I. Sazanov, Poltava State Agrarian University
1/3 Skovorody Street, Poltava, 36003, Ukraine

Trystan D. [*in Ukrainian: Тристан Д.*] ⁴, PhD Student, email: daria.trystan@pdau.edu.ua
ORCID: 0009-0008-8854-0218

Department of Agriculture and Agrochemistry named after V.I. Sazanov, Poltava State Agrarian University
1/3 Skovorody Street, Poltava, 36003, Ukraine

Barabolia O. [*in Ukrainian: Бараболя О.*] ⁵, PhD in Agric. Sc., Assoc. Prof., email: olga.barabolia@pdau.edu.ua
ORCID: 0000-0003-4123-9547

Department of Plant Science, Poltava State Agrarian University
1/3 Skovorody Street, Poltava, 36003, Ukraine

¹ Study design, manuscript preparation.

² Study design, manuscript preparation, statistical analysis.

³ Data collection, study design.

⁴ Data collection, manuscript preparation.

⁵ Data collection, manuscript preparation.