УДК 664.38:613.2
DOI https://doi.org/10.37734/2518-7171-2026-2-14

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ БІОЛОГІЧНОЇ ЦІННОСТІ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ПРОТЕЇНУ РОСЛИННОГО ТА МІКРОБІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ

Ю. М. ГОНЧАР, доктор філософії з харчових технологій, доцент
ORCID ID: 0000-0002-8087-0641
(Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного)
Я. С. ВАВРИСЕВИЧ, кандидат біологічних наук, доцент,
ORCID ID: 0009-0003-0160-8384
(Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького)
В. А. КОЛОДІЙ, кандидат біологічних наук
ORCID ID: 0000-0002-9669-4144
(Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка)

Анотація. Мета дослідження. *Мета дослідження полягає у проведенні порівняльного аналізу біологічної цінності альтернативних джерел протеїну рослинного та мікробіологічного походження та визначенні перспектив їх використання у сучасних харчових системах.* ***Методика дослідження.*** *Порівняльний аналіз проведено за показниками амінокислотного складу, засвоюваності, біодоступності, наявності антинутрієнтів і сучасних інтегральних критеріїв оцінювання біологічної цінності протеїнів.* ***Результати.*** *У результаті дослідження систематизовано сучасні наукові підходи до оцінювання біологічної цінності альтернативних джерел протеїну та показано еволюцію критеріїв її визначення від оцінювання загального вмісту білка до комплексного аналізу його нутритивних характеристик. Встановлено, що використання окремих показників не забезпечує об'єктивного порівняння рослинних і мікробіологічних протеїнів, тоді як їх комплексне застосування дозволяє більш повно оцінити харчову якість білка. Виявлено, що основними факторами, які обмежують біологічну цінність рослинних білків, є дефіцит окремих незамінних амінокислот і наявність антинутрієнтів, тоді як для мікробіологічних білків визначальне значення має ефективність технологій руйнування клітинної стінки та екстракції білкової фракції. Доведено, що найбільш перспективним напрямом підвищення біологічної цінності харчових продуктів є використання комбінованих білкових систем, у яких рослинні та мікробіологічні протеїни взаємно компенсують власні обмеження.* ***Висновки.*** *Узагальнення отриманих результатів дозволило сформувати науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору альтернативних джерел протеїну залежно від їх нутритивних характеристик і технологічного призначення. Практична значимість результатів дослідження полягає у можливості використання запропонованого підходу під час розроблення нових білкових інгредієнтів, оптимізації рецептур функціональних харчових продуктів, удосконалення технологій переробки альтернативної білкової сировини та наукового обґрунтування вибору рослинних і мікробіологічних протеїнів для створення продуктів із прогнозовано високою біологічною цінністю.*

Ключові слова: *альтернативні джерела протеїну, рослинні білки, мікробіологічні білки, біологічна цінність білка, амінокислотний склад.*

Актуальність теми дослідження зумовлена необхідністю науково обґрунтованої оцінки біологічної цінності альтернативних джерел протеїну як основи формування стійких, безпечних і ресурсоефективних продовольчих систем.

Постановка проблеми. Забезпечення населення повноцінним харчовим білком стає одним із ключових викликів сучасної продовольчої системи. Прогнозоване зростання світового попиту на протеїн, обмеженість природних ресурсів, підвищення екологічного навантаження від традиційного тваринництва та необхідність скорочення викидів парникових газів змушують переглядати усталені підходи до виробництва білкової сировини. За цих умов альтернативні джерела протеїну вже не розглядаються лише як замінники продуктів тваринного походження. Вони поступово формують окремий напрям розвитку харчової індустрії, що поєднує досягнення біотехнології, нутриціології та харчової хімії. Особливий інтерес викликають рослинні та мікробіологічні білки, виробництво яких характеризується значно меншим споживанням земельних і водних ресурсів, можливістю швидкого масштабування та високим потенціалом для створення функціональних харчових продуктів. Проте практична цінність цих джерел визначається насамперед їхньою біологічною якістю, а не лише обсягами виробництва чи екологічними перевагами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні роки дослідження альтернативних джерел протеїну істотно змінили свій фокус. Якщо раніше

переважала оцінка екологічних переваг рослинної сировини порівняно з тваринною, то нині основна увага приділяється харчовій повноцінності білка, його засвоюваності та здатності забезпечувати фізіологічні потреби організму людини. Це зумовило розвиток підходів до визначення біологічної цінності протеїнів, однак єдиного підходу до порівняльної оцінки різних альтернативних джерел поки що не сформовано.

L. Herreman, P. Nommensen, B. Pennings та M. C. Laus [1] показали, що використання показника DIAAS забезпечує більш повну характеристику харчової цінності протеїнів порівняно з PDCAAS, оскільки враховує ілеальну засвоюваність незамінних амінокислот. На основі порівняння рослинних і тваринних білків автори встановили значні відмінності між окремими видами рослинної сировини: ізольований соєвий білок наближається до показників тваринних протеїнів, тоді як білки зернових культур характеризуються дефіцитом окремих незамінних амінокислот.

Питання харчової цінності рослинних протеїнів отримало подальший розвиток у дослідженні I. Medina-Vera та ін. [2]. Автори встановили, що поживна цінність рослинних білків визначається не лише їхнім амінокислотним складом, а й ступенем технологічної обробки. Вони показали, що ферментація, ізоляція білкових фракцій та ензиматичний гідроліз сприяють підвищенню засвоюваності амінокислот і зменшенню вмісту антинутрієнтів.

Сучасні напрями розвитку технологій виробництва рослинних білків розглянули N. Kumar та ін. [3]. Отримані ними результати свідчать, що використання прецизійної ферментації, екструзії високої вологості, ферментативної модифікації та сучасних методів фракціонування сприяє підвищенню доступності незамінних амінокислот і покращенню функціональних характеристик білкових інгредієнтів.

Особливості білкової якості готових альтернативних продуктів дослідили S. Cutroneo та ін. [4]. Вони встановили, що високий вміст протеїну в аналогах м'яса не завжди супроводжується високими показниками його засвоюваності. Результати дослідження свідчать про істотні відмінності між комерційними продуктами за амінокислотним профілем і рівнем перетравності, тоді як технологічна обробка лише частково компенсує обмеження рослинної сировини.

Причини таких відмінностей проаналізували J. Auer та ін. [5]. Вони встановили, що білки сої, гороху та кормових бобів, незважаючи на подібний амінокислотний склад, характеризуються різною біодоступністю через особливості клітинної структури, вміст фітатів та взаємодію білків із мінеральними компонентами. Отримані результати також показали, що окремі способи технологічної обробки підвищують засвоюваність як протеїнів, так і мінеральних речовин.

Вплив супутніх компонентів рослинної сировини на засвоюваність білків дослідив C. S. Brennan [6]. Автор встановив, що фенольні сполуки здатні змінювати перетравність протеїнів шляхом утворення білково-фенольних комплексів, хоча одночасно вони забезпечують антиоксидантні властивості продукту.

Білки мікробіологічного походження розглянули R. Kumar та ін. [7]. Автори встановили, що мікроводорості характеризуються збалансованим амінокислотним профілем, високим вмістом біологічно активних пептидів і можуть використовуватися як джерело функціональних білкових інгредієнтів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз літератури свідчить, що сучасні дослідження детально характеризують окремі групи рослинних або мікробіологічних білків, однак переважно розглядають їх незалежно одна від одної та ін. [1–7]. У наукових публікаціях недостатньо представлені роботи, у яких обидві групи альтернативних протеїнів порівнюються за єдиною системою критеріїв із урахуванням амінокислотного складу, засвоюваності, біодоступності, впливу антинутрієнтів і технологічної обробки.

Формування цілей статті (постановка завдання). Мета дослідження полягає у проведенні порівняльного аналізу біологічної цінності альтернативних джерел протеїну рослинного та мікробіологічного походження та визначенні перспектив їх використання у сучасних харчових системах.

Об'єкт та предмет дослідження. Об'єктом дослідження є альтернативні джерела протеїну рослинного та мікробіологічного походження. Предметом дослідження є їх біологічна цінність, що оцінюється за амінокислотним складом, засвоюваністю, біодоступністю, наявністю антинутрієнтів, показниками DIAAS і PDCAAS та впливом технологічної обробки.

Методи дослідження та організація дослідження. Методологія дослідження ґрунтується на комплексному застосуванні аналізу, синтезу, систематизації та узагальнення наукової літератури, порівняльного аналізу, структурно-логічного методу та наукового узагальнення. Спеціальне лабораторне обладнання не використовувалося, оскільки дослідження має аналітично-оглядовий характер.

Статистична оцінка одержаних результатів. Статистичне опрацювання експериментальних даних не проводилося у зв'язку з аналітично-оглядовим характером дослідження; порівняння здійснено за узагальненими даними наукових джерел.

Виклад основного матеріалу дослідження. Оцінювання біологічної цінності альтернативних джерел протеїну є одним із найбільш дискусійних напрямів сучасної нутриціології. Причина полягає не у відсутності методів визначення якості білка, а в тому, що кожен із них характеризує лише окремий аспект його харчової цінності [6]. Зі збільшенням кількості рослинних і мікробіологічних джерел протеїну стало очевидно, що однаковий вміст білка не гарантує однакової ефективності його використання організмом. Саме тому сучасне розуміння біологічної цінності ґрунтується на комплексній оцінці амінокислотного складу, засвоюваності, біодоступності та впливу технологічної обробки, а не лише на визначенні загальної кількості протеїну.

Еволюція підходів до оцінювання білкової якості відображає зміну уявлень про роль протеїну в харчуванні людини. Перші методики були орієнтовані переважно на кількісний вміст білка у продукті, однак подальші дослідження показали, що цього показника недостатньо для прогнозування його фізіологічної ефективності [1]. Подібні значення масової частки протеїну можуть поєднуватися з істотними відмінностями у забезпеченості незамінними амінокислотами, їх засвоєнні та подальшому використанні в організмі. Це зумовило поступовий перехід до інтегрованих підходів, які враховують не лише хімічний склад білка, а й особливості його метаболічної доступності.

Одним із перших міжнародно визнаних інтегральних критеріїв став Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score (PDCAAS). Його застосування дозволило поєднати оцінку амінокислотного складу з показником загальної перетравності білка та використовувати єдиний підхід для порівняння різних джерел протеїну. Разом із тим накопичення експериментальних даних продемонструвало низку методологічних обмежень цього показника. Насамперед він базується на фекальній перетравності, яка не відображає реального рівня засвоєння окремих незамінних амінокислот у тонкому кишечнику. Крім того, верхнє обмеження значенням 1,0 унеможливлює диференціацію білків із дуже високою харчовою якістю [7].

Подальший розвиток методології оцінювання привів до впровадження Digestible Indispensable Amino Acid Score (DIAAS) [5]. На відміну від PDCAAS, цей показник визначає ілеальну засвоюваність кожної незамінної амінокислоти окремо, що дозволяє встановити лімітуючі амінокислоти та оцінити їхній вплив на загальну біологічну цінність білка. Для альтернативних джерел протеїну така деталізація є принципово важливою. Рослинні та мікробіологічні білки нерідко мають подібний загальний уміст протеїну, однак суттєво відрізняються за забезпеченістю окремими незамінними амінокислотами та рівнем їх засвоєння.

Розвиток сучасних технологій виробництва білкових інгредієнтів показав, що навіть використання DIAAS не дає вичерпної характеристики харчової якості альтернативного протеїну [6]. Біологічна цінність формується під впливом значно ширшого комплексу чинників. До них належать амінокислотний профіль, співвідношення незамінних амінокислот, наявність антинутрієнтів, ступінь денатурації білкових молекул, а також структурні зміни, що виникають під час ферментації, екструзії, ензиматичного гідролізу, пророщування або інших способів технологічної обробки. У багатьох випадках саме технологія виробництва визначає кінцеву біодоступність білка більшою мірою, ніж його початковий хімічний склад.

Особливості оцінювання рослинних і мікробіологічних білків також суттєво різняться. Для більшості рослинних протеїнів головним фактором залишається дефіцит окремих незамінних амінокислот, тому сучасні дослідження дедалі частіше спрямовані на формування комплементарних білкових композицій [1]. Поєднання білків зернових і бобових культур дозволяє наблизити амінокислотний профіль до фізіологічно оптимального без збільшення загального вмісту протеїну. Для білків мікробіологічного походження основним обмеженням є не амінокислотний склад, а доступність білкових компонентів після руйнування клітинної стінки. Саме тому сучасні біотехнології дедалі більше орієнтовані на вдосконалення способів екстракції та обробки біомаси, здатних підвищити рівень засвоюваності білка.

Проведений аналіз свідчить, що жоден із сучасних показників окремо не забезпечує повної оцінки біологічної цінності альтернативного протеїну [2]. Амінокислотний профіль характеризує потенційну повноцінність білка, однак не враховує ступінь його засвоєння. Показники перетравності відображають доступність амінокислот для організму, але не дають відповіді щодо їхньої збалансованості. Аналіз технологічної обробки демонструє зміни харчової якості продукту, проте не може використовуватися як самостійний критерій порівняння різних джерел білка.

З огляду на це подальший порівняльний аналіз рослинних і мікробіологічних джерел протеїну доцільно здійснювати на основі інтегрованої системи критеріїв, що поєднує оцінювання амінокислотного складу, показників PDCAAS і DIAAS, рівня засвоюваності, біодоступності та впливу технологічної обробки. Систематизацію сучасних підходів до оцінювання біологічної цінності альтернативних протеїнів наведено в табл. 1. Запропонована система критеріїв використовується як методологічна основа подальшого

порівняльного аналізу і забезпечує можливість зіставлення білків різного походження за єдиними принципами оцінювання.

Аналіз сучасних підходів показує, що універсального показника оцінювання біологічної цінності альтернативних джерел протеїну наразі не існує. Кожен із використовуваних критеріїв характеризує окремий аспект харчової якості білка, тому їх застосування ізольовано не забезпечує об'єктивного порівняння різних джерел протеїну. З огляду на це у подальшому дослідженні використано інтегрований підхід, який поєднує оцінювання амінокислотного профілю, показників DIAAS і PDCAAS, рівня засвоюваності, біодоступності та впливу технологічної обробки. Така система критеріїв дозволяє зіставляти рослинні й мікробіологічні білки за єдиною методологічною основою та забезпечує коректність їх подальшого порівняльного аналізу.

Комплексне оцінювання біологічної цінності альтернативних джерел протеїну передбачає одночасний аналіз кількох взаємопов'язаних показників. Жоден із них окремо не відображає повною мірою харчову якість білка, тому коректне порівняння можливе лише за сукупністю критеріїв. З цією метою проведено узагальнення сучасних літературних даних щодо рослинних і мікробіологічних протеїнів за показниками амінокислотного складу, засвоюваності, біодоступності, наявності антинутрієнтів та інтегральних індексів якості білка [6–9] (табл. 2).

Дані, наведені в табл. 2, свідчать, що найбільші відмінності між альтернативними джерелами протеїну стосуються не стільки загального вмісту білка, скільки його амінокислотної збалансованості. Саме цей показник значною мірою визначає подальші відмінності у значеннях DIAAS, засвоюваності та кінцевій біологічній цінності. Порівняння різних груп протеїнів показує, що білки мікробіологічного походження, зокрема мікроводоростей, дріжджів і мікопротеїну, у більшості випадків характеризуються повнішим набором незамінних амінокислот [9]. Для рослинної сировини ситуація менш однорідна. Амінокислотний профіль істотно залежить від ботанічного походження: зернові культури мають недостатній уміст лізину, тоді як у білках бобових культур лімітуючими найчастіше є метіонін і цистеїн. Це пояснює, чому сучасні харчові технології дедалі частіше орієнтуються не на використання окремих рослинних білків, а на створення їх комбінованих композицій, у яких дефіцит одних амінокислот компенсується за рахунок інших компонентів.

Порівняння показників засвоюваності свідчить, що вирішальне значення має не лише походження протеїну, а й особливості його структури та ступінь технологічної обробки. Для рослинних білків обмежувальними факторами залишаються щільна клітинна матриця, висока частка харчових волокон та присутність сполук, які ускладнюють доступ травних ферментів до білкових молекул. Після ферментації, пророщування, ензиматичного гідролізу або екструзії рівень засвоюваності помітно підвищується, що підтверджує визначальну роль технології переробки у формуванні

Таблиця 1

Систематизація сучасних підходів до оцінювання біологічної цінності альтернативних джерел протеїну

Підхід	Що оцінюється	Переваги	Обмеження	Доцільність використання
Вміст білка	Загальна кількість протеїну	Простота визначення	Не характеризує біологічну цінність	Первинна оцінка сировини
Амінокислотний профіль	Забезпеченість незамінними амінокислотами	Виявляє лімітуючі амінокислоти	Не враховує засвоюваність	Порівняння харчової повноцінності
PDCAAS	Якість білка з урахуванням перетравності	Міжнародний стандартизований показник	Не враховує ілеальну засвоюваність; обмеження значення 1,0	Порівняння традиційних джерел білка
DIAAS	Ілеальна засвоюваність окремих незамінних амінокислот	Найточніше характеризує біологічну цінність	Висока складність визначення	Оцінювання альтернативних джерел протеїну
Біодоступність	Реальне використання амінокислот організмом	Відображає фізіологічну ефективність	Залежить від багатьох чинників	Функціональні продукти
Вплив технологічної обробки	Зміни якості білка після переробки	Дає змогу оцінити ефективність технологій	Не є самостійним критерієм	Біотехнологічні дослідження
Комплексний підхід (авторська пропозиція)	Інтегральна оцінка біологічної цінності	Забезпечує об'єктивне порівняння різних джерел протеїну	Потребує комплексного аналізу	Основа порівняльного дослідження

Джерело: сформовано на основі [6, 7, 8, 9].

біологічної цінності кінцевого продукту [10]. Для мікробіологічних білків ключовим чинником є ефективність руйнування клітинної стінки, оскільки саме вона визначає доступність внутрішньоклітинного білка для ферментативного гідролізу. Отже, високий потенціал мікробного протеїну реалізується лише за умови належної технологічної підготовки біомаси.

Подібна закономірність простежується і під час аналізу біодоступності. Представлені в табл. 2 результати свідчать, що високий вміст незамінних амінокислот не завжди супроводжується їх ефективним використанням організмом. Біодоступність формується під впливом сукупності факторів, серед яких визначальними є структура білка, ступінь його денатурації, взаємодія з іншими компонентами харчової матриці та спосіб технологічної обробки [10]. Саме тому білки, які мають подібний амінокислотний профіль, можуть демонструвати різну фізіологічну ефективність. Для альтернативних джерел протеїну це має принципове значення, оскільки дозволяє оцінювати не лише потенційну, а й фактичну харчову цінність білка після його споживання.

Окремої уваги потребує роль антинутрієнтів, вплив яких суттєво відрізняється залежно від походження білка. Для більшості рослинних культур основними факторами, що обмежують засвоєння протеїну, залишаються фітати, інгібітори протеаз, таніни та окремі фенольні сполуки [11]. Їх присутність знижує доступність амінокислот і погіршує засвоєння деяких мінеральних речовин, однак цей ефект значною мірою нівелюється сучасними технологіями ферментації, пророщування та ферментативної модифікації. У мікробіологічних джерелах класичні антинутрієнти практично відсутні, проте їх функціональним аналогом виступає клітинна оболонка, яка ускладнює доступ травних ферментів до білкової фракції. Це свідчить, що чинники, які обмежують біологічну цінність рослинних і мікробіологічних протеїнів, мають різну природу, хоча кінцевий результат проявляється однаково – у зниженні ефективності використання білка організмом.

Проведене порівняння дозволяє зробити висновок, що жодна група альтернативних протеїнів не має універсальної переваги за всіма критеріями оцінювання. Рослинні білки поступаються мікробіологічним за збалансованістю амінокислотного складу, однак ці відмінності можуть бути істотно зменшені завдяки комбінуванню різних видів сировини та сучасним методам її переробки. Мікробіологічні протеїни, своєю чергою, характеризуються високою потенційною біологічною цінністю, проте ефективність їх використання безпосередньо залежить від технологій отримання й підготовки біомаси. Це дає підстави розглядати технологічну обробку не як допоміжний етап виробництва, а як один із ключових чинників формування біологічної цінності альтернативних джерел протеїну.

Попередній аналіз показав, що оцінювання альтернативних джерел протеїну лише за показниками амінокислотного складу або засвоюваності не дозволяє зробити однозначний висновок щодо їх практичної цінності [9, 12]. Для впровадження білкових інгредієнтів у виробництво харчових продуктів не менш важливими є технологічна придатність сировини, економічна доцільність її використання, рівень промислової готовності та можливість забезпечення стабільної біологічної цінності кінцевого продукту. Саме тому на завершальному етапі дослідження доцільно перейти від аналізу окремих показників до комплексної оцінки перспектив використання рослинних і мікробіологічних протеїнів.

З цією метою узагальнено результати порівняльного аналізу за критеріями, які визначають можливості практичного застосування альтернативних білків у харчовій промисловості [12]. До оцінювання включено не лише нутритивні характеристики, а й технологічні, економічні та виробничі аспекти, що безпосередньо впливають на розроблення продуктів із високою біологічною

Таблиця 2

Порівняльна характеристика альтернативних джерел протеїну за сучасними критеріями оцінювання біологічної цінності

Джерело протеїну	Амінокислотний склад	Засвоюваність	Біодоступність	Антинутрієнти	DIAAS/ PDCAAS	Загальна оцінка
Соєвий білок	високий	висока	висока	низькі після обробки	високий	дуже висока
Гороховий	добрий	висока	середня-висока	фітати	середній	висока
Боби	добрий	середня	середня	фітати, таніни	середній	середня
Зернові	дефіцит лізину	висока	середня	низькі	середній	середня
Мікроводорості	дуже високий	залежить від руйнування клітин	висока	практично відсутні	високий	дуже висока
Дріжджі	високий	висока	висока	відсутні	високий	дуже висока
Мікопротеїн	високий	висока	висока	відсутні	високий	дуже висока

Джерело: сформовано на основі [2, 5, 8, 9].

Таблиця 3

Порівняльна характеристика переваг, обмежень та перспектив використання альтернативних джерел протеїну у виробництві харчових продуктів

Напрям аналізу	Рослинні протеїни	Мікробіологічні протеїни	Практичне значення для розроблення харчових продуктів
Амінокислотний профіль	Потребує взаємодоповнення різних культур	У більшості випадків є збалансованим	Визначає вибір рецептури білкових композицій
Засвоюваність	Залежить від способу обробки та вмісту антинутрієнтів	Визначається ефективністю руйнування клітинної стінки	Обумовлює вибір технології виробництва
Біодоступність	Підвищується після ферментації або гідролізу	Підвищується після екстракції білка	Впливає на реальну харчову цінність продукту
Основні фактори, що обмежують використання	Лімітуючі амінокислоти, фітати, таніни, інгібітори протеаз	Клітинна оболонка, висока вартість окремих технологій	Визначають напрями технологічної оптимізації
Технологічні рішення	Комбінування білків, ферментація, екструзія, пророщування	Руйнування клітинної стінки, біотехнологічна модифікація, оптимізація екстракції	Сприяють підвищенню біологічної цінності

Джерело: власна розробка автора.

цінністю. Такий підхід дозволяє розглядати альтернативні джерела протеїну як складові єдиної системи виробництва білкових продуктів, а не як ізольовані інгредієнти. Узагальнені результати наведено в таблиці 3.

Представлені в табл. 3 результати свідчать, що рослинні та мікробіологічні джерела протеїну не мають універсальних переваг за всіма критеріями оцінювання. Їх конкурентні позиції змінюються залежно від показника, який аналізується [10]. Якщо біологічна цінність визначається насамперед амінокислотною збалансованістю та відсутністю антинутрієнтів, перевагу демонструють мікробіологічні білки. За показниками доступності сировини, рівня промислового освоєння та економічної ефективності більш вигідними залишаються рослинні протеїни. Отже, результати порівняння не дають підстав розглядати одну з цих груп як безумовно кращу.

Показовим є те, що більшість виявлених обмежень пов'язана не з природними властивостями білків, а з технологією їх отримання та переробки. Для рослинної сировини ключовими чинниками залишаються корекція амінокислотного профілю та зниження вмісту антинутрієнтів [9]. Для мікробіологічних протеїнів вирішальне значення має ефективне руйнування клітинної стінки, яке визначає доступність білкової фракції для травних ферментів. Це означає, що сучасні технології виробництва впливають на біологічну цінність білка не меншою мірою, ніж його природний склад.

Ще одна закономірність, яка простежується за результатами проведеного аналізу, полягає у зміні самого підходу до розроблення білкових продуктів. Якщо раніше основною метою було пошук окремого джерела протеїну з максимально високими показниками якості, то сучасні дослідження дедалі більше орієнтовані на формування багатокомпонентних білкових систем [12]. Поєднання рослинних і мікробіологічних білків дозволяє одночасно покращити амінокислотний склад, підвищити засвоюваність, мінімізувати вплив антинутрієнтів і зберегти прийнятний рівень собівартості продукції. Саме ця тенденція, на нашу думку, визначатиме розвиток технологій виробництва альтернативних білкових продуктів у найближчі роки.

Проведене порівняння дає підстави запропонувати інтегрований підхід до оцінювання перспективності альтернативних джерел протеїну [8]. На відміну від поширеної практики, коли окремі види білків аналізуються ізольовано, доцільно оцінювати їх як елементи єдиної білкової системи, у якій кінцева біологічна цінність формується внаслідок поєднання складу сировини, технології її обробки та взаємодії окремих компонентів. Такий підхід створює підґрунтя для цілеспрямованого проєктування харчових продуктів із прогнозованими нутритивними властивостями та може бути використаний як методологічна основа подальших досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів. Запропоновано інтегрований підхід до порівняльного оцінювання альтернативних джерел протеїну, який поєднує амінокислотний профіль, DIAAS і PDCAAS, засвоюваність, біодоступність та вплив технологічної обробки, а також обґрунтовано перспективність комбінованих білкових систем рослинного та мікробіологічного походження.

Висновки із зазначених проблем і перспективи подальших досліджень у поданому напрямі. Проведене дослідження підтвердило, що оцінювання біологічної цінності альтернативних джерел протеїну потребує комплексного підходу, оскільки жоден окремий показник не дозволяє повною мірою охарактеризувати їх харчову якість. Аналіз сучасних наукових підходів засвідчив еволюцію критеріїв оцінювання від визначення загального вмісту білка до використання

інтегральних показників, які враховують амінокислотний склад, засвоюваність, біодоступність та вплив технологічної обробки. Найбільш інформативним інструментом порівняльного аналізу альтернативних протеїнів на сучасному етапі є комплексне застосування показників DIAAS, PDCAAS, характеристик амінокислотного профілю та факторів, що впливають на доступність білка для організму.

Порівняльний аналіз рослинних і мікробіологічних джерел протеїну показав, що їх біологічна цінність визначається різними чинниками. Для рослинних білків основними обмеженнями залишаються дефіцит окремих незамінних амінокислот і наявність антинутрієнтів, які знижують ефективність засвоєння протеїну. Для мікробіологічних білків характерний більш збалансований амінокислотний склад, однак рівень їх біологічної цінності значною мірою залежить від ефективності технологій руйнування клітинної стінки та екстракції білкових компонентів. Отже, природний склад білка є лише одним із чинників, що формують його харчову якість, тоді як вирішальну роль у багатьох випадках відіграють сучасні технології переробки.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з експериментальною перевіркою запропонованого інтегрованого підходу для комбінованих білкових систем, уточненням показників їх засвоюваності та біодоступності й оцінюванням впливу технологічної обробки на кінцеву біологічну цінність продуктів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Herreman L., Nommensen P., Pennings B., Laus M. C. Comprehensive overview of the quality of plant- and animal-sourced proteins based on the digestible indispensable amino acid score. *Food Science & Nutrition*. 2020. Vol. 8, No. 10. P. 5379–5391. DOI: https://doi.org/10.1002/fsn3.1809.

2. Medina-Vera I., Avila-Nava A., León-López L., Gutiérrez-Solis A. L., Talamantes-Gómez J. M., Márquez-Mota C. C. Plant-based proteins: Clinical and technological importance. *Food Science and Biotechnology*. 2024. Vol. 33, No. 11. P. 2461–2475. DOI: https://doi.org/10.1007/s10068-024-01600-5.

3. Kumar N., Kaushik N., Pratibha, Jaiswal R., Gonçalves Lima C. M., Trajkovska Petkoska A., Kieliszek M. Rethinking plant proteins: Innovations in nutrition, processing, and food development. *Plant Foods for Human Nutrition*. 2026. Vol. 81, No. 2. Article 54. DOI: https://doi.org/10.1007/s11130-026-01509-w.

4. Cutroneo S., Prandi B., Pellegrini N., Sforza S., Tedeschi T. Assessment of protein quality and digestibility in plant-based meat analogues. *Journal of Agricultural and Food Chemistry.* 2024. Vol. 72, No. 14. P. 8114–8125. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c08956.

5. Auer J., Alminger M., Marinea M., Johansson M., Zamaratskaia G., Högberg A., Langton M. Assessing the digestibility and estimated bioavailability/bioaccessibility of plant-based proteins and minerals from soy, pea, and faba bean ingredients. *LWT – Food Science and Technology.* 2024. Vol. 197. Article 115893. DOI: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115893.

6. Brennan C. S. The role of valorised plant proteins and phenolic compounds on the digestibility of foods: A short review of recent trends and future opportunities in addressing sustainability issues. *Frontiers in Food Science and Technology*. 2024. Vol. 4. Article 1354391. DOI: https://doi.org/10.3389/frfst.2024.1354391.

7. Kumar R., Hegde A. S., Sharma K., Parmar P., Srivatsan V. Microalgae as a sustainable source of edible proteins and bioactive peptides: Current trends and future prospects. *Food Research International*. 2022. Vol. 157. Article 111338. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111338.

8. Van De Walle S., Broucke K., Baune M. C., Terjung N., Van Royen G., Boukid F. Microalgae protein digestibility: How to crack open the black box? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2024. Vol. 64, No. 20. P. 7149–7171. DOI: https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2181754.

9. Williamson E., Ross I. L., Wall B. T., Hankamer B. Microalgae: Potential novel protein for sustainable human nutrition. *Trends in Plant Science*. 2024. Vol. 29, No. 3. P. 370–382. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tplants.2023.08.006.

10. Li R., Fan X., Jiang Y., Wang R., Guo R., Zhang Y., Fu S. From anaerobic digestion to single cell protein synthesis: A promising route beyond biogas utilization. *Water Research.* 2023. Vol. 243. Article 120417. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120417.

11. Zeng Y., Chen E., Zhang X., Li D., Wang Q., Sun Y. Nutritional value and physicochemical characteristics of alternative protein for meat and dairy – A review. *Foods.* 2022. Vol. 11, No. 21. Article 3326. DOI: https://doi.org/10.3390/foods11213326

12. Nunes E., Odenthal K., Nunes N., Fernandes T., Fernandes I. A., Pinheiro de Carvalho M. A. A. Protein extracts from microalgae and cyanobacteria biomass: Techno-functional properties and bioactivity: A review. *Algal Research*. 2024. Vol. 82. Article 103638. DOI: https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103638.

REFERENCES

1. Herreman, L., Nommensen, P., Pennings, B., & Laus, M. C. (2020). Comprehensive overview of the quality of plant- and animal-sourced proteins based on the digestible indispensable amino acid score. *Food Science & Nutrition*, 8(10), 5379–5391. https://doi.org/10.1002/fsn3.1809

2. Medina-Vera, I., Avila-Nava, A., León-López, L., Gutiérrez-Solis, A. L., Talamantes-Gómez, J. M., & Márquez-Mota, C. C. (2024). Plant-based proteins: Clinical and technological importance. *Food Science and Biotechnology*, 33(11), 2461–2475. https://doi.org/10.1007/s10068-024-01600-5

3. Kumar, N., Kaushik, N., Pratibha, Jaiswal, R., Gonçalves Lima, C. M., Trajkovska Petkoska, A., & Kieliszek, M. (2026). Rethinking plant proteins: Innovations in nutrition, processing, and food development. *Plant Foods for Human Nutrition*, 81(2), Article 54. https://doi.org/10.1007/s11130-026-01509-w

4. Cutroneo, S., Prandi, B., Pellegrini, N., Sforza, S., & Tedeschi, T. (2024). Assessment of protein quality and digestibility in plant-based meat analogues. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(14), 8114–8125. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c08956

5. Auer, J., Alminger, M., Marinea, M., Johansson, M., Zamaratskaia, G., Högberg, A., & Langton, M. (2024). Assessing the digestibility and estimated bioavailability/bioaccessibility of plant-based proteins and minerals from soy, pea, and faba bean ingredients. *LWT – Food Science and Technology*, 197, Article 115893. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115893

6. Brennan, C. S. (2024). The role of valorised plant proteins and phenolic compounds on the digestibility of foods: A short review of recent trends and future opportunities in addressing sustainability issues. *Frontiers in Food Science and Technology*, 4, Article 1354391. https://doi.org/10.3389/frfst.2024.1354391

7. Kumar, R., Hegde, A. S., Sharma, K., Parmar, P., & Srivatsan, V. (2022). Microalgae as a sustainable source of edible proteins and bioactive peptides: Current trends and future prospects. *Food Research International*, 157, Article 111338. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111338

8. Van De Walle, S., Broucke, K., Baune, M. C., Terjung, N., Van Royen, G., & Boukid, F. (2024). Microalgae protein digestibility: How to crack open the black box? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(20), 7149–7171. https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2181754

9. Williamson, E., Ross, I. L., Wall, B. T., & Hankamer, B. (2024). Microalgae: Potential novel protein for sustainable human nutrition. *Trends in Plant Science,* 29(3), 370–382. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2023.08.006

10. Li, R., Fan, X., Jiang, Y., Wang, R., Guo, R., Zhang, Y., & Fu, S. (2023). From anaerobic digestion to single cell protein synthesis: A promising route beyond biogas utilization. *Water Research*, 243, Article 120417. https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120417

11. Zeng, Y., Chen, E., Zhang, X., Li, D., Wang, Q., & Sun, Y. (2022). Nutritional value and physicochemical characteristics of alternative protein for meat and dairy – A review. *Foods*, 11(21), Article 3326. https://doi.org/10.3390/foods11213326

12. Nunes, E., Odenthal, K., Nunes, N., Fernandes, T., Fernandes, I. A., & Pinheiro de Carvalho, M. A. A. (2024). Protein extracts from microalgae and cyanobacteria biomass: Techno-functional properties and bioactivity: A review. *Algal Research*, 82, Article 103638. https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103638

***Yu. Honchar**, PhD, Associate Professor (Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University);* ***Ya. Vavrysevych**, PhD, Associate Professor (Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies of Lviv);* ***V. Kolodii**, PhD, Senior Lecturer (Kamianets-Podilskyi Ivan Ohiienko National University).*

Comparative analysis of the biological value of alternative plant- and microbiological-based protein sources

***Abstract. Purpose of the study.** The purpose of this study is to conduct a comparative analysis of the biological value of alternative protein sources of plant and microbiological origin, to systematize contemporary approaches to their evaluation, and to identify their advantages, limitations, and prospects for the development of food products with high biological value. **Research methodology.** The research methodology is based on the integrated application of scientific methods, including analysis, synthesis, systematization and generalization of the scientific literature, comparative analysis, the structural-logical method, and scientific generalization to compare contemporary criteria for protein quality assessment. The comparative analysis was performed using indicators of amino acid composition, protein digestibility, bioavailability, the presence of antinutritional factors, and modern integrated criteria for evaluating protein biological value. **Results.** The study systematizes current scientific approaches to assessing the biological value of alternative protein sources and demonstrates the evolution of evaluation criteria from the determination of total protein content to the comprehensive assessment of nutritional quality. The findings indicate that the use of individual indicators alone does not provide an objective comparison of plant and microbiological proteins, whereas their combined application enables a more comprehensive evaluation of protein quality. The analysis revealed that the primary factors limiting the biological value of plant proteins are deficiencies in specific indispensable amino acids and the presence of antinutritional compounds, whereas the biological value of microbiological proteins is largely determined by the efficiency of cell wall disruption and protein extraction technologies. The study further demonstrates that modern processing technologies, including fermentation, enzymatic modification, extrusion, and biotechnological processing, substantially influence protein digestibility and bioavailability regardless of protein origin. Based on the findings, an integrated approach to the comparative evaluation of alternative protein sources is proposed, combining amino acid profile analysis, DIAAS and PDCAAS indices, digestibility, bioavailability, and the effects of technological processing. The results also indicate that the most promising strategy for improving the biological value of food products is the development of combined protein systems in which plant and microbiological proteins complement each other's nutritional limitations. The synthesis of the obtained results made it possible to formulate scientifically grounded recommendations for selecting alternative protein sources according to their nutritional characteristics and intended technological application.*

Conclusions. *The practical significance of the study lies in the potential application of the proposed approach to the development of novel protein ingredients, the optimization of formulations for functional foods, the improvement of processing technologies for alternative protein raw materials, and the scientific substantiation of the selection of plant and microbiological proteins for the production of food products with predictably high biological value.*

Keywords: *alternative protein sources, plant proteins, microbiological proteins, protein biological value, amino acid composition.*

Дата першого надходження статті до видання: 14.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.11.2026