

1. БІОЛОГІЯ

УДК 577.175:633.16:66.061.6

DOI <https://doi.org/10.32782/naturalspu/2025.2.1>

ФЕРМЕНТАЦІЯ ЗЕРНОБОБОВИХ ХАРЧОВИХ КРУП МАКРОМІЦЕТАМИ: СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ТА АКТУАЛЬНІ ТЕНДЕНЦІЇ

Бахлуков Дмитро Олександрович,

аспірант

відділ рослинних харчових продуктів та біофортificaція

Державна установа «Інститут Харчової біотехнології та Геноміки НАН України»

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9394-7436>

Литвиненко Юлія Іванівна,

кандидат біологічних наук, доцент

завідувач кафедри біології та методики навчання біології

Сумського державного педагогічного університету імені А. С. Макаренка

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9095-0437>

Scopus Author ID: 57204771998

Web of Science Researcher ID: HKV-8087-2023

Круподьорова Тетяна Анатоліївна,

доктор біологічних наук, старший науковий співробітник

відділ рослинних харчових продуктів та біофортificaція

Державна установа «Інститут Харчової біотехнології та Геноміки НАН України»

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4665-9893>

Scopus Author ID: 55545626900

Web of Science Researcher ID: HPH-1186-2023

У статті узагальнено новітні дані щодо актуальності та сучасного стану досліджень ферментації харчових круп макроміцетами. У цьому наративному огляді систематизовано результати ферментації бобових (соеві боби, сочевиця, квасоля), зернових (рис, пшениця, ячмінь, овес, сорго, кукурудза) та псевдозернових (кіноа), здійсненої їстівними й лікарськими видами макроміцетів: *Ganoderma lucidum*, *Grifola* spp., *Hericium* spp., *Lentinula edodes*, *Irpex lacteus*, *Pleurotus ostreatus*. Підкреслено роль макроміцетів як біотехнологічного інструмента, що дозволяє модифікувати харчові крупи, підвищувати їх біодоступність та збагачувати їх корисними біоактивними сполуками. Особлива увага приділена аналізу змін у хімічному складі ферментованих продуктів, включно зі збільшенням вмісту амінокислот, біологічно активних пептидів, ферментів та антиоксидантних сполук. Обговорено потенційні переваги ферментації макроміцетами для покращення поживної цінності та смакових якостей круп, а також пов'язані з цим потенційні ризики. Окремо розглянуто технології ферментації з використанням макроміцетів та наведено стислий аналіз твердофазної та глибинної ферментації, їхніх переваг, обмежень, умов проведення й перспективних інновацій для підвищення ефективності та промислової масштабованості процесів.

Наведені результати свідчать про перспективність застосування макроміцетів для створення функціональних харчових продуктів і нутрицевтиків, які відповідають принципам інноваційності, сталого розвитку та сучасних трендів здорового харчування. Стаття узагальнює новітні дані щодо біотехнологічного потенціалу макроміцетів і може слугувати як теоретичною та методологічною основою для подальших експериментальних досліджень та підтримки для розроблення нових напрямів їхнього практичного застосування у харчових технологіях.

Ключові слова: ферментація, зернові крупи, бобові культури, макроміцети, біосинтетична активність.

Bakhlukov Dmytro, Lytyynenko Yulia, Krupodorova Tetiana. Fermentation of Cereals and Legumes by Macromycetes: State of the Art and Current Research Trends

The article summarizes the latest data on the relevance and current state of research on cereal fermentation by macromycetes. This narrative review systematizes the results of fermentation of legumes (soybeans, lentils, beans), cereals (rice, wheat, barley, oats, sorghum, maize), and pseudocereals (quinoa) carried out by edible and medicinal species of macromycetes: *Ganoderma lucidum*, *Grifola* spp., *Hericium* spp., *Lentinula edodes*, *Irpex lacteus*, *Pleurotus ostreatus*. The role of macromycetes as a biotechnological tool that enables the modification of cereals, enhances their bioavailability, and enriches them with beneficial bioactive compounds is emphasized. Particular attention is paid to the analysis of changes in the chemical composition of fermented products, including the increase in amino acids, bioactive peptides, enzymes, and antioxidant compounds. The potential advantages of cereal fermentation by macromycetes for improving nutritional value and sensory properties, as well as the associated potential risks, are discussed.

Fermentation technologies using macromycetes are considered separately, with a concise analysis of solid-state and submerged fermentation, their benefits, limitations, process conditions, and promising innovations for improving efficiency and industrial scalability.

The presented results highlight the prospects of applying macromycetes for the development of functional foods and nutraceuticals that align with the principles of innovation, sustainability, and modern healthy nutrition trends. The article generalizes the latest data on the biotechnological potential of macromycetes and may serve both as a theoretical and methodological foundation for further experimental research and as a basis for developing new directions of their practical application in food technologies.

Key words: fermentation, cereals, legumes, macromycetes, biosynthetic activity.

Вступ. Збереження здоров'я та підвищення захисних сил організму є одними з ключових проблем людства, що залишаються актуальними завжди. Протягом останніх трьох десятиліть спосіб життя та харчові звички людей кардинально змінилися. Ці зміни були зумовлені процесами урбанізації та трансформацією споживчих настроїв, що призвело до масового зростання вживання синтетичних харчових продуктів і, як наслідок, зростання поширеності захворювань, пов'язаних зі способом життя. Економічні, соціальні та екологічні проблеми в Україні негативно впливають на якість та структуру харчування. Особливо гостро ця проблема проявляється сьогодні, враховуючи повномасштабну війну з постійними сигналами повітряної тривоги, бомбардуваннями та ракетними обстрілами. Поряд із цим, стрімке зростання числа людей, що дотримуються веганського способу життя [1], та підвищення обізнаності населення щодо здорового харчування [2] орієнтують увагу споживачів на функціональні продукти харчування та напої.

Сучасні тенденції розвитку харчової промисловості та наукові дослідження демонструють значний інтерес до створення продуктів, які входять у щоденний раціон людини та впливають на біохімічні реакції й фізіологічні функції організму [3]. У 2024 році обсяг світового ринку ферментованих продуктів становив 247,11 млрд дол. США. За прогнозами, він зросте з 258,97 млрд дол. США у 2025 році до приблизно 394,91 млрд дол. США у 2034 році, що відповідає середньорічному темпу зростання (CAGR) 4,80% у період 2025–2034 років [4]. У зв'язку з цим останніми роками спостерігається тенденція зростання досліджень, спрямованих на створення нових продуктів із високою харчовою та біологічною цінністю, здатних підвищувати функціональні ресурси організму, його працездатність, якість життя та стійкість до факторів зовнішнього середовища. Характеристики таких продуктів можуть відрізнятися, а назви, що їх застосовують у різних країнах (функціональні продукти харчування, продукти спеціального або дієтичного призначення тощо), не впливають на їх значення та роль.

Однією з перспективних стратегій створення таких продуктів є ферментація за участю мікроорганізмів, зокрема бактеріями, дріжджами та мікроміцетами, що детально узагальнено в численних оглядах [5; 6; 7; 8; 9]. Макроміцети, завдяки високому ферментативному потенціалу та здатності синтезувати цінні метаболіти, розглядаються як перспективний об'єкт для створення інноваційних харчових продуктів із підвищеною поживною та функціональною цінністю і нутрицевтиків [10]. Водночас наразі бракує систематизованих даних щодо процесів ферментації з їх використанням, що обумовлює актуальність проведеного дослідження та необхідність узагальнення сучасних знань у цій галузі.

Таким чином, **метою** дослідження є проведення комплексного аналізу сучасного стану наукових досліджень і технологічних рішень, пов'язаних із ферментацією зернобобових харчових круп за участю макроміцетів, а також оцінка перспектив впровадження цих підходів у харчову промисловість з урахуванням безпечності, ефективності та інноваційного потенціалу.

Методологія та підхід до збору і аналізу інформаційних джерел. Представлений огляд є наративним і базується на якісному аналізі джерел з оцінкою їх відповідності тематиці дослідження. Інформаційний пошук здійснювався у провідних міжнародних наукометричних базах (Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect, SpringerLink, MDPI) та патентних ресурсах (Espacenet, WIPO Patentscope) протягом різних років, із фокусом на останні 15 років для отримання актуальної інформації.

До аналізу залучалися рецензовані статті, патенти та наукові огляди, які безпосередньо стосуються застосування макроміцетів у технологіях ферментації харчових продуктів або створення функціональних інгредієнтів. Використовувалися релевантні ключові слова, зокрема: макроміцети, твердофазна ферментація, занурена ферментація, харчові продукти, функціональні інгредієнти, ферментативний потенціал, біоактивні сполуки, безпечність харчових продуктів, omics-технології, генетична інженерія, автоматизація біопроцесів.

Огляд сфокусований на узагальненні сучасних даних щодо процесів ферментації харчових круп. Харчові крупі класифіковано відповідно до їхнього призначення як крупі або сировину для їх виробництва, із поділом за ботанічними групами: бобові (соеві боби, сочевиця, квасоля), зернові (рис, пшениця, ячмінь, овес, сорго, кукурудза) та псевдозернові (кіноа). Така класифікація забезпечує систематизацію даних щодо їх ферментації макроміцетами.

Пошук і відбір джерел обмежено тематикою ферментації харчових круп макроміцетами та не охоплює дослідження, присвячені ферментації інших органічних субстратів.

Результати та обговорення. У цьому розділі подано огляд сучасних досліджень щодо ферментації харчових круп макроміцетами та їхнього впливу на функціональні властивості продуктів. Представлені результати охоплюють біологічні особливості макроміцетів, технологічні підходи до ферментації, ферментативний потенціал конкретних видів, а також ключові проблеми та перспективи розвитку цієї галузі.

Біологічні особливості макроміцетів у контексті ферментації. Макроміцети – це вищі гриби, що утворюють помітні великі (≥ 1 см) плодові тіла (спорокарпи або карпофори), видимі неозброєним оком. Ці структури складаються з розгалужених септованих

гіф. Таксономічно макроміцети переважно належать до підцарства Dikarya, зокрема до відділів Ascomycota та Basidiomycota, разом налічують понад 30 000 видів [11]. Деякі представники належать до групи, раніше відомої як Zygomycota. Значна частина макроміцетів є потенційним джерелом різноманітних первинних та вторинних біологічно активних метаболітів, включно з полісахаридами, білками, амінокислотами, жирними кислотами, лектинами, терпеноїдами, фенольними сполуками, нуклеїновими кислотами, нуклеозидами, пептидами, стероїдами тощо [12]. Ці сполуки можна виділяти як із міцелію, так і з плодових тіл грибів або із культурального середовища.

В огляді Сяоці Сун (X. Sun) та співавт. [13] узагальнено дані щодо понад 270 природних сполук, синтезованих представниками 17 родин макроміцетів у період 2017–2023 рр., із наведенням їхніх структур, біологічної активності та відповідних молекулярних механізмів дії. Різнорманітні біологічно активні речовини макроміцетів обумовлюють значний терапевтичний потенціал з широким спектром дії (загалом 130 різних біологічних активностей), серед яких особливе значення мають імунomodulatory, протипухлинна, антивірусна, антибактеріальна, антиоксидантна, гепатопротекторна, гіпохолестеринемічна та гіпоглікемічна дії. Це відкриває широкі перспективи для практичного застосування макроміцетів у сучасній біотехнології, харчовій промисловості, медицині, фармакології та фунготерапії.

Зростаючі інвестиції в харчову промисловість і виробництво продуктів на основі грибів стимулюють попит і сприяють розширенню ринку. Паралельно з цим, із підвищенням обізнаності споживачів про здоровий спосіб життя, дієти, багаті на білки, набули значної популярності.

Макроміцети характеризуються високим ферментативним потенціалом, що зумовлює їхню здатність ефективно розщеплювати широкий спектр полімерних субстратів харчового походження. Вони синтезують численні гідролітичні ферменти [14], зокрема амілази, протеази, целулази, ліпази та інші біокаталізатори, які забезпечують перетворення вуглеводів, білків, целюлозних та ліпідних компонентів на більш доступні й функціонально активні форми. Завдяки цьому ферментація за участю макроміцетів покращує поживну та сенсорну цінність харчових продуктів.

До спектру метаболітів вторинного ряду, що мають значну харчову та фармакологічну цінність, належать полісахариди, терпенові та фенольні сполуки, стероїдні деривати, алкалоїди та інші біологічно активні молекули, які проявляють антиоксидантні, імунomodulatory, протизапальні й антимікробні властивості [15]. У процесі ферментації ці метаболіти можуть накопичуватися у «харчовій матриці» або модифікувати її хімічний склад, підвищуючи функціональні властивості готового продукту. Таким чином, макроміцети розглядаються не лише як біокаталізатори перетворення поживних речовин, а й як джерело сполук, здатних надавати ферментованим харчовим продуктам додаткові профілактичні та терапевтичні ефекти.

Технології ферментації з використанням макроміцетів. У сучасних технологіях ферментації з використанням макроміцетів застосовують два основні підходи: твердофазна та глибинна ферментація, які характеризуються специфічними умовами проведення, технологічними особливостями та власними перевагами й обмеженнями [15].

Твердофазна ферментація (Solid State Fermentation, SSF) базується на вирощуванні грибів на твердих субстратах із низьким вмістом вологи, що імітують природні умови їхнього розвитку. Як сировина переважно використовують зернові та агропромислові відходи – злакові висівки, лушпиння бобових культур, тирсу, стебла кукурудзи та інші лігноцелюлозні матеріали, що забезпечує економічну доцільність і екологічну привабливість процесу. Перевагами цього методу є простота технологічної схеми, висока концентрація цільових продуктів і мінімальні вимоги до стерильності. Водночас до обмежень належать складність контролю вологості та температури, нерівномірність розвитку міцелію, а також обмежені можливості масштабування процесу.

Глибинна ферментація (Submerged Fermentation, SmF) передбачає культивування макроміцетів у рідких поживних середовищах із постійною аерацією та перемішуванням, що забезпечує рівномірний розподіл поживних речовин та контроль ключових параметрів процесу – температури, pH, концентрації розчиненого кисню, або проводиться за статичних умов. Такий підхід дозволяє досягати високої продуктивності та інтенсивного накопичення ферментів і біоактивних метаболітів, а також спрощує виділення цільових продуктів із культуральної рідини. Водночас SmF потребує складнішого обладнання, суворої стерильності та вищих енергетичних витрат порівняно з твердофазною ферментацією.

Порівняльний аналіз SSF і SmF показує, що вибір методу залежить від типу макроміцета, характеру цільового продукту та економічних умов виробництва.

Сучасні інновації у сфері ферментаційних технологій, зокрема застосування біореакторів зі спеціалізованими мішалками, датчиками та системами автоматичного регулювання, а також інтеграція цифрових технологій моніторингу, дозволяють підвищувати стабільність процесу, ефективно керувати біосинтетичною активністю грибів та адаптувати умови культивування до промислових масштабів [11; 16; 17]. Це відкриває перспективи створення стандартизованих, високопродуктивних та економічно ефективних технологій отримання харчових інгредієнтів і функціональних продуктів із використанням макроміцетів.

Види макроміцетів і їх біотехнологічний потенціал для ферментації зернобобових харчових круп. Ферментація із залученням макроміцетів є контрольованим ферментативним процесом трансформації органічної сировини, під час якого складні та важко перетравлювані сполуки перетворюються на харчові компоненти з підвищеною біодоступністю, одночасно зменшуючи вміст антинутриєнтів. З цієї причини ферментовані пробіотичні соєві продукти, такі як місо,

темпе, тамарі або натто, містять низький рівень антинутриєнтів. Білкові ферментовані соєві продукти, зокрема темпе, місо та натто, які традиційно були основою кухні феодальної Японії, сьогодні набувають широкої популярності в інших країнах.

До перспективних видів макроміцетів, залучених до ферментації бобових культур, належить *Irpex lacteus* (Fr.) Fr. Цей вид показує значний потенціал у перетворенні паростків соєвих бобів: встановлено підвищення антиоксидантної активності у 2–8 разів, зростання вмісту фенольних сполук у 4–5 разів та флавоноїдів у 8–9 разів [18]. Крім того, зафіксовано збільшення концентрації вільних амінокислот та β -глюканів у ферментованих паростках [19].

Серед їстівних базидіоміцетів варто відзначити *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm., ефективність якого продемонстрована у твердофазній ферментації сочевиці. За даними Андреа Асенсіо-Грау (A. Asensio-Grau) та співавт. [20], проведена ферментація підвищує вміст білка (на 23%), резистентного крохмалю (на 9,8%) і поліфенолів (із 2,1 до 3,2 мг еквіваленту галлової кислоти/г). Після моделювання *in vitro* було також зафіксовано зростання частки перетравленого білка на 17%, зниження гідролізу крохмалю (24% проти 34%) та збільшення поліфенолів (із 3,1 до 7,73 мг/г).

Використання *Pleurotus ostreatus* також у процесах твердофазної ферментації показало високу ефективність у покращенні харчового профілю сочевиці та білої кіноа. Зокрема, спостерігалось підвищення загального вмісту білка на 20–25 % у більшості зразків (за винятком сочевичного борошна), при цьому частка розчинного білка залишалася відносно стабільною [21]. Одночасно відзначалось поступове зниження вмісту фітинової кислоти, причому цей ефект був більш вираженим у борошні порівняно з насінням. Автоклавування субстратів сприяло вивільненню поліфенолів і підвищенню антиоксидантної активності (ABTS, DPPH, FRAP), однак у ході ферментації ці показники знижувалися. Такі результати формують наукове підґрунтя для створення інгредієнтів на основі сочевиці та кіноа зі зниженим вмістом антинутриєнтів і додатковим збагаченням білковою грибною біомасою.

Ферментація квасолі звичайної, квасолі чорної та вівса міцелієм *Pleurotus ostreatus* продемонструвала суттєве підвищення їхньої харчової та біологічної цінності. Зокрема, антиоксидантна активність зросла на 39,5% у квасолі звичайній та на 225% у вівсі, а загальний вміст поліфенолів у бобах квасолі збільшився утричі. Також зафіксовано значний приріст засвоюваності білків (з 39,99 до 48,13% у чорній квасолі, з 44,06 до 69,01% у квасолі звичайній та з 63,25 до 70,01% у вівсі) і зниження вмісту дубильних речовин (з 65,21 до 22,07 мг у чорній квасолі, з 35,54 до 23,37 мг у квасолі звичайній та з 55,67 до 28,11 мг у вівсі) [22].

Поряд із зазначеними видами, перспективними у ферментації бобових культур виявилися й інші базидієві гриби. Зокрема, соєві боби, ферментовані міцелієм *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst., містили ізофлавоновий аглікон з антиангіогенною активністю [23].

В іншому дослідженні було отримано ферментовані соєві боби за участю *G. lucidum*, *Hericium erinaceus* (Bull.) Pers. та *H. ramosum* (Bull.) Letell., які характеризувалися збагаченим вмістом поліфенолів і вираженою антиоксидантною дією [24]. Також встановлено, що міцелій *G. lucidum* забезпечує швидший перебіг ферментації порівняно з *H. erinaceus* та *H. ramosum*. Загальний вміст фенольних сполук у неферментованих соєвих бобах та у бобах, ферментованих відповідно міцелієм *G. lucidum*, *H. erinaceus* і *H. ramosum*, становив $1,547 \pm 0,068$; $2,304 \pm 0,035$; $2,074 \pm 0,066$ та $2,160 \pm 0,014$ мг/г сухого порошку. Показники радикал-поглинальної активності (DPPH) для тих самих зразків дорівнювали відповідно $1,847 \pm 0,073$; $4,246 \pm 0,010$; $2,246 \pm 0,061$ і $2,367 \pm 0,173$ мкмоль тролокса/г сухого порошку. Крім того, серед 28 досліджених видів базидієвих грибів, найвищий рівень гідролізу пшеничної клітковини (63%) – як складного субстрату для Коджі (Koji, традиційного продукту азійської кухні) – було зафіксовано у *Flammulina velutipes* (Curtis) P. Karst. за умов статичного росту у поверхневій культурі [25].

Ряд досліджень присвячено ферментації рису, зокрема різновиду Riceberry (*Oryza sativa* L.), для підвищення його харчової та функціональної цінності [26; 27]. Пророщування та подальша ферментація цього різновиду рису міцелієм *Pleurotus ostreatus* сприяють зростанню вмісту γ -аміномасляної кислоти (GABA) та β -глюкану, а також покращують пребіотичні властивості порівняно з непорощеним зерном. Такі продукти розглядаються як перспективні харчові інгредієнти для підтримки здоров'я травної системи, зокрема у людей літнього віку.

Додатково встановлено, що пророщування та ферментація рису міцелієм *P. ostreatus* підвищують вміст GABA, антоціанів та інших біоактивних сполук; при цьому максимальна концентрація GABA ($38,58 \pm 0,29$ мг/100 г) була зафіксована у пророщеному рисі, ферментованому цим видом грибів [27].

Ферментація рисового борошна з використанням міцелію *Trametes versicolor* (L.) Lloyd стимулювала утворення біоактивних сполук із вираженою імуномодулюючою активністю: активацією імунних клітин та підвищенням секреції про- й протизапальних цитокинів [28]. Водні та тверді фракції міцелію індукували сильну експресію активаційного маркера CD69 на лімфоцитах і моноцитах, тоді як ферментований субстрат мав помірний ефект, а вихідний субстрат залишався неактивним. Обидві фракції ферментованого субстрату сприяли дозозалежному зростанню продукції про- та протизапальних (IL-2, IL-6, IL-1 α , IL-10), противірусних (IFN- γ , MIP-1 α) цитокинів, а також G-CSF та IL-8, тоді як міцелій викликав менш виражену відповідь.

Міцелій *Hericium erinaceus*, вирощений на суміші червоного та білого жасминового рису методом твердофазної ферментації, проявив антибактеріальні властивості завдяки наявності в ліпофільній фракції похідних жирних кислот (зокрема нонанової кислоти та етилового ефіру лінолевої кислоти), активних проти *Proteus mirabilis* (MIC = 250 мкг/мл) [29]. Водночас антипролі-

феративна активність щодо клітин шийки матки (HeLa) була низькою ($IC_{50} > 100$ мкг/мл). Отримані результати вказують на перспективність використання ферментованого рису з *H. einaeus* як джерела природних антибактеріальних інгредієнтів.

Твердофазна ферментація пшениці міцелієм *Grifola frondosa* (Dicks.) Gray, *G. gargal* (Singer) та *G. sordulenta* (Mont.) Singer дозволяє отримати борошно з істотно підвищеною антиоксидантною активністю [30]. Біотрансформація супроводжується зростанням вмісту фенольних сполук та значним посиленням радикал-знешкоджувальної здатності й відновної активності порівняно зі звичайним пшеничним борошном. Зокрема, у борошні, отриманому з використанням *G. frondosa*, вміст антиоксидантів досягав 193,67 мг/г у перерахунку на еквівалент аскорбінової кислоти. Отримані дані свідчать про доцільність застосування цього підходу для виробництва харчових продуктів із покращеними функціональними властивостями.

Подібно до зазначених видів, міцелій *Schizophyllum commune* Fr., вирощений на восьми видах харчових злаків (сорго, кукурудза, ячмінь, пшениця, вівес, жасминовий рис, рис Mun Ro та Riceberry), також демонструє значний потенціал для підвищення функціональної цінності продуктів [31]. Найвищий вміст фенольних сполук ($8,56 \pm 1,09$ мг ЕГК/г сухої речовини) був отриманий на пшениці, а максимальна продукція флавоноїдів ($577,35 \pm 29,93$ мкг ЕГК/г сухої речовини) – на ячмені, де також зафіксовано найвищу антиоксидантну активність методом FRAP ($IC_{50} = 2,14 \pm 0,23$ мг сухої речовини/мл). Більшість зернових після 8-денного культивування демонструвала значну активність DPPH ($IC_{50} = 3,83\text{--}5,80$ мг сухої речовини/мл), тоді як найвищу ABTS-активність спостерігали у пшениці та вівсі ($IC_{50} = 2,38\text{--}3,27$ мг сухої речовини/мл). Антиоксидантні властивості корелювали з накопиченням фенольних та флавоноїдних сполук, що підкреслює потенціал міцелію *S. commune* для застосування у виробництві зернових продуктів із підвищеною біологічною цінністю та функціональними властивостями.

Зважаючи на наведені результати, слід зазначити, що даний напрям розвивався епізодично. Проте за останні роки створення ферментованих харчових продуктів міцелієм грибів стало сучасною та надзвичайно актуальною темою для стартапів, зокрема: Mycorena (www.mycorena.com; Гетеборг, Швеція, 2017), Millow (www.millow.co; Гетеборг, Швеція, 2020), Bosque Foods (раніше Kinoko Labs, www.bosquefoods.com; Нью-Йорк, США, 2020), Sincarne (www.sincarne.com; Саннівейл, США, 2021) та MycoplantEnergy (www.project4990265.tilda.ws, Жашків, Україна, 2022).

У таблиці 1 узагальнено основні переваги та можливі ризики застосування макроміцетів у ферментації харчових круп на основі сучасних наукових даних [32; 33; 34; 35; 36].

Перспективи розвитку та ключові проблеми ферментації зернових і бобових макроміцетами. У динамічно розвиненій галузі нутріціології функціональні харчові продукти сформували вагомий сегмент ринку [37] та наукових досліджень. Використання макроміцетів у ферментації зернових і бобових культур відкриває потенційний напрям розвитку харчової біотехнології, адже ферментовані продукти не лише збагачують раціон, а й стають певною ланкою на шляху профілактики захворювань та підтримання здоров'я. На відміну від традиційних методів обробки, ферментація за участю макроміцетів призводить не просто до покращення смаку чи тривалості зберігання, а до біохімічної трансформації харчових круп. Під дією ферментів грибного походження складні полімери крохмалю, білків і клітковини розщеплюються на легкодоступні сполуки, що значно підвищує їхню засвоюваність. Одночасно утворюються біоактивні метаболіти (β-глюкани, органічні кислоти, природні антиоксиданти, вітаміни групи В та інші сполуки) з терапевтичними властивостями, зокрема імуномодулювальною та протизапальною дією [38].

Інтеграція сучасних біотехнологій з omics-підходами (геноміка, транскриптоміка, протеоміка, метаболоміка) створює передумови для розробки штамів з прогнозованими властивостями та оптимізації фер-

Таблиця 1

Переваги та потенційні ризики використання макроміцетів у ферментації харчових круп

Переваги	Потенційні ризики
Підвищення харчової цінності (зростання вмісту білка, вітамінів, GABA, антиоксидантів).	Мікробна та хімічна контамінація сировини (харчових круп).
Зниження вмісту антинутрієнтів (фітатів, танінів, інгібіторів протеаз)	Утворення токсичних метаболітів. Існує ризик синтезу небажаних або потенційно токсичних сполук, які потребують контролю безпечності.
Утворення біоактивних метаболітів (полісахаридів, фенолів, ферментів з імуномодулювальними та антиоксидантними властивостями).	Органолептичні зміни. Ферментація може змінювати смак, запах, колір, що не завжди відповідає вподобанням споживачів.
Покращення зберігання (ферментовані крупки мають кращу мікробіологічну стабільність завдяки виробництву протимікробних метаболітів).	Неправильна ідентифікація. Використання невірного виду гриба через помилкову ідентифікацію, що може призвести до небажаних результатів ферментації або утворення токсичних сполук.
Енергоефективність, оскільки процеси ферментації грибами зазвичай вимагають менше енергії та ресурсів порівняно з традиційними методами виробництва харчових продуктів.	Регуляторні бар'єри – більшість макроміцетів як інгредієнти потребують відповідності нормам харчової безпечності; питання маркування, дозволів, тощо.

ментаційних процесів. Ці інструменти сприяють встановленню ключових метаболічних шляхів, керуванню синтезом корисних метаболітів і підвищенню ефективності біотрансформації сировини [9].

Незважаючи на значний потенціал, ферментація зернових і бобових із застосуванням макроміцетів стикається з низкою суттєвих викликів. Найбільш критичним є масштабування процесів від лабораторних і пілотних установок до промислових біореакторів. Це вимагає стабільності параметрів ферментації (рН, температура, аерація, вологість), збереження продуктивності та генетичної стабільності штамів, а також забезпечення незмінної якості кінцевого продукту [36]. Додаткові бар'єри можуть становити значні капітальні витрати та необхідність упровадження дороговартісних автоматизованих систем контролю й адаптацію виробничих ліній до відповідних біопроцесів.

Слід враховувати, що розвиток та успішне впровадження біопроцесів нового покоління безпосередньо залежить від інтеграції класичних ферментаційних технологій із сучасними, зокрема з системами цифрового моніторингу, інтелектуальними алгоритмами та автоматизованими системами керування. Запровадження інтеграційних механізмів зумовить суттєве підвищення ефективності, що стане чинником зростання інвестиційної привабливості біотехнологічних розробок і стимулюватиме процеси їх подальшої комерціалізації. Таким чином, збільшення інвестицій є каталізатором для розробки та масштабування інноваційних біопро-

цесів, що, своєю чергою, відкриває можливості для створення нових стартапів.

Висновки. Аналіз наукових даних підтверджує, що макроміцети мають значний біотехнологічний потенціал завдяки здатності синтезувати широкий спектр біоактивних сполук. Попри те, що застосування макроміцетів для ферментації харчових круп наразі залишається недостатньо дослідженим, цей напрям демонструє високу перспективність у створенні нових функціональних харчових продуктів, орієнтованих на покращення якості харчування, підтримання здоров'я та зниження ризику розвитку захворювань.

Серед досліджених видів найбільш вивченим і поширеним є *Pleurotus ostreatus* (глива звичайна). Наявні результати засвідчують ефективність ферментації різних видів зернових і бобових культур із залученням макроміцетів, що дозволяє суттєво підвищити їхню поживну, біологічну та функціональну цінність.

Технології, що залучають макроміцети, відкривають нові можливості для розвитку харчової промисловості та нутрицевтики, дозволяючи отримувати продукти з підвищеною поживною, біологічною та функціональною цінністю. Подальший розвиток цього напрямку пов'язаний з інтеграцією сучасних біотехнологічних рішень, автоматизованих систем керування та omics-підходів, що забезпечить можливість масштабування виробництва. Це визначає макроміцети як перспективний інструмент у формуванні інноваційних технологій харчової промисловості та нутрицевтики майбутнього.

Література:

1. Sexton A.E., Garnett T., Lorimer J. Vegan food geographies and the rise of Big Veganism. *Progress in Human Geography*. 2022. Vol. 46, № 2. P. 605–628. DOI: <https://doi.org/10.1177/03091325211051021>.
2. Rippe J.M. Lifestyle medicine: The health-promoting power of daily habits and practices. *American Journal of Lifestyle Medicine*. 2018. Vol. 12, № 6. P. 499–512. DOI: <https://doi.org/10.1177/1559827618785554>.
3. Пахуча Е.В., Севідова І.О. Тенденції розвитку міжнародного ринку функціональних продуктів. *Науково-виробничий журнал «Бізнес-навігатор»*. 2022. Вип. 1(68). С. 83–87. DOI: <https://doi.org/10.32847/business-navigator.68-26>.
4. Precedence Research. Fermented foods market size to hit USD 394.91 billion by 2034. Available at: <https://www.precedenceresearch.com/fermented-foods-market>. Accessed [21.08.2025].
5. Chai F.K., Ng R.K., Samarasiri M., Chen W.N. Precision fermentation to advance fungal food fermentations. *Current Opinion in Food Science*. 2022. Vol. 47. P. 100881. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100881>.
6. Sawant S.S., Park H.-Y., Sim E.-Y., Kim H.-S., Choi H.-S. Microbial fermentation in food: Impact on functional properties and nutritional enhancement – A review of recent developments. *Fermentation*. 2025. Vol. 11, № 1. P. 15. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation11010015>.
7. Singh N., Gaur S. Exploring the microbial niche: Recent advances in fermentation for food and beverage production V. In: Rani R., et al. (Eds.). *Innovative advancements in biotechnology* (Advances in Science, Technology & Innovation, P. 141–156). Springer. 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-80189-1_11.
8. Singh A., Kumar S. Exploring the functionality of microbes in fermented foods: Technological advancements and future directions. *Fermentation*. 2025. Vol. 11, № 6. P. 300. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation11060300>.
9. Zhang Y., Zhu X., Wang N., Liu X., Wang L., Ning K. Synergy of traditional practices and modern technology: Advancing the understanding and applications of microbial resources and processes in fermented foods. *Trends in Food Science & Technology*. 2025. Vol. 157. P. 104891. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.104891>.
10. Niego A.G., Rapior S., Thongklang N., Raspé O., Jaidee W., Lumyong S., Hyde K.D. Macrofungi as a nutraceutical source: Promising bioactive compounds and market value. *Journal of Fungi*. 2021. Vol. 7, № 5. P. 397. DOI: <https://doi.org/10.3390/jof7050397>.
11. Romero J.C.F., Oprea O.B., Gaceu L., Más Diego S.M., Morris Quevedo H.J., Galindo Alonso L., Rivero Ramírez L., Badea M. Edible mushroom cultivation in liquid medium: Impact of microparticles and advances in control systems. *Processes*. 2025. Vol. 13, № 8. P. 2452. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13082452>.

12. Chugh R.M., Mittal P., Mp N., Arora T., Bhattacharya T., Chopra H., Cavalu S., Gautam R.K. Fungal mushrooms: A natural compound with therapeutic applications. *Frontiers in Pharmacology*. 2022. Vol. 13. P. 925387. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.925387>.
13. Sun X., Shi Y., Shi D., Tu Y., Liu L. Biological activities of secondary metabolites from the edible-medicinal macrofungi. *Journal of Fungi*. 2024. Vol. 10, № 2. P. 144. DOI: <https://doi.org/10.3390/jof10020144>.
14. Krupodorova T., Barshteyn V., Ivanova T. Screening of extracellular enzymatic activity of macrofungi. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2014. Vol. 4. P. 315–318.
15. Martínez-Burgos W.J., Ocaña D., Manzoki M.C., Barros R.N., Vieira R., Soccol C.R. Edible macrofungi as an alternative protein source: Advances and trends. *Biotechnology Research and Innovation*. 2024. Vol. 8, № 1. e2024002. DOI: <https://doi.org/10.4322/biori.00022024>.
16. Dudekula U.T., Doriya K., Devarai S.K. A critical review on submerged production of mushroom and their bioactive metabolites. *3 Biotech*. 2020. Vol. 10, № 8. P. 1–12. DOI: <http://doi.org/10.1007/s13205-020-02333-y>.
17. Sangeeta, Sharma D., Ramniwas S., Mugabi R., Uddin J., Nayik G.A. Revolutionizing mushroom processing: Innovative techniques and technologies. *Food Chemistry: X*. 2024. Vol. 23. P. 101774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101774>.
18. Kim I.W., Lee H.B., Sim S.H., Yang E.I., Kim Y. Bioactive compounds and antioxidant activities of sprout soybean fermented with *Irpex lacteus* mycelia. *Food Science and Biotechnology*. 2017. Vol. 26. P. 1563–1570. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0231-y>.
19. Kim I.W., Kim Y.S. Changes in free amino acids, β -glucan, and volatile components of sprout soybeans fermented with *Irpex lacteus* mycelia. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*. 2020. Vol. 49. P. 412–418. DOI: <https://doi.org/10.3746/jkfn.2020.49.4.412>.
20. Asensio-Grau A., Calvo-Lerma J., Heredia A., Andrés A. Enhancing the nutritional profile and digestibility of lentil flour by solid-state fermentation with *Pleurotus ostreatus*. *Food Function*. 2020. Vol. 11. P. 7905–7912. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0FO01527J>.
21. Sánchez-García J., Asensio-Grau A., García-Hernández J., Heredia A., Andrés A. Nutritional and antioxidant changes in lentils and quinoa through fungal solid-state fermentation with *Pleurotus ostreatus*. *Bioresources and Bioprocessing*. 2022. Vol. 9. P. 51. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00542-2>.
22. Espinosa-Páez E., Alanis-Guzmán M.G., Hernández-Luna C.E., Báez-González J.G., Amaya-Guerra C.A., Andrés-Grau A.M. Increasing antioxidant activity and protein digestibility in *Phaseolus vulgaris* and *Avena sativa* by fermentation with the *Pleurotus ostreatus* fungus. *Molecules*. 2017. Vol. 22, № 12. P. 2275. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules22122275>.
23. Miura T., Yuan L., Sun B., Fujii H., Yoshida M., Wakame K., Kosuna K. Isoflavone aglycone produced by culture of soybean extracts with basidiomycetes and its anti-angiogenic activity. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*. 2002. Vol. 66, № 12. P. 2626–2631. DOI: <https://doi.org/10.1271/bbb.66.2626>.
24. Kohei S., Tsuyoshi T., Kazunari K.C. Soybean fermentation with basidiomycetes (medicinal mushroom mycelia). *Biology, Technology, and Agriculture*. 2020. Vol. 7. P. 23. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40538-020-00189-1>.
25. Grimrath A., Berends P., Rabe S. Koji fermentation based on extracellular peptidases of *Flammulina velutipes*. *European Food Research and Technology*. 2011. Vol. 232. P. 415–424. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-010-1437-5>.
26. Soodpakdee K., Nacha J., Rattanachart N., Owatworakit A., Chamyuang S. Fermentation with *Pleurotus ostreatus* enhances the prebiotic properties of germinated Riceberry rice. *Frontiers in Nutrition*. 2022. Vol. 9. P. 839145. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.839145>.
27. Nacha J., Soodpakdee K., Chamyuang S. Nutritional improvement of germinated Riceberry rice (*Oryza sativa*) cultivated with *Pleurotus ostreatus* mycelium. *Trends in Sciences*. 2023. Vol. 20, № 9. P. 5574. DOI: <https://doi.org/10.48048/tis.2023.5574>.
28. Benson K.F., Stamets P., Davis R., Nally R., Taylor A., Slater S., Jensen G.S. The mycelium of the *Trametes versicolor* (Turkey tail) mushroom and its fermented substrate each show potent and complementary immune activating properties in vitro. *BMC Complementary and Alternative Medicine*. 2019. Vol. 19, № 1. P. 342. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12906-019-2681-7>.
29. Darmaswi S., Yaovapa A.R., Kimkong I. Biological activities and chemical profile of *Hericium erinaceus* mycelium cultivated on mixed red and white jasmine rice. *Food Science and Technology, Campinas*. 2022. Vol. 42. e08022. DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.08022>.
30. Postemsky P., Curvetto N. Enhancement of wheat grain antioxidant activity by solid-state fermentation with *Gri-fola* spp. *Journal of Medicinal Food*. 2014. Vol. 17, № 5. P. 543–549. DOI: <https://doi.org/10.1089/jmf.2013.0108>.
31. Boonthatui Y., Chongsawat R., Kittisakulnam S. Production of antioxidant bioactive compounds during mycelium growth of *Schizophyllum commune* on different cereal media. *CMU Journal of Natural Sciences*. 2021. Vol. 20, № 2. e2021032. DOI: <https://doi.org/10.12982/CMUJNS.2021.032>.
32. Lu H., Lou H., Hu J., Liu Z., Chen Q. Macrofungi: A review of cultivation strategies, bioactivity, and application of mushrooms. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2020. Vol. 19, № 5. P. 2333–2356. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12602>.
33. Zhang J., Liu M., Zhao Y., Zhu Y., Bai J., Fan S., Zhu L., Song C., Xiao X. Recent developments in fermented cereals on nutritional constituents and potential health benefits. *Foods*. 2022. Vol. 11, № 15. P. 2243. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11152243>.
34. Paramithiotis S., Ray R.C. Recent concerns about fermented food safety. In: Martin J.G.P., De Dea Lindner J., Melo Pereira G.V.d., Ray R.C. (Eds.). *Trending topics on fermented foods*. Springer, Cham. 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-72000-0_15.

35. Kitessa D.A. Review on effect of fermentation on physicochemical properties, anti-nutritional factors and sensory properties of cereal-based fermented foods and beverages. *Annals of Microbiology*. 2024. Vol. 74. P. 32. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13213-024-01763-w>.
36. Sangeeta, Sharma D., Ramniwas S., Mugabi R., Uddin J., Nayik G.A. Revolutionizing mushroom processing: Innovative techniques and technologies. *Food Chemistry: X*. 2024. Vol. 23. P. 101774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101774>.
37. Rashidinejad A. The road ahead for functional foods: Promising opportunities amidst industry challenges. *Future Postharvest and Food*. 2024. Vol. 1, № 2. P. 266–273. DOI: <https://doi.org/10.1002/fpf2.12022>.
38. Martínez-Burgos W.J., Montes Montes E., Pozzan R., Serra J.L., Torres D.O., Manzoki M.C., Vieira R.L., dos Reis G.A., Rodrigues C., Karp S.G., Soccol C. R. Bioactive compounds produced by macromycetes for application in the pharmaceutical sector: Patents and products. *Fermentation*. 2024. Vol. 10, № 6. P. 275. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation10060275>.

References:

1. Sexton, A. E., Garnett, T., & Lorimer, J. (2022). Vegan food geographies and the rise of Big Veganism. *Progress in Human Geography*, 46(2), 605–628. <https://doi.org/10.1177/03091325211051021>
2. Rippe, J. M. (2018). Lifestyle medicine: The health-promoting power of daily habits and practices. *American Journal of Lifestyle Medicine*, 12(6), 499–512. <https://doi.org/10.1177/1559827618785554>
3. Pakhucha, E. V., & Sievidova, I. O. (2022). Tendentsii rozvytku mizhnarodnoho rynku funktsional'nykh produktiv [Trends in the development of the international market for functional products]. *Biznes-navihator*, 1(68), 83–87 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32847/business-navigator.68-26>
4. Precedence Research. (n.d.). *Fermented foods market size to hit USD 394.91 billion by 2034*. <https://www.precedenceresearch.com/fermented-foods-market>
5. Chai, F. K., Ng, R. K., Samarasiri, M., & Chen, W. N. (2022). Precision fermentation to advance fungal food fermentations. *Current Opinion in Food Science*, 47, 100881. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100881>
6. Sawant, S. S., Park, H.-Y., Sim, E.-Y., Kim, H.-S., & Choi, H.-S. (2025). Microbial fermentation in food: Impact on functional properties and nutritional enhancement – A review of recent developments. *Fermentation*, 11(1), 15. <https://doi.org/10.3390/fermentation11010015>
7. Singh, N., & Gaur, S. (2024). Exploring the microbial niche: Recent advances in fermentation for food and beverage production V. In R. Rani, et al. (Eds.), *Innovative advancements in biotechnology* (Advances in Science, Technology & Innovation, pp. 141–156). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80189-1_11
8. Singh, A., & Kumar, S. (2025). Exploring the functionality of microbes in fermented foods: Technological advancements and future directions. *Fermentation*, 11(6), 300. <https://doi.org/10.3390/fermentation11060300>
9. Zhang, Y., Zhu, X., Wang, N., Liu, X., Wang, L., & Ning, K. (2025). Synergy of traditional practices and modern technology: Advancing the understanding and applications of microbial resources and processes in fermented foods. *Trends in Food Science & Technology*, 157, 104891. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.104891>
10. Niego, A. G., Rapior, S., Thongklang, N., Raspé, O., Jaidee, W., Lumyong, S., & Hyde, K. D. (2021). Macrofungi as a nutraceutical source: Promising bioactive compounds and market value. *Journal of Fungi*, 7(5), 397. <https://doi.org/10.3390/jof7050397>
11. Romero, J. C. F., Oprea, O. B., Gaceu, L., Más Diego, S. M., Morris Quevedo, H. J., Galindo Alonso, L., Rivero Ramírez, L., & Badea, M. (2025). Edible mushroom cultivation in liquid medium: Impact of microparticles and advances in control systems. *Processes*, 13(8), 2452. <https://doi.org/10.3390/pr13082452>
12. Chugh, R. M., Mittal, P., Mp, N., Arora, T., Bhattacharya, T., Chopra, H., Cavalu, S., & Gautam, R. K. (2022). Fungal mushrooms: A natural compound with therapeutic applications. *Frontiers in Pharmacology*, 13, 925387. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.925387>
13. Sun, X., Shi, Y., Shi, D., Tu, Y., & Liu, L. (2024). Biological activities of secondary metabolites from the edible-medicinal macrofungi. *Journal of Fungi*, 10(2), 144. <https://doi.org/10.3390/jof10020144>
14. Krupodorova, T., Barshteyn, V., & Ivanova, T. (2014). Screening of extracellular enzymatic activity of macrofungi. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 4, 315–318.
15. Martínez-Burgos, W. J., Ocaña, D., Manzoki, M. C., Barros, R. N., Vieira, R., & Soccol, C. R. (2024). Edible macromycetes as an alternative protein source: Advances and trends. *Biotechnology Research and Innovation*, 8(1), e2024002. <https://doi.org/10.4322/biori.00022024>
16. Dudekula, U. T., Doriya, K., & Devarai, S. K. (2020). A critical review on submerged production of mushroom and their bioactive metabolites. *3 Biotech*, 10(8), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02333-y>
17. Sangeeta, Sharma, D., Ramniwas, S., Mugabi, R., Uddin, J., & Nayik, G. A. (2024). Revolutionizing mushroom processing: Innovative techniques and technologies. *Food Chemistry: X*, 23, 101774. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101774>
18. Kim, I. W., Lee, H. B., Sim, S. H., Yang, E. I., & Kim, Y. (2017). Bioactive compounds and antioxidant activities of sprout soybean fermented with *Irpex lacteus* mycelia. *Food Science and Biotechnology*, 26, 1563–1570. <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0231-y>
19. Kim, I. W., & Kim, Y. S. (2020). Changes in free amino acids, β -glucan, and volatile components of sprout soybeans fermented with *Irpex lacteus* mycelia. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 49, 412–418. <https://doi.org/10.3746/jkfn.2020.49.4.412>

20. Asensio-Grau, A., Calvo-Lerma, J., Heredia, A., & Andrés, A. (2020). Enhancing the nutritional profile and digestibility of lentil flour by solid-state fermentation with *Pleurotus ostreatus*. *Food Function*, 11, 7905–7912. <https://doi.org/10.1039/D0FO01527J>
21. Sánchez-García, J., Asensio-Grau, A., García-Hernández, J., Heredia, A., & Andrés, A. (2022). Nutritional and antioxidant changes in lentils and quinoa through fungal solid-state fermentation with *Pleurotus ostreatus*. *Bioresources and Bioprocessing*, 9, 51. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00542-2>
22. Espinosa-Páez, E., Alanís-Guzmán, M. G., Hernández-Luna, C. E., Báez-González, J. G., Amaya-Guerra, C. A., & Andrés-Grau, A. M. (2017). Increasing antioxidant activity and protein digestibility in *Phaseolus vulgaris* and *Avena sativa* by fermentation with the *Pleurotus ostreatus* fungus. *Molecules*, 22(12), 2275. <https://doi.org/10.3390/molecules22122275>
23. Miura, T., Yuan, L., Sun, B., Fujii, H., Yoshida, M., Wakame, K., & Kosuna, K. (2002). Isoflavone aglycone produced by culture of soybean extracts with basidiomycetes and its anti-angiogenic activity. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 66(12), 2626–2631. <https://doi.org/10.1271/bbb.66.2626>
24. Kohei, S., Tsuyoshi, T., & Kazunari, K. C. (2020). Soybean fermentation with basidiomycetes (medicinal mushroom mycelia). *Biology, Technology, and Agriculture*, 7, 23. <https://doi.org/10.1186/s40538-020-00189-1>
25. Grimrath, A., Berends, P., & Rabe, S. (2011). Koji fermentation based on extracellular peptidases of *Flammulina velutipes*. *European Food Research and Technology*, 232, 415–424. <https://doi.org/10.1007/s00217-010-1437-5>
26. Soodpakdee, K., Nacha, J., Rattanachart, N., Owatworakit, A., & Chamyuang, S. (2022). Fermentation with *Pleurotus ostreatus* enhances the prebiotic properties of germinated Riceberry rice. *Frontiers in Nutrition*, 9, 839145. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.839145>
27. Nacha, J., Soodpakdee, K., & Chamyuang, S. (2023). Nutritional improvement of germinated Riceberry rice (*Oryza sativa*) cultivated with *Pleurotus ostreatus* mycelium. *Trends in Sciences*, 20(9), 5574. <https://doi.org/10.48048/tis.2023.5574>
28. Benson, K. F., Stamets, P., Davis, R., Nally, R., Taylor, A., Slater, S., & Jensen, G. S. (2019). The mycelium of the *Trametes versicolor* (Turkey tail) mushroom and its fermented substrate each show potent and complementary immune activating properties in vitro. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 19(1), 342. <https://doi.org/10.1186/s12906-019-2681-7>
29. Darmasiwi, S., Yaovapa, A. R., & Kimkong, I. (2022). Biological activities and chemical profile of *Herichium erinaceus* mycelium cultivated on mixed red and white jasmine rice. *Food Science and Technology, Campinas*, 42, e08022. <https://doi.org/10.1590/fst.08022>
30. Postemsky, P., & Curvetto, N. (2014). Enhancement of wheat grain antioxidant activity by solid-state fermentation with *Grifola* spp. *Journal of Medicinal Food*, 17(5), 543–549. <https://doi.org/10.1089/jmf.2013.0108>
31. Boonthatui, Y., Chongsawat, R., & Kittisakulnam, S. (2021). Production of antioxidant bioactive compounds during mycelium growth of *Schizophyllum commune* on different cereal media. *CMU Journal of Natural Sciences*, 20(2), e2021032. <https://doi.org/10.12982/CMUJNS.2021.032>
32. Lu, H., Lou, H., Hu, J., Liu, Z., & Chen, Q. (2020). Macrofungi: A review of cultivation strategies, bioactivity, and application of mushrooms. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(5), 2333–2356. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12602>
33. Zhang, J., Liu, M., Zhao, Y., Zhu, Y., Bai, J., Fan, S., Zhu, L., Song, C., & Xiao, X. (2022). Recent developments in fermented cereals on nutritional constituents and potential health benefits. *Foods*, 11(15), 2243. <https://doi.org/10.3390/foods11152243>
34. Paramithiotis, S., & Ray, R. C. (2024). Recent concerns about fermented food safety. In J. G. P. Martin, J. De Dea Lindner, G. V. d. Melo Pereira, & R. C. Ray (Eds.), *Trending topics on fermented foods*. Springer, Cham. pp. 387–413. https://doi.org/10.1007/978-3-031-72000-0_15
35. Kiteisa, D. A. (2024). Review on effect of fermentation on physicochemical properties, anti-nutritional factors and sensory properties of cereal-based fermented foods and beverages. *Annals of Microbiology*, 74, 32. <https://doi.org/10.1186/s13213-024-01763-w>
36. Sangeeta, Sharma, D., Ramniwas, S., Mugabi, R., Uddin, J., & Nayik, G. A. (2024). Revolutionizing mushroom processing: Innovative techniques and technologies. *Food Chemistry: X*, 23, 101774. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101774>
37. Rashidinejad, A. (2024). The road ahead for functional foods: Promising opportunities amidst industry challenges. *Future Postharvest and Food*, 1(2), 266–273. <https://doi.org/10.1002/fpf2.12022>
38. Martínez-Burgos, W. J., Montes Montes, E., Pozzan, R., Serra, J. L., Torres, D. O., Manzoki, M. C., Vieira, R. L., dos Reis, G. A., Rodrigues, C., Karp, S. G., & Soccol, C. R. (2024). Bioactive compounds produced by macromycetes for application in the pharmaceutical sector: Patents and products. *Fermentation*, 10(6), 275. <https://doi.org/10.3390/fermentation10060275>

Дата першого надходження рукопису до видання: 19.08.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 22.09.2025

Дата публікації: 31.10.2025