

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ЗАКЛАД
«ЛУГАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА»
ФАКУЛЬТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

КАФЕДРА ПРОФЕСІЙНОЇ ОСВІТИ
РЕСТОРАННОГО І ТУРИСТИЧНОГО БІЗНЕСУ

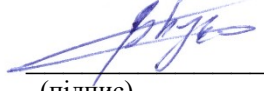
КИСЕЛЬОВ АНДРІЙ АНДРІЙОВИЧ

**ХАРАКТЕРИСТИКА РЯСКИ ЯК НОВОГО ДЖЕРЕЛА РОСЛИННОГО
БІЛКА**

**Кваліфікаційна робота
за спеціальністю 015.37 «Професійна освіта»
освітньо-професійна програма «Аграрне виробництво, переробка
сільськогосподарської продукції та харчові технології»**

Особистий підпис – _____ А. А. Кисельов

Науковий керівник –  _____ к.т.н., доцент, М. В. Луценко
(підпис) (посада, науковий ступінь,
наукове звання, ініціали, прізвище)

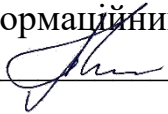
Зав. кафедри –  _____ к.п.н., доцент, В. В. Бурдун
(підпис) (посада, науковий ступінь,
наукове звання, ініціали, прізвище)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ЗАКЛАД
«ЛУГАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА»
ФАКУЛЬТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

КАФЕДРА ПРОФЕСІЙНОЇ ОСВІТИ
РЕСТОРАННОГО І ТУРИСТИЧНОГО БІЗНЕСУ

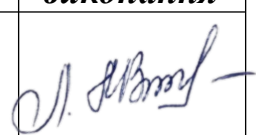
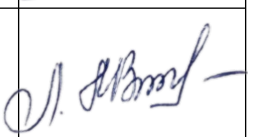
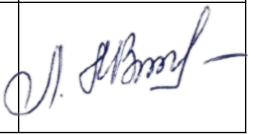
Затверджую:

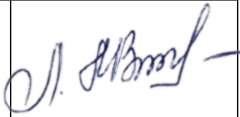
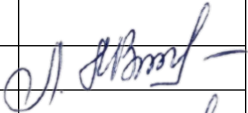
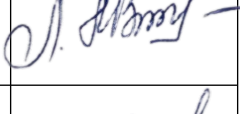
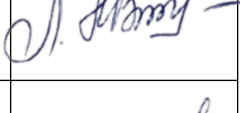
Декан факультету технологій та
інформаційних систем

 Могильний Г.А.

**Індивідуальний план здобувача вищої освіти
щодо виконання кваліфікаційної роботи**

1. Кисельов Андрій Андрійович
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)
2. Факультет технологій та інформаційних систем
3. Спеціальність «Професійна освіта. Аграрне виробництво, переробка сільськогосподарської продукції та харчові технології»
4. Кафедра професійної освіти ресторанного і туристичного бізнесу
5. Науковий керівник Луценко Марина Василівна, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
6. Тема кваліфікаційної роботи
Характеристика ряски як нового джерела рослинного білка
7. Термін подання роботи на кафедру 08.05.2026 р.

<i>№</i>	<i>Заходи</i>	<i>Термін виконання</i>	<i>Відмітка про виконання</i>
1.	Вибір теми кваліфікаційної роботи, вивчення наукової літератури, затвердження теми й керівника.	10.10.2025	
2.	Розробка плану роботи, визначення мети, завдань, об'єкту, предмету, методів дослідження.	14.11.2025	
3.	Робота над теоретичною частиною кваліфікаційної роботи, аналіз літературних джерел.	05.12.2025	

4.	Подання теоретичної частини кваліфікаційної роботи для першого читання науковим керівником.	19.12.2025	
5.	Усунення зауважень, урахування рекомендацій наукового керівника, подання теоретичної частини кваліфікаційної роботи на друге читання.	16.01.2026	
6.	Розробка технологічної і конструкторської частин роботи. Поетапний аналіз та обговорення результатів дослідної роботи.	30.01.2026	
7.	Подання першого варіанта дослідної частини кваліфікаційної роботи на перевірку науковому керівникові.	20.02.2026	
8.	Урахування рекомендацій наукового керівника, збагачення роботи додатковими дослідженнями, проведеними під час практики, підготовка варіанта роботи до попереднього захисту роботи на кафедрі.	06.03.2026	
9.	Попередній захист роботи на кафедрі.	20.03.2026	
10.	Доопрацювання кваліфікаційної роботи з урахуванням рекомендацій після попереднього захисту роботи на кафедрі.	03.04.2026	
11.	Подання кваліфікаційної роботи науковому керівникові та рецензентові на підготовку відгуку й рецензії.	17.04.2026	
12.	Подання на кафедру остаточного варіанта кваліфікаційної роботи, підписаного випускником, науковим керівником і рецензентом.	08.05.2026	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Кисельов А. А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Луценко М. В.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: Характеристика ряски як нового джерела рослинного білка.

Обсяг роботи 123 сторінки, 8 таблиць, 22 рисунків, 115 джерел інформації.

Об'єкт дослідження – водні рослини родини Lemnaceae (ряска) як перспективне альтернативне джерело рослинного білка для використання у харчових технологіях.

Предмет дослідження – ботанічні особливості, умови культивування, хімічний склад, харчова цінність, безпечність, технологічні властивості та перспективи використання ряски у виробництві харчових продуктів.

Мета кваліфікаційної роботи – узагальнення, систематизація та критичний аналіз сучасних наукових даних щодо ботанічних і фізіолого-біохімічних особливостей ряски (Lemnaceae), впливу умов культивування на її ріст та продуктивність, хімічного складу і харчової цінності, а також оцінка токсикологічної, алергенної та мікробіологічної безпечності ряски як перспективного альтернативного джерела рослинного білка. Особливу увагу приділено аналізу можливостей використання ряски у технологіях харчових продуктів, її функціонально-технологічним властивостям, споживчому сприйняттю та економічним аспектам впровадження у харчову промисловість з урахуванням сучасних тенденцій сталого розвитку та продовольчої безпеки.

Методи дослідження – аналіз, систематизація та узагальнення наукової літератури, порівняльний аналіз результатів досліджень, оцінка нормативно-технічної документації та сучасних підходів до культивування й використання ряски у харчових технологіях.

Таким чином, ця робота є актуальним внеском у розробку науково обґрунтованих підходів до переробки ряски.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаної літератури та рецептурного додатку.

Ключові слова: ряска, Lemnaceae, альтернативні джерела білка, рослинний білок, технологічні властивості, безпека

ANNOTATION

Qualification Thesis Topic: Characterization of Duckweed as a Novel Source of Plant Protein.

The thesis comprises 123 pages, 8 tables, 22 figures, and 115 references.

Object of research – aquatic plants of the Lemnaceae family (duckweed) as a promising alternative source of plant protein for application in food technologies.

Subject of research – botanical characteristics, cultivation conditions, chemical composition, nutritional value, safety, technological properties, and prospects for the use of duckweed in food production.

The aim of the qualification thesis is to summarize, systematize, and critically analyze current scientific data regarding the botanical, physiological, and biochemical characteristics of duckweed (Lemnaceae), the influence of cultivation conditions on its growth and productivity, its chemical composition and nutritional value, as well as to evaluate the toxicological, allergenic, and microbiological safety of duckweed as a promising alternative source of plant protein. Particular attention is devoted to the analysis of the potential application of duckweed in food technologies, its functional and technological properties, consumer perception, and economic aspects of its implementation in the food industry in the context of current trends in sustainable development and food security.

Research methods – analysis, systematization, and generalization of scientific literature, comparative analysis of research findings, evaluation of regulatory and technical documentation, and assessment of modern approaches to duckweed cultivation and utilization in food technologies.

Thus, this work represents a relevant contribution to the development of scientifically grounded approaches to duckweed processing.

Structure and scope of the thesis. The qualification thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of references, and a recipe appendix.

Keywords: duckweed, Lemnaceae, alternative protein sources, plant protein, technological properties, safety.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. Загальна характеристика Lemnaceae (Araceae)	10
1.1 Ботанічна характеристика ряски	10
1.2 Системи культивування, збирання та післязбиральна обробка	14
1.3 Вплив абіотичних факторів на ріст водяної ряски	25
1.3.1 Температура	26
1.3.2 Інтенсивність світла та фотоперіод	27
1.3.3 Поживні елементи	28
1.3.4 pH і солоність	28
2. Використання ряски в технологіях харчових продуктів	30
2.1 Хімічні та харчові характеристики ряски	30
2.1.1 Білки та амінокислоти ряски	31
2.1.2 Вуглеводи: крохмаль і харчові волокна ряски	35
2.1.3 Жири та жирні кислоти ряски	38
2.1.4 Мінерали, вітаміни та фітохімічні сполуки ряски	42
2.2 Токсичність та алергенність рослинних білків	44
2.2.1 Токсикологічні ефекти	45
2.2.2 Потенційна алергенність	48
2.3 Хімічна та мікробіологічна безпечність нових альтернативних джерел білку	54
3. Застосування, прийнятність та економічні аспекти переробки ряски	57
3.1 Основні сфери використання водяної ряски	57
3.1.1 Застосування у харчових продуктах та кормах	59
3.1.2 Інші застосування	69
3.2 Сприйняття водяної ряски споживачами	80
3.3 Економічні аспекти використання ряски	89
ВИСНОВКИ	98
БІБЛІОГРАФІЯ	101
РЕЦЕПТУРНИЙ ДОДАТОК	113

ВСТУП

Незважаючи на те, що за останні п'ятдесят років глобальне виробництво сільськогосподарських культур і продукції тваринництва зросло відповідно більш ніж утричі та вчетверо, близько одного мільярда людей усе ще страждають від хронічного голоду. Очікується, що проблема нестачі продовольства буде посилюватися через зростання чисельності населення світу та поступове, хоча й повільне, скорочення доступних сільськогосподарських земель.

Сучасні продовольчі системи значною мірою сприяють виникненню екологічних проблем, таких як викиди парникових газів, вирубування лісів та надмірне використання водних ресурсів. Зокрема, виробництво м'яса – основного глобального джерела білку – має дуже високий екологічний вплив, що робить необхідним розвиток більш стійких альтернативних джерел білку.

Традиційно рослинні білки вважалися менш цінними з харчової точки зору порівняно з тваринними, однак це уявлення швидко змінюється. Зростає інтерес до здоровіших і більш сталих дієт. Рослинні білки, крім того, супроводжуються корисними фітохімічними сполуками, що ускладнює пряме порівняння з тваринними білками. Білковий інгредієнт вважається хорошою альтернативою м'ясу, якщо він містить понад 30 % білку у перерахунку на суху речовину, має низький вміст жиру та амінокислотний профіль, подібний до тваринних білків.

Функціональні властивості білків залежать від їх походження та концентрації. Зокрема, білки з хорошою здатністю зв'язувати воду, емульгувати або утворювати гелі широко використовуються при розробці альтернатив м'ясних продуктів. Найбільш поширеними серед них є: ізоляти білку сої; білкові ізоляти гороху; суміші на основі пшеничного глютену. Білки глютену, що складаються з глютенінів і гліадинів, забезпечують структуру та жувальну текстуру рослинних продуктів, таких як сейтан, наприклад, який використовують для виготовлення бургерів, ковбас та нагетсів. Тофу, отриманий шляхом коагуляції білків сої іонами кальцію, є універсальною альтернативою також і молочним продуктам.

Однак використання глютену має певні обмеження, особливо для людей з алергією або целиацією. Крім того, деякі рослинні білки, наприклад соєві, можуть надавати продуктам гіркого або в'язучого смаку, що знижує їх сенсорну привабливість. З цієї причини стає дедалі актуальнішим пошук нових альтернативних джерел білку, як з харчової, так і з технологічної точки зору.

Альтернативи на основі грибів набувають популярності завдяки їхній подібності до м'яса та риби, низькому екологічному впливу та сприятливому поживному складу. Також активно досліджуються білки, отримані з комах, через їхні відмінні функціональні властивості, такі як: здатність утримувати воду та олію; емульгувальна активність; піноутворювальні властивості. Багато білків, виділених із бобових культур, демонструють здатність утворювати гелі, що є ключовим для формування структури та текстури заміників м'яса. Загалом овочі та бобові є цінним джерелом не лише білків, але й корисних фітохімічних сполук. Дієти, багаті цими продуктами, пов'язані зі зниженням ризику розвитку багатьох хронічних захворювань завдяки наявності біоактивних речовин.

Останніми роками зростає інтерес до малопоширених культур, тобто видів, які культивуються переважно у своїх центрах походження, але залишаються недостатньо використаними у світовому масштабі. Хоча вони часто характеризуються високою поживною, фітохімічною та лікувальною цінністю, їх використання обмежене через агрономічні, економічні або культурні фактори. Водночас їх здатність виживати та розвиватися в екстремальних умовах робить ці рослини стратегічним ресурсом для подолання викликів, пов'язаних зі зміною клімату та зростаючою вразливістю аграрних систем.

Серед нетрадиційних джерел особливу увагу привертають **водні рослини**, зокрема **водяна ряска (duckweed)**, яку все частіше розглядають як справжній «суперфуд». Поширена у багатьох регіонах Азії, ряска характеризується: дуже швидким ростом; відсутністю потреби у сільськогосподарських ґрунтах; високою ефективністю поглинання поживних речовин; високим вмістом білку та харчових волокон. Ряска має повний амінокислотний профіль із усіма незамінними амінокислотами у кількостях, рекомендованих Всесвітньою

організацією охорони здоров'я (ВООЗ), що робить її перспективним альтернативним джерелом білку. Крім того, вона багата на біоактивні пігменти та антиоксиданти, корисні для здоров'я. Дослідження, проведені до цього часу, були зосереджені на культивуванні, хімічному та поживному складі, використанні у кормах, очищенні стічних вод та виробництві біопалива. Нещодавні дослідження акцентують увагу на потенційному застосуванні ряски у харчуванні людини як альтернативи тваринним білкам.

Виходячи з наведеного, **метою цієї роботи** є всебічне вивчення потенціалу ряски як альтернативного та стійкого джерела білку для харчування людини. Будуть проаналізовані ключові аспекти, такі як харчова цінність, технологічні обмеження, виклики при обробці та використанні у харчових продуктах.

Крім того, будуть розглянуті питання безпеки, чинні нормативи та комерційні можливості продуктів із ряскою. Кінцевою метою є надання всебічного огляду сучасного стану досліджень, із визначенням перспектив і проблем, пов'язаних із впровадженням ряски у харчову промисловість, з особливою увагою до виду *Lemna minor*.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОДИНИ LEMNACEAE (ARACEAE)

1.1 Ботанічна характеристика ряски

Ряски належать до родини Lemnaceae і включають 36 видів, що об'єднані у п'ять родів: *Spirodela*, *Landoltia*, *Lemna*, *Wolffiella*, *Wolffia* (Xu et al., 2023). Вони мають фронд – структуру, подібну до листка, з нижньої сторони якого, що безпосередньо контактує з водою, відходить одна або кілька коренів у тих родах, які їх мають. Ця однодольна водна рослина характеризується надзвичайно малими органами та значним зменшенням розмірів, ймовірно, як адаптація до швидкого росту та ефективного поширення. Хоча ряска є квітковою рослиною, основним способом розмноження є вегетативне, що відбувається через брунькування в одній або двох меристематичних зонах у «кишенях» фронду материнської рослини, які зображені на рис. 1.1 (Zuki et al., 2022).

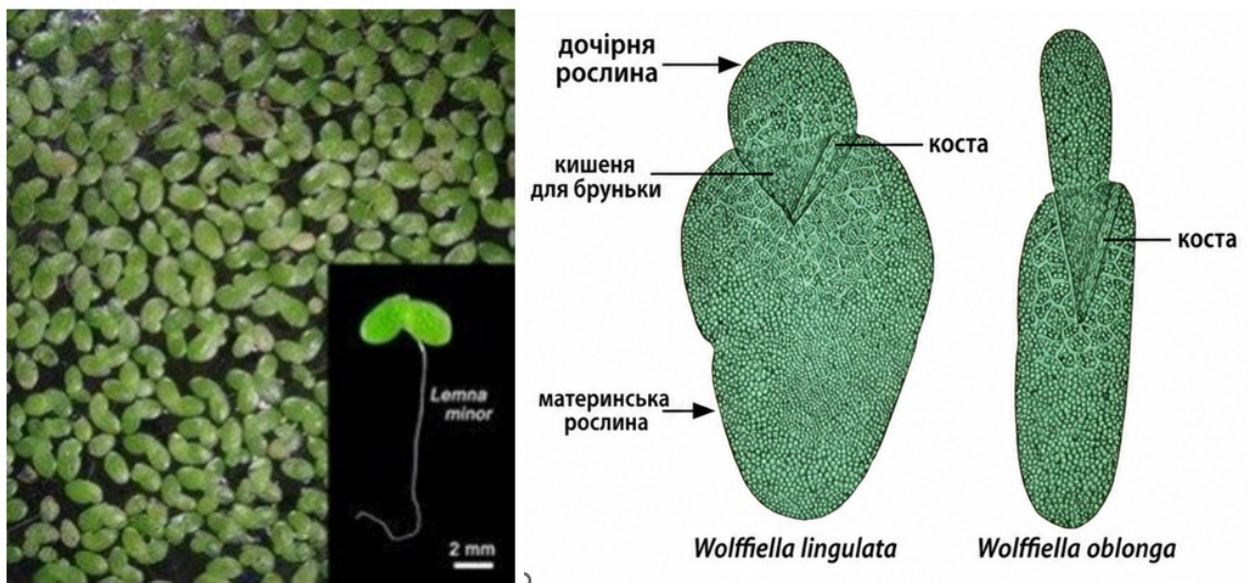


Рисунок 1.1 – Зображення *Lemna minor* (ліворуч) та ілюстрація «кишені брунькування» двох видів *Wolffiella* (праворуч)

У ряски спостерігаються «подвоєння» біомаси за два дні або менше, що забезпечує високий рівень продукції біомаси (Imron et al., 2019); отже, це швидкоростучі рослини, здатні швидко колонізувати нові водні площі. Така

швидка здатність росту є ключовою для освоєння нових водних середовищ та розвитку у природних біотопах. Ряски добре закріпилися як водні рослини, що дозволяє накопичувати біомасу для харчових, промислових та енергетичних застосувань.

Вирощування ряски у міксотрофних умовах, тобто в контрольованих середовищах, де можна регулювати як інтенсивність освітлення, так і концентрацію органічних джерел вуглецю, забезпечує найвищу швидкість росту та продукції біомаси порівняно з іншими умовами. Крім того, спостерігалось значне підвищення поглинання органічного вуглецю та поживних речовин з середовища. Порівняно з фотоавтотрофними та гетеротрофними умовами, швидкість росту при міксотрофії була в 6,22 та 4,98 рази більшою відповідно. Отже, міксотрофія забезпечує більш інтенсивне накопичення біомаси, ніж фотоавтотрофія або гетеротрофія (Sun et al., 2020).

Родина Lemnaceae та Araceae є монофілетичними, тобто походять від спільного предка. Незважаючи на певні переваги включення ряски до родини Araceae, монофілія не зобов'язує цього. Lemnaceae традиційно мають слабе систематичне позиціонування серед Araceae через значні морфологічні відмінності. Родина Araceae характеризується суцвіттям-спадиком та специфічними вегетативними ознаками, тоді як ряска має спрощену морфологію, що ускладнює їхнє об'єднання. Родину Lemnaceae поділяють на дві підродина: Lemnoideae (з коренями у змінній кількості) та Wolffioideae (без коренів), як схематично показано на рис. 1.2 (Nikita et al., 2024).

Види родів *Spirodela*, *Landoltia* та *Lemna* мають різну кількість додаткових коренів із кореневими пучками, що забезпечують стабільність у воді, тоді як поглинання поживних речовин відбувається нижньою частиною фронд. Види родів *Wolffiella* та *Wolffia* повністю позбавлені коренів.

На рис. 1.3 наведено зображення найбільшої ряски (*Spirodela polyrrhiza*, велика ряска) розміром 10–15 мм та найменшої (*Wolffia angusta*, найменша ангіосперма), яка має лише кілька міліметрів у довжину (Edelman et al., 2020).

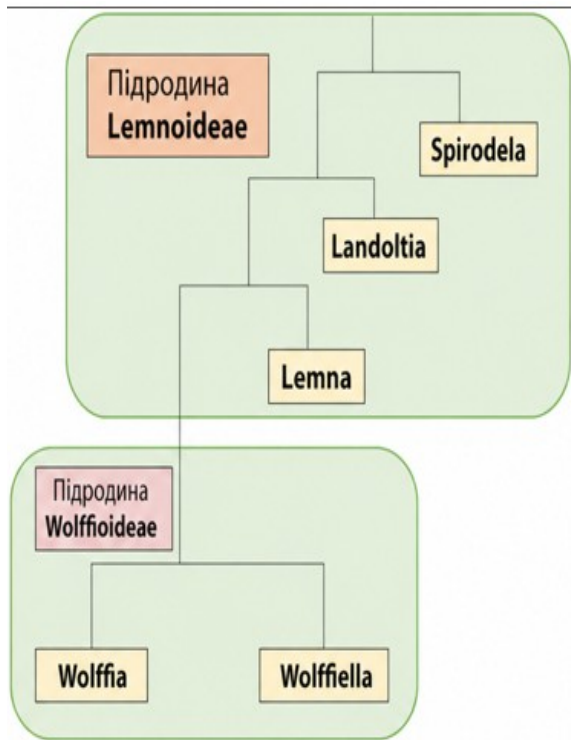


Рисунок 1.2 – Структура родини Lemnaceae з урахуванням родів



Рисунок 1.3 – Порівняння розмірів найбільшої та найменшої ряски

Еволюційний розвиток у родині корелює зі зменшенням морфологічних та анатомічних структур і збільшенням кількості похідних ознак, що вимірюються як «ступінь примітивності», де більшість давніх або базальних видів мають найвищий ступінь примітивності, а похідні види – нижчий. Цікаво, що цей ступінь примітивності негативно корелює з вмістом ДНК на геном (Bog et al., 2019). Важливо зазначити, що ця кореляція існує на рівні роду, але навряд чи виявляється на рівні виду в межах родів, як видно з даних, представлених Wang et al. (2011). Було виявлено, що еволюція розміру геному та морфологічний розвиток мають сильний зв'язок у філогенії родини Lemnaceae. Рід *Spirodela*, який є найпримітивнішим, має найменший геном порівняно з *Wolffia*, який є найбільш розвиненим і має найбільший розмір геному. Це вказує на те, що розмір геному корелює з морфологічним зменшенням, переважно над складністю організму, як видно на рис. 1.4 (Xu et al., 2023).

Види родів *Lemna*, *Spirodela* та *Landoltia* мають латерально розташовані

вегетативні оболонки, з яких дочірні листки можуть проростати з батьківської листки; вони мають мало або багато коренів, вегетативний мішечок, одну судинну систему та квіткову порожнину, в якій розвиваються квіткові тканини.

З іншого боку, види родів *Wolffiella* та *Wolffia* мають один вегетативний мішечок (рис. 1.5), не мають коренів, одну квіткову порожнину, яка відкривається до дорсальної поверхні листка, та не мають судинної системи (Zuki et al., 2022, Nikita et al., 2024).

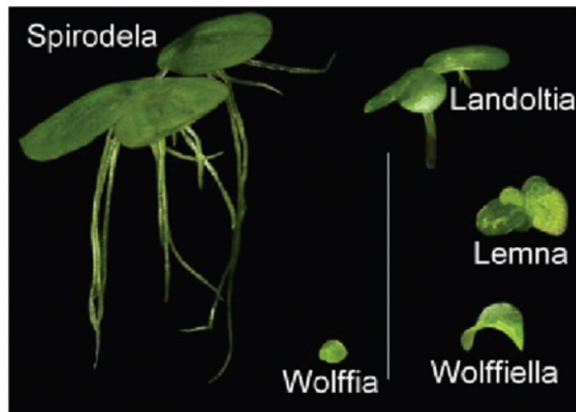


Рисунок 1.4 – Еволюційний розвиток Lemnaceae відносно родів (біла смуга 1 см)



Рисунок 1.5 – *Wolffia microscopica* з Індії: плаваючий вид зверху та вид збоку з підсвічуванням

На рис. 1.6 та 1.7 показано фотографії ряски.

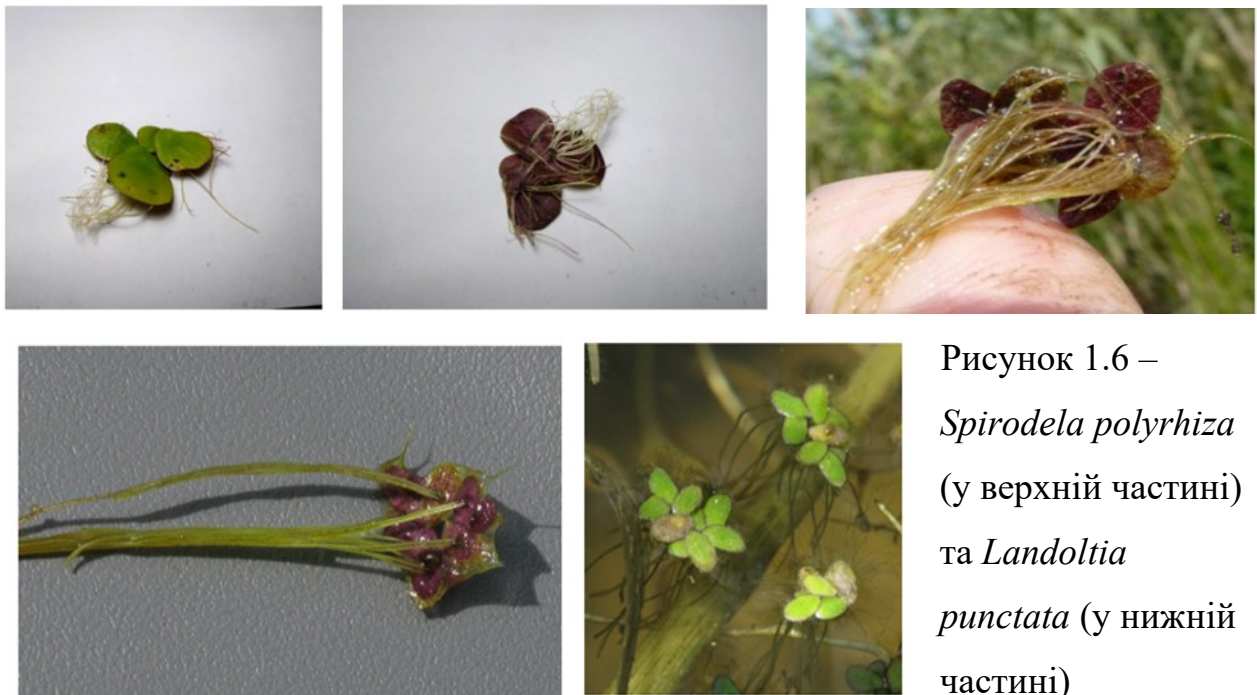


Рисунок 1.6 –
Spirodela polyrrhiza
(у верхній частині)
та *Landoltia*
punctata (у нижній
частині)



Рисунок 1.7 – *Lemna gibba* (ліворуч) та *Lemna minor* (праворуч на міліметровому папері)

Ряска характеризується надзвичайно швидким ростом, високим вмістом білку або крохмалю залежно від умов культивування та здатністю до вирощування в різних трофічних режимах, що робить її перспективною біотехнологічною культурою (Edelman et al., 2020). Через обмежену морфологічну диференціацію видів і клонів ряски для їх точної ідентифікації та відбору комерційно цінних штамів застосовують молекулярно-таксономічні методи, оскільки фізіологічні властивості є клон-специфічними (Sree et al., 2015a; Sree et al., 2015b; Ziegler et al., 2015; Kuehdorf et al., 2014; Appenroth et al., 2018; Ma et al., 2018; Bog et al., 2019).

1.2 Системи культивування, збирання та післязбиральна обробка

Культивування ряски еволюціонувало від традиційного вирощування у відкритих ставках до використання лабораторних методик, біореакторів і систем на основі стічних вод, що зумовлено потребою у більш ефективному та сталому виробництві біомаси. Відкриті ставки залишаються економічно вигідними та придатними для масштабного вирощування, однак їх продуктивність залежить від природних факторів і ризику забруднення, тоді як сучасні підходи, зокрема попередня аерація води та використання поліпропіленових підтримок, сприяють підвищенню темпів росту, накопичення біомаси та поглинання поживних речовин (рис. 1.8) (Zhao et al., 2024).

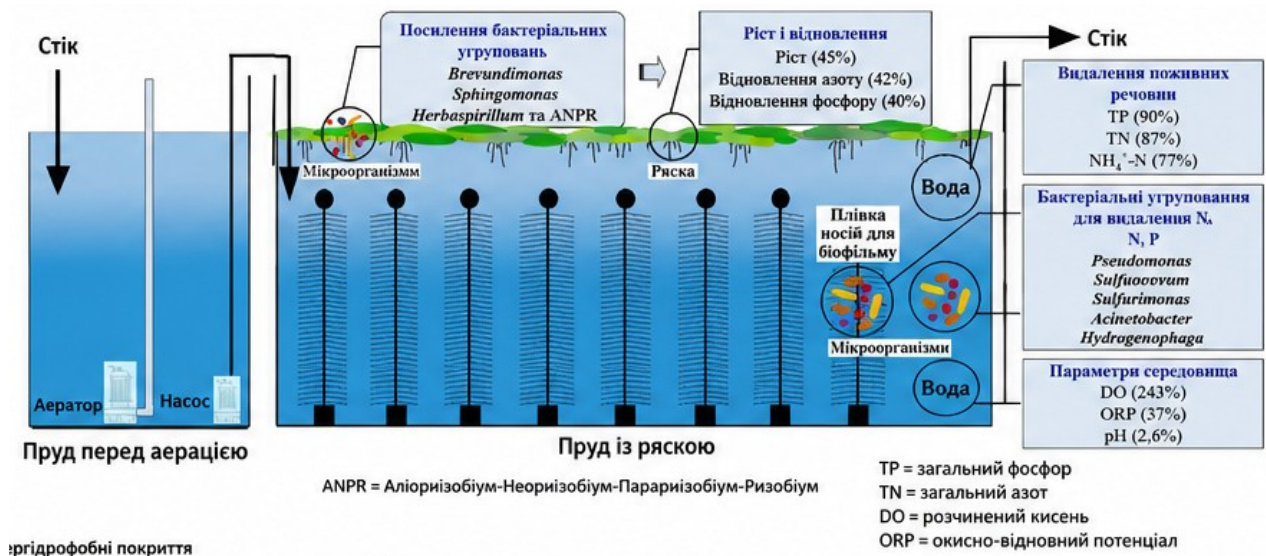


Рисунок 1.8 – Схема системи вирощування ряски у відкритих ставках з попередньою аерацією та підтримками з поліпропілену

Впровадження попередньої аерації є перспективною стратегією для підвищення ефективності вирощування ряски у відкритих ставках, оскільки цей метод ефективно усуває обмеження традиційних сільськогосподарських практик. Такий підхід не лише прискорює ріст ряски, але й створює потенційні переваги для подальшого використання біомаси. Зі збільшенням попиту на стійкі біоресурси, впровадження подібних інноваційних стратегій є ключовим для розвитку більш ефективних практик культивування ряски. Системи відкритих ставків є за своєю природою масштабованими завдяки простоті конструкції та низькій вартості, що робить їх придатними для операцій великого масштабу. Водночас застосування методів попередньої аерації та встановлення еластичних підтримок може ускладнити інфраструктуру та потребувати додаткових ресурсів. Зі збільшенням масштабу підтримання стабільних умов росту та зменшення ризиків забруднення стає більш складним завданням. Відкриті ставки залишаються економічно вигідним рішенням для вирощування ряски, оскільки витрати на установку та експлуатацію є низькими. Інтеграція попередньої аерації та еластичних підтримок може підвищити продуктивність, що виправдовує початкові інвестиції. Довгострокова економічна стійкість цих передових технологій залежить від співвідношення між підвищенням темпів росту та

витратами на впровадження і обслуговування. Коли вигоди від збільшення продуктивності перевищують витрати, ці інновації забезпечують практичний шлях до більш ефективного та сталого промислового вирощування ряски (Ujong et al., 2024).

У лабораторних умовах можна дуже точно регулювати параметри навколишнього середовища, такі як інтенсивність освітлення, температура, вологість та концентрації поживних речовин. Порівняно з природними умовами, ряска, вирощена у лабораторії, демонструє підвищений вміст амінокислот, включно з лізином, аргініном, валіном, лейцином, аспарагіноювою кислотою, глутаміноювою кислотою та аланіном, неволокнистих вуглеводів, таких як прості цукри, крохмаль та розчинна клітковина, а також мінералів, зокрема кальцію та натрію. Вибір відповідного поживного середовища є надзвичайно важливим, оскільки воно забезпечує рослину необхідними поживними речовинами для оптимального росту. Найбільш поширеними є такі середовища: середовище Шенк-Гільдебрандт, середовище Гутнера, середовище Мурашіге-Скоог та середовище Хогланд, при цьому середовище Хогланд найчастіше використовується в літературі для культивування ряски. Основними обмеженнями при переході від лабораторного вирощування до масштабного виробництва є вартість та доступність високоякісних поживних середовищ, що потенційно може впливати на економічну доцільність промислового культивування ряски.

Вміст білку в рясці може значно змінюватися залежно від вибору поживного середовища. При розгляді середовища Хогланд, за оптимальних умов, що включають 3,92 мілімолярів KH_2PO_4 , 7,95 мілімолярів $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ та pH 7,22, вміст білку в рясці перевищує 51%, тоді як у випадку комерційного середовища Хогланд він становить близько 40% (Akyüz and Ersus, 2024). Лабораторні дослідження на окремих рослинах ряски, таких як *Wolffia arrhiza* та *Lemna minor*, показали, що інтеграція мінеральних поживних субстратів із органічними компонентами, такими як вуглеводи, вітаміни та амінокислоти, суттєво підвищувала виробництво біомаси (6,64–8,93 грами), вміст білку (22,1–

32,5%) та швидкість росту. Таким чином, посилення поживного середовища органічними нутрієнтами може покращити як врожайність, так і харчову цінність ряски. Оптимізація поживних середовищ також може бути спрямована на специфічні застосування. Наприклад, вирощування ряски в розбавленому середовищі Хогланд із додаванням унікозолу (триазольна сполука, що використовується як ретардант росту рослин) підвищувало накопичення крохмалю, роблячи біомасу більш придатною для ферментації у виробництві біоетанолу. Проблемою лабораторних культур ряски є обмежена площа поверхні росту, що може зменшувати ефективність поглинання світла порівняно з природними умовами (див. рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – Ріст ряски, вирощеної в розчині Хогланд

Одним із рішень цієї проблеми на лабораторному рівні є використання акрилових листів, покритих суперводовідштовхувальним матеріалом (SHP), наприклад, бджолиним воском; принципова схема показана на рис. 1.10 у двох версіях – із сіткою з алюмінію та без неї (Chua et al., 2023).

У середовищах з SHP відносна швидкість росту була більш ніж удвічі вищою порівняно з умовами без SHP, а зібрана ряска мала підвищений вміст білків, вуглеводів та ліпідів. Це свідчить про те, що покриття SHP не лише збільшують площу для росту, але й покращують виробництво біомаси, зберігаючи біохімічний склад. Інтеграція SHP-покриттів у платформи для

культивування пропонує перспективну стратегію оптимізації лабораторного вирощування ряски. Застосування оптимізованих підтримок і SHP-покриттів у лабораторних умовах обіцяє масштабування на промисловий рівень, хоча це пов'язане з певними труднощами, такими як підтримання сталих умов навколишнього середовища та розробка складних систем подачі поживних речовин.

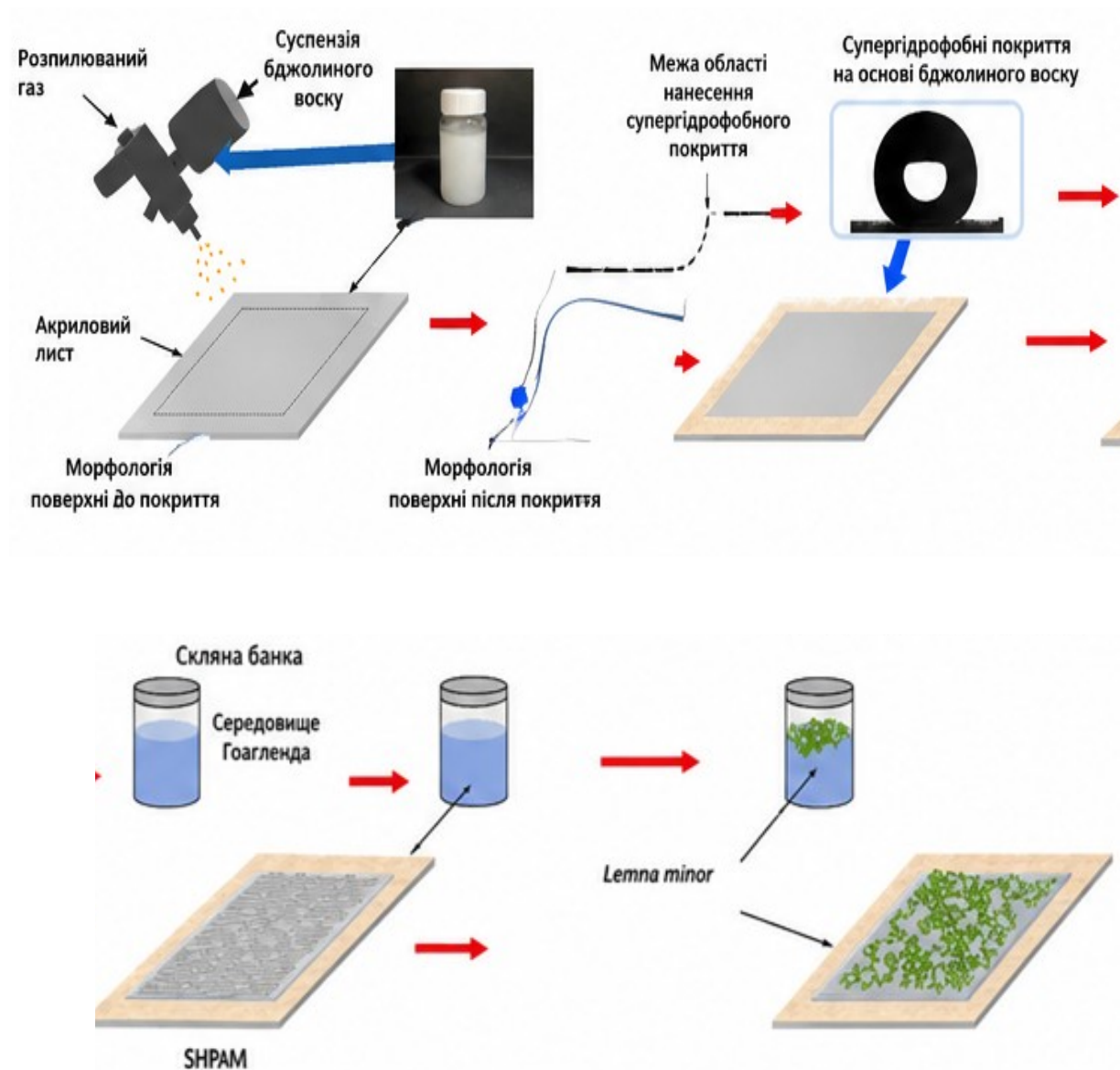


Рисунок 1.10 – Схема підготовки суперводовідштовхувального покриття (SHPAM із сіткою з алюмінію, SHPA без сітки з алюмінію)

З економічної точки зору, передові підтримки та SHP-покриття можуть значно підвищити продуктивність біомаси та харчову цінність за рахунок вищих початкових витрат. Водночас їх потенціал для збільшення врожайності може компенсувати ці витрати у довгостроковій перспективі. Загальна економічна

доцільність у підсумку буде залежати від витрат на масштабування цих методів і від ринкового попиту на продукти з ряски з високим вмістом білку та великою біомасою. Цей попит відіграватиме ключову роль у визначенні економічної ефективності передових технологій вирощування ряски для комерційних застосувань (Ujong et al., 2024).

Біореактори для ряски складаються, по суті, з багаторівневої системи сталевих лотків (зазвичай чотирьох), у яких циркулює поживне середовище за допомогою системи гравітаційного потоку, підтримуваного насосом, розташованим у збірному резервуарі, як показано схематично на рис. 1.11.

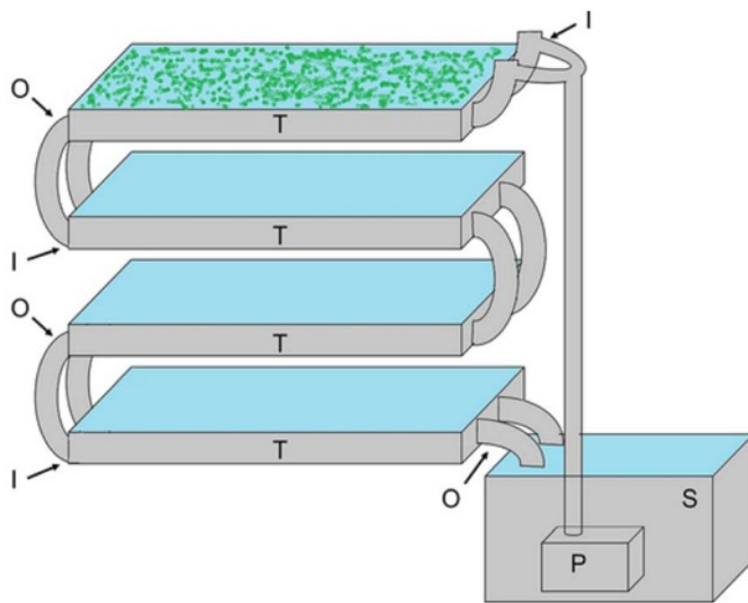


Рисунок 1.11 – Схема багаторівневого біореактора для ряски:

S – резервуар;

P – насос;

T – сталеві лотки;

I та O – входи/виходи лотків

Цей дизайн також включає регульоване світлодіодне (LED) освітлення для оптимізації умов росту. Оптимальні темпи росту спостерігалися за певних умов потоку, таких як витрата 1,5 літра за хвилину та глибина води 5 сантиметрів. Більші витрати, до 2,5 літра за хвилину при тій же глибині води, мінімізують застійні зони та поверхневі канали, покращуючи розподіл поживних речовин. Геометрія лотка також відіграє важливу роль у продуктивності біореактора; зокрема, кількість і розташування “входів” та “виходів” покращує гідродинамічні параметри та ефективність перенесення поживних речовин (конфігурація з трьома входами та виходами виявилася найбільш ефективною).

Ще одним значущим фактором, що впливає на ріст ряски, є щільність інокуляції, тобто відсоток покриття доступної для росту поверхні. Біореактори з

високою щільністю інокуляції (80% покриття поверхні) показали низьку врожайність біомаси, тоді як ті, що мали низьку щільність інокуляції (20% покриття поверхні), демонстрували вищу врожайність біомаси. Щільність інокуляції також впливає на поживні властивості ряски; наприклад, для *Lemna gibba* високу врожайність крохмалю (1,20 г/м² на день) отримано при низькій щільності інокуляції (20%). Навпаки, найвищий рівень врожайності білку для *Lemna gibba* спостерігався при помірній щільності інокуляції. Насправді, при покритті 60% поверхні отримано 2,24 г/м² на день порівняно з 1,90 г/м² на день при щільності інокуляції 20%. Це свідчить про те, що низькі щільності сприяють більш високій врожайності біомаси та крохмалю, тоді як помірні щільності є оптимальними для виробництва білку. Також видалення сполук азоту та фосфору, а також сульфатів залежить від щільності інокуляції, причому вищі темпи видалення (понад 86%) спостерігалися в біореакторах з щільністю інокуляції 20%. Ці результати підкреслюють потенціал біореакторних систем для оптимізації вирощування ряски шляхом налаштування умов навколишнього середовища, щільності інокуляції та видалення поживних речовин, роблячи їх перспективним підходом для стійкого виробництва біомаси та продуктів на її основі.

Перехід від відкритих ставок до біореакторів дозволяє більш контрольоване та масштабоване вирощування ряски. Біореактори забезпечують точний контроль умов навколишнього середовища, таких як рівні поживних речовин, витрати потоку та щільність інокуляції, що робить можливим збільшення масштабу від лабораторного рівня до пілотного та потенційно промислового. Можливість налаштування цих параметрів важлива для підтримання оптимальних умов росту та максимізації продуктивності у великому масштабі.

З точки зору економічної стійкості, зрозуміло, що біореактори мають вищі витрати на будівництво порівняно з відкритими ставками. Також витрати на експлуатацію вищі, оскільки необхідна енергія для підтримання потоків та

контролю умов навколишнього середовища. З іншого боку, системи біореакторів мають безперечні переваги, такі як:

- зменшення ризику забруднення;
- кращий розподіл та використання поживних речовин;
- покращене видалення забруднювачів.

Ці переваги можуть забезпечити економію загальних витрат та підвищити довгострокову рентабельність, особливо якщо враховувати потенційну ринкову цінність високоякісних продуктів ряски та екологічні вигоди від ефективного управління поживними речовинами та забруднювачами (Ujong et al., 2024).

Вирощування ряски із використанням різних потоків стічних вод стало перспективною стратегією для стійкого виробництва біомаси та управління відходами. Зазвичай використовувані стічні потоки включають: тваринний гній, харчові відходи, стічні води з сільськогосподарських та промислових процесів, як узагальнено на рис. 1.12.

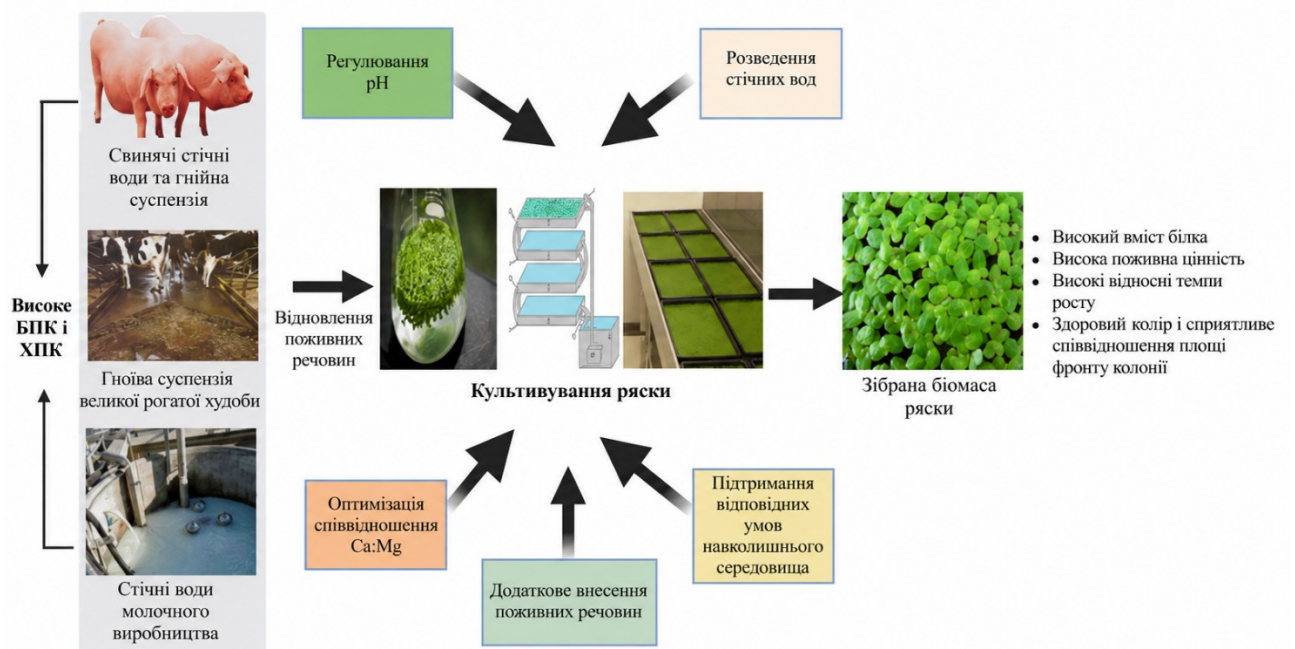


Рисунок 1.12 – Схема вирощування ряски із використанням потоків стічних вод

Дослідження показали, що різні види ряски мають різні рівні толерантності до цих потоків відходів. Наприклад, повідомлялося, що *Lemna gibba* ефективніше переносить стоки зі свинячих лагун у порівнянні з *Landoltia*

punctata, *Lemna minor* та *Lemna obscura*, зберігаючи здоровіші листові пластинки та вищий вміст білку. Використання потоків стічних вод для вирощування ряски не лише сприяє переробці поживних речовин та управлінню відходами, але й забезпечує виробництво високоякісної біомаси, яка може слугувати стійким джерелом білку. Це робить вирощування ряски з використанням стічних вод універсальним підходом, який одночасно вирішує екологічні та сільськогосподарські проблеми.

Ряска (*Lemna minor*), вирощена із додаванням свинячого гною, може ефективно рости, демонструючи високий вміст білку понад 40%, вміст золи близько 23% та вміст сирової клітковини трохи понад 8% (усі значення наведені відносно сухої маси) при концентрації гною 1,50%. Проте підтримання оптимальних умов навколишнього середовища, таких як рН, загальна кількість розчинених твердих речовин, електропровідність, солоність та температура, є критично важливим для досягнення максимальної швидкості росту та продуктивності у свинячих стоках (Sonta et al., 2023).

Слід зазначити, що вирощування ряски у стоках з високою концентрацією може пригнічувати її ріст. З цієї причини необхідні попередні обробки стічних вод для запобігання фітотоксичним ефектам. Такі попередні обробки можуть включати просте розведення, хімічне осадження, аерацію, фільтрацію через мембрани та регулювання рН. Також важливе співвідношення поживних речовин для полегшення росту ряски. Наприклад, дисбаланс, який сприяє магнію порівняно з кальцієм, може значно знизити швидкість росту *Lemna minor*. Натомість регулювання цього співвідношення на користь кальцію шляхом додавання сульфату кальцію може призвести до покращення відносного темпу росту. Walsh et al. (2020) вказують, що співвідношення Ca:Mg не менше ніж 1:1,6 необхідне для росту *L. minor*. Ці результати свідчать про те, що моніторинг і оптимізація співвідношення кальцію у системах вирощування ряски може максимізувати швидкість росту та підвищити ефективність видалення поживних речовин. Ряска, вирощена у потоках стічних вод, виробляє біомасу, багату на

поживні речовини, яка може використовуватися для різних біоафінерійних продуктів, таких як біогідроген, біогаз та біоолія.

Також слід досліджувати інші можливі застосування, зокрема використання ряски у харчовій промисловості. Очевидно, що ризики для безпеки харчових продуктів, пов'язані з потенційним забрудненням, вимагатимуть додаткової попередньої обробки для забезпечення безпечного використання продукту. Використання потоків стічних вод для вирощування ряски є масштабованою стратегією, особливо коли використовуються великі обсяги доступних відходів. Проте збільшення масштабу потребує ефективної підготовки та обробки стоків для вирішення проблем, таких як високі органічні навантаження та потенційне забруднення. Впровадження методів попередньої обробки та управління параметрами навколишнього середовища є критично важливими для успіху операцій у великому масштабі. Використання ресурсів відходів також може знизити витрати на інгредієнти та надати подвійні переваги: управління відходами та виробництво біомаси. Економічність цього підходу залежить від ефективності процесів обробки стічних вод та балансу між витратами на управління відходами і вартістю виробленої біомаси.

Оптимізація методів розведення та підготовки стоків у поєднанні з високою ефективністю видалення поживних речовин може суттєво підвищити економічну доцільність цієї стратегії стійкого вирощування. Частота збору та співвідношення між зібраною біомасою та наявною біомасою є ключовими змінними у продуктивному управлінні ряскою. Експериментальні дані (Chikuvire et al., 2018) показують, що режим збору раз на два тижні забезпечує вищу врожайність порівняно зі збором двічі на тиждень, як за свіжою біомасою (533 г/м² проти 402 г/м²), так і за щоденним темпом росту (1,084 г/м²/день проти 0,803 г/м²/день). Більш тривалі інтервали збору, наприклад кожні 20 днів, також забезпечують більші загальні кількості біомаси (близько 1248 г/м² свіжої маси та 48 г/м² сухої маси), значно перевищуючи врожайність при зборі кожні 5 або 10 днів. Коротші інтервали збору (2, 4 або 6 днів) виявилися більш ефективними для оптимізації щоденних темпів росту, з показниками понад 6,4 г/м²/день, порівняно

з інтервалом 8 днів (5,95 г/м²/день). Ці відмінності свідчать про те, що частота збору має налаштовуватися відповідно до кінцевої мети: частіший збір ідеально підходить для прискорення росту, тоді як рідкіший збір сприяє накопиченню загальної біомаси. Також харчовий склад біомаси, зокрема вміст білку, залежить від частоти збору. Найвищий показник (39,50 %) був зафіксований при інтервалі збору у 20 днів, тоді як більш часті збори (від 2 до 15 днів) показали дещо нижчий вміст білку (в межах 33 %–36 %). Інтервал збору у 8 днів виявився особливо збалансованим, забезпечуючи компроміс між продуктивністю та харчовою якістю (36,30 % вмісту білку). Спостережувані варіації можуть бути обумовлені такими факторами, як вид ряски, генетична мінливість та умови навколишнього середовища. Отже, визначення оптимальної стратегії збору залежить від кінцевої мети виробництва: максимізація швидкості росту, врожайності біомаси або харчової якості культури.

Умови зберігання є критично важливим фактором для стабільності якості та терміну придатності біомаси ряски. Високі температури (25 °C) призводять до швидкої втрати маси протягом кількох днів, тоді як нижчі температури (від 4 °C до 10 °C) дозволяють дещо продовжити зберігання, до 5 днів. Проте свіжа біомаса, що характеризується високим вмістом вологи, особливо схильна до висихання, що проявляється візуальними та органолептичними змінами, такими як каламутність води, потемніння кольору та поява неприємних запахів. Тому є надзвичайно важливим застосування ефективних стратегій контролю вологості, з особливою увагою до регулювання температури та відносної вологості, щоб запобігти псуванню та зберегти якість біомаси під час зберігання.

Процес попередньої обробки ряски є фундаментальним для забезпечення якості та стабільності біомаси, призначеної для харчових і промислових застосувань. Він починається зі збору здорової та зрілої біомаси, після чого проводиться етап очищення та подальшого висушування, необхідного для зниження високого вмісту вологи (близько 95 %) і покращення зберігання. Серед оцінених методів сушіння виділяють сонячне сушіння, сушіння в мікрохвильовій печі, заморожування та сушка під вакуумом, а також сушіння в тіні, кожен із яких

має специфічні переваги, пов'язані з остаточною вмістом вологи та якістю продукту. Окрім продовження терміну придатності, сушіння полегшує екстракцію біоактивних сполук, зокрема білків. Дослідження показали, що помірні температури (50–60 °C протягом 4–6 годин) забезпечують кращу збереженість функціональних сполук у порівнянні з інтенсивними термічними обробками. Зокрема, високопотужне мікрохвильове сушіння (900 Вт) виявилось ефективним у підтриманні якісних характеристик при зменшених енергетичних витратах. Бланшування (100 °C протягом 3 хвилин), особливо у поєднанні з сонячним сушінням, корисне для підвищення безпеки харчового продукту та збільшення доступності поживних речовин за рахунок руйнування клітинних мембран. Після цього біомаса може бути подрібнена для збільшення площі поверхні екстракції та оптимізації подальших процесів.

Кінцевий хімічний склад ряски суттєво залежить від типу попередньої обробки. Серед проаналізованих методів механічне подрібнення показало найкращі результати за показниками екстракції білку (близько 42 % сирого білку) та вмісту фенольних сполук (понад 190 мг еквіваленту галової кислоти на грам), перевершуючи варіння та цикли заморожування та розморожування.

Ці результати свідчать про те, що ретельний вибір і оптимізація методів попередньої обробки можуть суттєво покращити харчову та функціональну цінність біомаси, відкриваючи нові перспективи для розробки функціональних інгредієнтів, харчових добавок та високоякісних продуктів у рамках біоерафінерії на основі ряски (Ujong et al., 2024).

1.3 Вплив абіотичних факторів на ріст ряски

У цьому розділі буде коротко розглянуто вплив температури, інтенсивності освітлення, доступності поживних речовин, рН та солоності, тобто сукупності абіотичних факторів, на ріст ряски з особливим акцентом на виробництво біомаси, швидкість видалення поживних речовин та біохімічний склад (Ujong et al., 2024).

1.3.1 Температура

У природному середовищі температура для росту ряски коливається від 6 до 33 °C, хоча найбільш сприятливі температури води знаходяться в межах від 19 до 30 °C. Оптимальні температури для досягнення максимальних темпів росту також залежать від виду. Наприклад, для *Landoltia punctata* оптимальна температура становить 25 °C (4,2 г/м² на день), а для *Lemna minor* – 20 °C (3,9 г/м² на день). У змішаних культурах цих двох видів ріст узгоджується з ростом *Landoltia punctata* при 25 °C, що підкреслює важливість адаптації систем вирощування до специфічних температурних вимог різних видів ряски.

Температура також суттєво впливає на ефективність виробництва білку ряскою. Наукові дані свідчать, що нижчі температури води, від 12 до 21 °C, забезпечують високий вміст сирого білку (близько 36 %) у біомасі ряски. У той же час при вищих температурах, від 25 до 31 °C, вміст білку знижується до приблизно 20–22 %. Температура впливає і на накопичення крохмалю в рясці. Зі збільшенням температури води вміст крохмалю зменшується. Наприклад, при температурі 5 °C накопичення крохмалю становить близько 26–27 %. Ці дані підкреслюють важливість підтримки температури води для культивування ряски в межах 12–21 °C, щоб максимізувати врожайність білку та крохмалю. Це дозволяє оптимізувати вирощування як для харчових, так і для біоенергетичних цілей.

Видалення фосфору з стічних вод також залежить від температури. Протягом чотирьох днів при низькій температурі (8 °C) ряска видаляє більше половини наявного фосфору. Водночас майже повне видалення спостерігається при температурі води 25 °C.

Ці результати демонструють чіткий зв'язок між коливаннями температури та фізіологічними реакціями ряски. Отже, розуміння цієї взаємозалежності є надзвичайно важливим для оптимізації умов росту та ефективності видалення поживних речовин.

1.3.2 Інтенсивність освітлення та фотоперіод

Різні види ряски демонструють різну реакцію на інтенсивність освітлення (низьку, середню та високу) та фотоперіод. При інтенсивності освітлення

105 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ та циклі світло-темрява 12 годин (фотоперіод) ряска досягла вмісту білку на рівні 32 %, із середньодобовим врожаєм 0,9 кг у свіжій масі.

Вміст білку та накопичення крохмалю у рясці залежать не лише від інтенсивності освітлення (кількості світла), але й від його спектрального складу (якості світла). Наприклад, вплив червоного світла світлодіодів на *Wolffia arrhiza* значно підвищив її вміст білку – від 10 % у природному середовищі до понад 41 % за умов червоного освітлення. Інші дослідження підтверджують, що збільшення інтенсивності освітлення підвищує вміст білку та відносний темп росту, одночасно знижуючи вміст хлорофілу. Також спостерігається збільшення вмісту крохмалю зі зростанням інтенсивності освітлення. Наприклад, при зміні освітленості від 2000 до 5000 люкс в *Landoltia punctata* та *Lemna minor* вміст крохмалю збільшився в 1,6–2,2 рази. Ці результати свідчать про те, що оптимізація інтенсивності освітлення може підвищити синтез білку та крохмалю, тим самим збільшуючи загальну харчову цінність ряски як джерела їжі або корму. Водночас необхідно враховувати, що надмірна інтенсивність світла може призвести до насичення та фотопригнічення, що викликає значне зниження вмісту хлорофілу та ушкодження через оксидативний стрес. Отже, хоча висока інтенсивність світла позитивно впливає на ріст ряски та її біохімічний склад, потрібне уважне регулювання для уникнення негативних ефектів. Світло також впливає на швидкість видалення поживних речовин, відносний темп росту та виробництво біомаси ряскою.

Важливо зазначити, що відповідь ряски на інтенсивність світла залежить від виду, концентрації поживних речовин та температури. Наприклад, було встановлено, що комбінація низької освітленості (7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) та високих рівнів поживних речовин (100 мг азоту на літр) має взаємодіючий ефект на баланс вуглецю та азоту у рясці, що призводить до зниження виробництва біомаси. Це відкриття підкреслює необхідність балансування екологічних змінних при оцінці реакцій росту на умови освітлення для оптимізації виробництва біомаси.

1.3.3 Поживні елементи

Ріст ряски тісно пов'язаний із вмістом поживних речовин у її субстраті вирощування, зокрема азоту та фосфору, які відіграють ключову роль у її фізіологічних процесах. Чутливість ряски до доступності поживних речовин проявляється в її морфології та у змінах, що виникають у разі їх нестачі. З прикладів, наведених у науковій літературі, випливає, що ретельна оптимізація концентрації поживних речовин у середовищі вирощування може мати значний вплив як на ріст, так і на вміст білку в рясці. Балансування рівнів цих поживних речовин є необхідним для максимізації поживної цінності та продуктивності ряски в системах культивування. Високі концентрації азоту і фосфору ($N = 34,5$ мг/л і $P = 15$ мг/л) сприяють темпам росту *Landoltia punctata*; коли вміст поживних речовин знижується нижче цих значень, ріст значно сповільнюється. Водночас слід зазначити, що зменшення концентрації азоту та фосфору призводить до суттєвого підвищення вмісту крохмалю (у 5,6 раза у *Landoltia punctata* та у 9,9 раза у *Lemna minor*). Різні джерела азоту також по-різному впливають на ріст і біохімічний склад ряски.

Ці результати свідчать про те, що вибір найбільш відповідних джерел азоту може бути стратегічним підходом для регулювання біохімічного складу ряски з метою досягнення конкретних цілей, наприклад максимізації вмісту білку або підвищення вмісту каротиноїдів.

1.3.4 рН і солоність

Ряска демонструє значну здатність до адаптації в широкому діапазоні значень рН, з оптимальним інтервалом від 6,5 до 8. У більшості випадків ряска може переносити низькі значення рН до 5,0 або навіть нижче, за умови, що такі умови зберігаються лише протягом короткого періоду часу. Згідно з результатами досліджень, найвищі темпи росту спостерігаються при рН 7 (90 г/м² на добу), тоді як найнижчі – при рН 4 (40 г/м² на добу). Такі відмінності можуть бути зумовлені різними видами або штамми ряски, кожен із яких має специфічні переваги щодо рівня рН та фізіологічні адаптації. Крім того, екологічні чинники, такі як температура, інтенсивність світла та доступність

поживних речовин, можуть взаємодіяти зі значеннями рН і таким чином впливати на швидкість росту ряски. Рівень рН також суттєво впливає на біохімічний склад ряски, включаючи вміст білків, ліпідів, вуглеводів і мінеральних речовин. Оптимальний вміст поживних речовин зазвичай спостерігається при рН 7–8, тоді як як кислі умови (рН 4–5), так і лужні (рН 9–10) негативно впливають на їхній вміст. Наприклад, вміст білку різко знижується при рН 4, тоді як при рН 7–8 він досягає максимального значення – 31 г на 100 г сухої маси. Натомість ліпідна фракція збільшується при рН 9–10 і залишається низькою в кислих умовах. Вміст вуглеводів зростає зі збільшенням рН, досягаючи максимуму понад 59 г на 100 г сухої маси при рН 10.

Ці результати свідчать про те, що регулювання рівня рН у системах культивування ряски може оптимізувати вміст поживних речовин, тим самим підвищуючи ефективність її використання для різних практичних застосувань.

Ряска також добре пристосовується до середовищ із солонуватою водою. Солоність вимірюється через електричну провідність і відображає концентрацію розчинених у воді солей (іонів, таких як натрій, хлорид, сульфат, магній і кальцій). Оптимальний діапазон електричної провідності для культивування ряски в стічних водах визначено в межах 600–1400 мСм·см⁻¹. Поза цим діапазоном показники росту та швидкість видалення забруднювачів, як правило, різко знижуються.

Слід зазначити, що вплив солоності на біохімічний склад ряски досліджений недостатньо. Тому необхідні подальші дослідження для кращого розуміння специфічного впливу солоності на біохімічний склад різних видів ряски та для підтвердження ефективності таких умов солоності в ширшому спектрі практичних застосувань.

РОЗДІЛ 2. ВИКОРСИТАННЯ РЯСКИ В ТЕХНОЛОГІЯХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

2.1 Хімічні та харчові характеристики ряски

Споживання *khai-nam*, що в перекладі з тайської мови означає «водяні яйця», як потенційного недорогого джерела білку для харчування людини відоме вже давно, що підтверджується статтею Бгантхумнавіна та Макгаррі, опублікованою в журналі *Nature* у 1971 році. У цьому дослідженні автори ідентифікували відповідний організм як *Wolffia arrhiza* – вид ряски з дуже високою швидкістю росту (тривалість генерації становить приблизно 3–4 доби).

Наведені нижче результати ґрунтуються на дослідженні, проведеному для шести різних видів, які представляють п'ять родів родини ряскових. До досліджуваних видів належать: *Spirodela polyrhiza*, *Landoltia punctata*, *Lemna gibba*, *Lemna minor*, *Wolffiella hyalina* та *Wolffia microscopica* (Appenroth et al., 2017). У дослідженні аналізували вміст сухої речовини, білків, жирів і крохмалю, а також склад амінокислот і жирних кислот. На рис. 2.1 наведено результати щодо вмісту сухої речовини та концентрації основних макронутрієнтів. У межах детальнішого дослідження, проведеного для виду *Wolffia microscopica*, також було проаналізовано інші компоненти, важливі для харчування людини, зокрема вміст мінеральних речовин, антиоксидантів (каротиноїдів і токоферолів), фітостеролів, харчових волокон та зольність. Вміст сухої речовини у шести досліджених видів становив від 4 до 8 % від маси свіжої біомаси (FW) (рис. 2.1A). Найнижчий вміст білку було зафіксовано у *Landoltia punctata* – приблизно 20 %, тоді як найвищий – у *Wolffiella hyalina*, майже 35 % (рис. 2.1B). Щодо вмісту жирів, мінімальне значення становило приблизно 4 % у *Landoltia punctata*, а максимальне – трохи менше 7 % у *Wolffiella hyalina* (рис. 2.1C). Нарешті, вміст крохмалю варіював від близько 4 % у *Lemna minor* до майже 10 % у *Landoltia punctata* (рис. 2.1D).

Усі наведені значення вмісту білків, жирів і крохмалю подано відносно сухої маси (Appenroth et al., 2017).

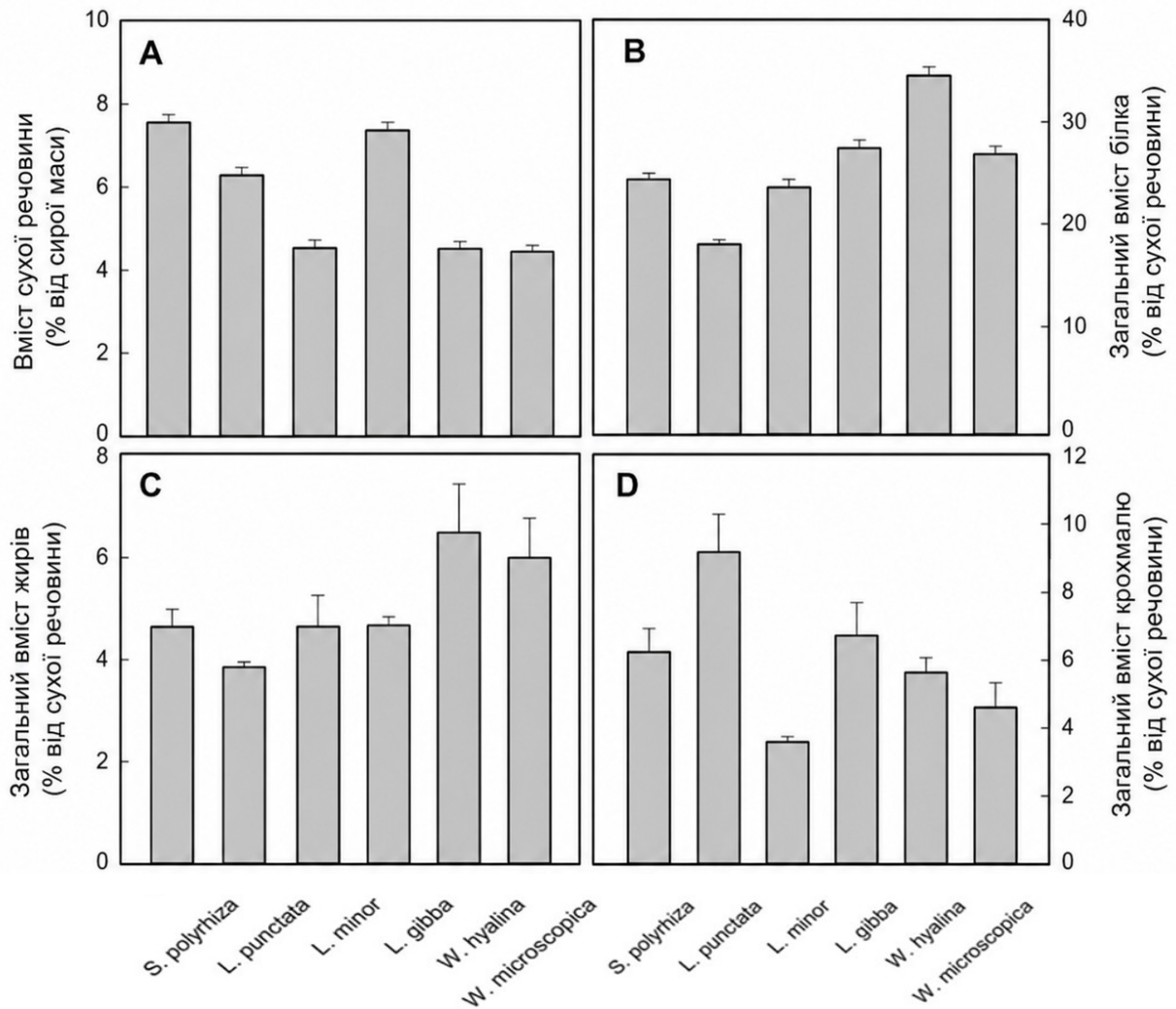


Рисунок 2.1. Основні компоненти у шести видах ряски:

вміст сухої речовини (A), загальний вміст білків (B), загальний вміст жирів (C) та крохмалю (D)

2.1.1 Білки та амінокислоти ряски

Загальний вміст білку в рясці серед шести розглянутих видів коливається від 20 до 35% сухої ваги. Ці значення узгоджуються з іншими дослідженнями, в яких середній вміст білку коливається від 19 до 37% (Bhanthumnavin and McGarry, 1971; Rusoff et al., 1980; Bergmann et al., 2000). Для порівняння з вмістом білку (на основі сухої ваги) у звичайно споживаних бобових та зернових культурах, соя містить понад 40% білку, далі йдуть бобові з 26–41% та сочевиця з 21–31%. Додаткові приклади включають сушений горох з 14–31%, квасоллю (білу, чорну та червону) з 20–30% та нут з 25–29% (Jha et al., 2022). Злаки зазвичай

забезпечують помірний рівень білку порівняно з бобовими. Зазначені значення включають кукурудзу з 8–13%, рис з 8–10%, пшеницю з 8–17%, ячмінь з 8–15%, овес з 12–24% та жито з 12–15% (Shewry, 2024). Також можна враховувати вміст білку у двох псевдозлаках, що мають важливе значення для харчування. Кіноа містить приблизно 14–17% білку (Navruz-Varli and Sanlier, 2016), тоді як гречка містить близько 9–15% білку (Zhu, 2021). Ці псевдозлаки особливо примітні, оскільки вони мають збалансований амінокислотний профіль, включаючи всі незамінні амінокислоти.

З цих даних можна побачити, що вміст білку в рясці порівнянний, а в деяких випадках і вищий, ніж у багатьох бобових культурах, за винятком, можливо, сої. Крім того, він явно вищий, ніж вміст білку в більшості зернових культур та псевдозлаків.

Важливо зазначити, що вміст білку сильно залежить від умов вирощування. Сюй, Цуй, Ченг та Стомп (2011) спостерігали, що біомаса ряски, вирощена в штучній лагуні зі стічними водами свиней, а потім перенесена в чисту джерельну воду з хлоридом натрію (NaCl) та без нього, демонструвала зниження вмісту білку, що супроводжувалося збільшенням вмісту крохмалю. Попередні дослідження Ландольта та Канделера (1987) також підкреслювали суттєвий вплив умов культивування, зокрема високої інтенсивності світла та високої концентрації нітратів, на вміст білку в різних видах ряски. За таких умов повідомлялося, що рівень білку коливався приблизно від 7% до 45% сухої ваги.

Ці результати свідчать про те, що вміст білку в рясці можна суттєво маніпулювати, оптимізуючи умови культивування для різних видів та клонів, при цьому рівень білку потенційно досягає майже 40% сухої ваги.

Амінокислотний склад загальних білків представлено в таблиці 2.1, де було проаналізовано вміст 17 амінокислот у всіх шести видах (Appenroth et al., 2017).

З цього аналізу було встановлено, що найвищі значення спостерігалися у видів, що належать до підродини *Wolffioideae*, а саме *Wolffiella hyalina* та *Wolffia microscopica*.

Таблиця 2.1 – Амінокислотний склад білків різних видів ряски (г/100 г білку)

Амінокислота	<i>Spirodela polyrhiza</i>	<i>Landoltia punctata</i>	<i>Lemna minor</i>	<i>Lemna gibba</i>	<i>Wolffia arabidensis</i>	<i>Wolffia microcarpa</i>
Цистеїн (CYS)	0,8	1,1	0,9	0,9	1,0	1,2
Метіонін (MET)	1,6	1,6	1,6	1,6	2,0	1,6
Аспарагінова кислота (ASP)	7,8	8,1	8,2	10,6	7,3	10,4
Треонін (THR)	4,2	4,1	4,0	4,0	4,2	4,7
Серин (SER)	4,1	4,0	4,1	4,2	4,3	4,7
Глутамінова кислота (GLU)	9,6	9,5	9,8	10,3	10,5	10,9
Гліцин (GLY)	4,3	4,5	4,6	4,6	5,0	4,7
Аланін (ALA)	5,4	5,3	5,1	6,0	6,0	7,8
Валін (VAL)	4,4	4,6	4,6	4,5	4,8	4,9
Ізолейцин (ILEU)	3,3	3,5	3,7	3,4	3,9	3,7
Лейцин (LEU)	6,8	7,3	7,3	7,2	8,0	7,7
Тирозин (TYR)	3,1	3,1	3,1	3,2	3,8	3,3
Фенілаланін (PHE)	4,0	4,5	4,4	4,3	5,1	4,2
Лізин (LYS)	4,2	4,1	5,0	4,2	5,8	5,7
Гістидин (HIS)	1,6	1,6	1,5	1,6	1,7	1,7
Аргінін (ARG)	4,7	4,7	4,8	4,9	4,7	5,2
Пролін (PRO)	3,5	4,1	3,8	3,9	3,7	3,6

У таблиці 2.2 наведено порівняння середнього складу незамінних амінокислот шести видів ряски з відповідними показниками соєвого борошна та нуту (Jahreis et al., 2016). Отримані дані свідчать, що сумарний вміст незамінних амінокислот у рясці є порівнянним із вмістом білку в інших рослинних. Крім того, слід підкреслити, що в жодному випадку концентрація незамінних амінокислот у рясці не була нижчою за рівні, рекомендовані Всесвітньою організацією охорони здоров'я (2007). Зокрема: сумарний вміст цистеїну та

метіоніну перевищував рекомендований рівень на 22 %; рівень треоніну був у середньому на 83 % вищим за рекомендований; вміст лейцину, а також суми фенілаланіну та тирозину перевищував рекомендовані межі відповідно на 25 % та 102 % (Appenroth et al., 2017).

Таблиця 2.2 – Середній амінокислотний склад різних рослинних джерел білку (г/100 г білку)

Незамінна амінокислота	Ряска (середнє значення)	Соєве борошно	Борошно з нуту	Рекомендації ВООЗ
Гістидин (HIS)	1,6	2,7	2,7	1,5
Ізолейцин (ILEU)	3,6	4,2	4,1	3,0
Лейцин (LEU)	7,4	7,7	7,7	5,9
Лізін (LYS)	4,8	6,0	7,0	4,5
Метіонін + цистеїн (MET + CYS)	2,7	2,9	3,3	2,2
Метіонін (MET)	1,7	1,4	1,6	1,6
Цистеїн (CYS)	1,0	1,5	1,7	0,6
Фенілаланін + тирозин (PHE + TYR)	7,7	9,0	8,6	3,8
Треонін (THR)	4,2	4,1	3,9	2,3
Валін (VAL)	4,6	4,4	4,2	3,9

Амінокислотний склад, ймовірно, визначається передусім видом рослин, що підтверджується результатами досліджень *Spirodela polyrhiza*, *Landoltia punctata* та *Lemna gibba*, проведених Rusoff та співавторами (1980), у яких ряску вирощували в лагуні зі стічними водами тваринницьких господарств. Отримані результати узгоджуються з даними, наведеними у цьому дослідженні для культур, вирощених у лабораторних умовах. Також було встановлено, що умови культивування, зокрема опромінення світлом із різною довжиною хвилі, не впливали на амінокислотний склад ряски.

Серед шести досліджених видів *Wolffiella hyalina* та *Wolffia microscopica* характеризуються найвищими рівнями лізину, метіоніну + цистеїну та фенілаланіну + тирозину. Ці два види можуть мати значний потенціал для

використання у харчуванні людини, оскільки вони відзначаються високою продуктивністю біомаси. Зокрема, *Wolffia microscopica* вважається найшвидше зростаючою покритонасінною рослиною, відомою на сьогодні (Sree et al., 2015b).

2.1.2 Вуглеводи: крохмаль та харчові волокна ряски

У рясці основними вуглеводами є крохмаль та харчові волокна (целюлоза, слідові кількості геміцелюлози та пектини). Вміст крохмалю, як показано на попередньому рис. 2.1D, варіює в межах 4–10 % залежно від виду ряски; інші дослідження (Tang et al., 2015) також повідомляють про середній вміст крохмалю близько 11 %. Це означає, що кількість крохмалю значно нижча за вміст білку в рясці, вирощеній за оптимальних умов. Як зазначалося наприкінці розділу 1 та додатково підкреслювалося у попередньому підрозділі, рівень крохмалю в рясці значною мірою залежить від умов культивування (Xu et al., 2011). Показано, що солоні поживні середовища можуть суттєво підвищувати вміст крохмалю – понад 40 % від сухої маси. Також нестача окремих поживних елементів (фосфатів, нітратів) або наявність важких металів підвищує вміст крохмалю, що було продемонстровано для різних видів ряски, зокрема *Lemna minor* (Appenroth et al., 2017).

Крохмальні гранули швидко накопичуються та розподіляються у фрондах ряски під час її росту; це добре видно на спостереженнях, представлених на рис.2.2 для *Landoltia punctata* (Xu et al., 2023).

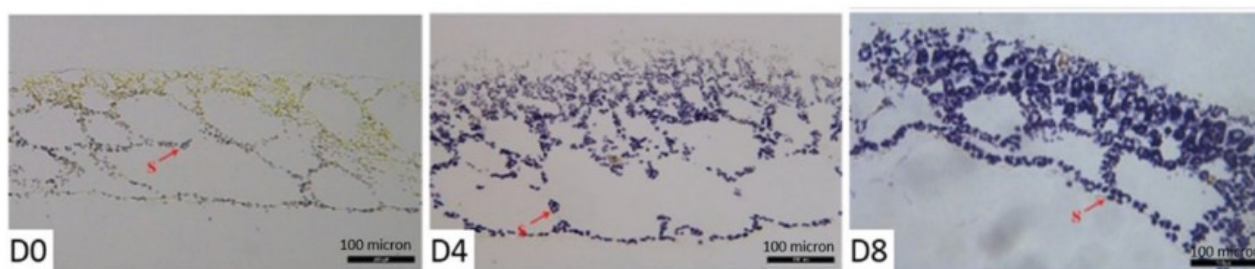


Рисунок 2.2 – Розподіл крохмалю у фрондах *Landoltia punctata* (день 0, 4 та 8). Червона стрілка «S» вказує на крохмальні гранули

Форма цих гранул описується як «диск-купол», оскільки одна сторона гранули є плоскою, а діаметр становить 4–9 μm . На рис. 2.3 чітко видно поверхні

гранул крохмалю *Spirodela polyrhiza*, отримані за допомогою скануючої електронної мікроскопії (SEM). Стрілками позначено дрібні отвори, подібні до «уколів шпилькою», що зумовлені специфічним типом поліморфізму амілопектину крохмалю ряски (Xu et al., 2023).

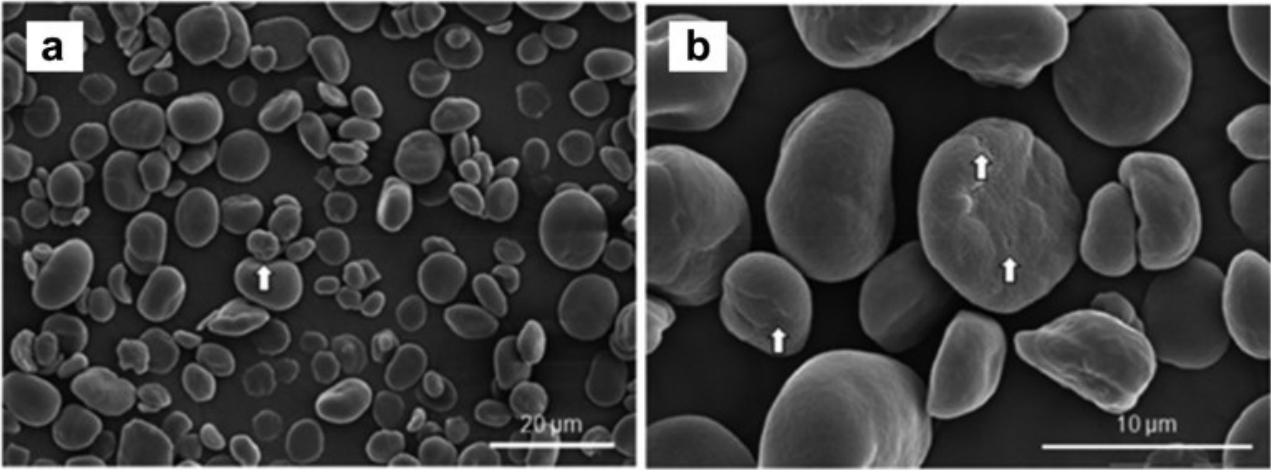


Рисунок 2.3 – Мікрофотографії крохмальних гранул *S. polyrhiza*, отримані за допомогою скануючого електронного мікроскопа. Білі стрілки позначають «отвори».

Вміст крохмалю у *Spirodela polyrhiza* був охарактеризований та порівняний з крохмалем кукурудзи (*Zea mays* cv B73) у дослідженні Lee et al. (2016). Було встановлено, що *Spirodela polyrhiza* містить приблизно 23 % крохмалю (у перерахунку на суху масу), тоді як у кукурудзі цей показник становить 66,5 %. Крохмаль ряски містить більше амілози (близько 36 %) порівняно з кукурудзяним крохмалем (31 %). Крім того, загальний вміст фосфору в рясці становить 0,007 % і представлений у формі неорганічного фосфату та фосфатного моноефіру. Натомість загальний вміст фосфору в кукурудзі (0,016 %) повністю представлений у формі фосфоліпідів.

У табл. 2.3 наведено узагальнення поживного складу двох розглянутих видів ряски (Lee et al., 2016).

Таблиця 2.3 – Поживний склад ряски та кукурудзи

Показник	Крохмаль	Білки	Ліпіди	Амілоза	Загальний
----------	----------	-------	--------	---------	-----------

	(%)	(%)	(%)	(%)	фосфор (%)
Ряска (<i>S. polyrhiza</i> , LDA)	23,3	13,8	1,0	35,7	0,007
Кукурудза (<i>Zea mays</i> cv B73)	66,5	10,3	3,8	31,0	0,016

Метод рентгенівської дифракції дозволяє виявити кристалічну структуру крохмалю: для крохмалю ряски отримують поліморф типу В, тоді як для кукурудзяного крохмалю – поліморф типу А. Ці поліморфізми підтверджуються розподілом довжин розгалужених ланцюгів: амілопектин ряски переважно складається з довгих ланцюгів, що обумовлює поліморф типу В. У той же час амілопектин кукурудзи характеризується більшою кількістю коротких розгалужених ланцюгів, що визначає поліморф типу А. Переважання довгих розгалужених ланцюгів амілопектину у ряски порівняно з кукурудзою підтверджується їх середньою довжиною. Справді, середній ступінь полімеризації становить 26,5 у ряски проти 21,3 у кукурудзи.

Відмінності вмісту крохмалю та різні просторові конфігурації молекул амілози та амілопектину зумовлюють різні властивості крохмалю ряски порівняно з кукурудзяним.

Ряска також містить значну кількість харчових волокон. Загальний вміст волокон становить близько 25% від сухої маси, згідно з аналізом 11 видів роду *Wolffia* (Appenroth et al., 2018). Зокрема, у хімічному складі *Wolffia globosa* загальний вміст харчових волокон становить 20,7% від сухої маси, із яких 18,4% складають нерозчинні волокна, що включають целюлозу та геміцелюлозу, а 2,3% – розчинні волокна, переважно пектинові сполуки (Dhamaratana et al., 2024). Ці значення дуже подібні до спостережуваних у бобових культурах із високим вмістом харчових волокон, таких як нут (нерозчинні 14–17%, розчинні 2–6%), звичайна квасоля (нерозчинні 12–16%, розчинні 6–10%), сушений горох (нерозчинні 14–20%, розчинні 3–5%) та сочевиця (нерозчинні 12–15%, розчинні 3–4%) (Chen et al., 2016).

Високий вміст харчових волокон у ряски може покращувати дієту у західних країнах, забезпечуючи продукти з низьким енергетичним

навантаженням та сприяючи профілактиці серцево-судинних захворювань. На сьогодні дослідження вуглеводів ряски залишаються обмеженими. Майбутні дослідження можуть зосередитися на резистентному крохмалі та інших типах харчових волокон ряски для подальшого уточнення їхніх функцій та властивостей. Хоча високий вміст крохмалю важливий для виробництва біопалива, у країнах із раціонами на основі рису високий вміст крохмалю не є необхідним для харчування, так само як і в промислово розвинутих країнах, де віддають перевагу продуктам з низьким енергетичним вмістом. Таким чином, відносно низький вміст крохмалю, зафіксований у швидкоростучих популяціях ряски за оптимальних умов вирощування, є сприятливим показником для харчування людини як у країнах, що розвиваються, так і у промислово розвинутих країнах.

2.1.3 Жири та жирні кислоти ряски

Кількість жирів у шести розглянутих видах ряски коливається приблизно від 4% до 6% від сухої маси. Слід підкреслити, що цей вміст відноситься до всієї біомаси рослини, а не лише, наприклад, до насіння, як у більшості культивованих рослин. Найвищий вміст жирів, подібно до випадку з вмістом білку, був зафіксований у видах *Wolffiella hyalina* та *Wolffia microscopica*. Yan та співавтори (2013) досліджували 30 видів ряски в умовах міксотрофного культивування, тобто при 22 °C у середовищі Шенка-Гільдебранда, збагаченому глюкозою, і отримали вміст жирних кислот у межах від 4% до 14% від сухої маси. Передбачається, що ця значна різниця зумовлена міксотрофними умовами культивування, які відрізняються від автотрофних умов дослідження Appenroth та співавторів (2017), і можуть бути корисними при необхідності виробництва у великому масштабі.

Жир є важливим поживним компонентом, оскільки він забезпечує енергію для підтримки життєдіяльності. Профіль жирних кислот (ЖК) відіграє критичну роль у здоров'ї людини, оскільки залежно від типу жирні кислоти можуть як захищати, так і спричиняти розвиток захворювань. Таким чином, якщо передбачається використання ряски в харчуванні людини, розподіл жирних

кислот є надзвичайно важливим. У табл. 2.4 наведено профіль жирних кислот для шести розглянутих видів ряски (Appenroth et al., 2017).

Таблиця 2.4 – Розподіл жирних кислот у різних видах ряски (% від загальної кількості метилових ефірів жирних кислот, FAME)

Жирні кислоти (FA)	<i>Spirodela polyrhiza</i>	<i>Landoltia punctata</i>	<i>Lemna minor</i>	<i>Lemna gibba</i>	<i>Wolffiella hyalina</i>	<i>Wolffia microscopica</i>
SFA (насичені)	39,85	46,23	27,99	28,25	32,20	25,07
MUFA (мононенасичені)	4,40	5,65	4,63	4,13	5,32	3,77
PUFA (поліненасичені)	55,75	48,12	67,38	67,62	62,48	71,16
Сума Омега-3	44,26	32,66	46,00	53,08	47,99	44,22
Сума Омега-6	10,85	14,89	20,89	14,23	14,12	26,77
Співвідношення Омега-6/Омега-3	0,25	0,46	0,45	0,27	0,29	0,61
SCFA (C4-C10, коротколанцюгові)	0,02	0,01	0,00	0,10	0,00	0,00
MCFA (C11-C14, середньоланцюгові)	0,60	0,41	0,48	0,62	0,61	0,14
Пальмітинова кислота	29,38	32,59	21,33	22,08	22,03	20,23
Олеїнова кислота	1,71	3,09	1,67	0,69	1,08	1,52
Лінолева кислота	10,59	14,36	20,11	12,99	13,75	25,42
α -Ліноленова кислота	43,86	32,40	44,47	48,60	47,85	39,58
γ -Ліноленова кислота	0,01	0,01	0,52	1,02	0,02	1,20
Стеаридонова кислота	0,00	0,00	1,16	3,91	0,00	4,57
Бегенова кислота	0,42	0,52	0,37	0,54	2,57	0,90
Лігноцеринова кислота	3,01	3,83	1,32	1,61	1,81	0,96
Церотинова кислота	0,56	2,30	0,46	0,26	0,93	0,33

Вміст насичених жирних кислот (SFA), головним чином представлених пальмітиною кислотою (C16:0) та лінгочериковою кислотою (C24:0), є відносно високим і становить 25–46 %. Вміст мононенасичених жирних кислот (MUFA), переважно олеїнової кислоти (C18:1), є помірним і коливається між 4–6 %, тоді як коротколанцюгові (SCFA) та середньоланцюгові жирні кислоти (MCFA) дуже низькі (менше 1 % для всіх розглянутих видів водної лісової рослини). Що стосується поліненасичених жирних кислот (PUFA), їх вміст є винятково високим і коливається в межах 48–71 %, переважно за рахунок

лінолевої кислоти (C18:2, n6) та α -ліноленової кислоти (C18:3, n3). Якщо порівняти розподіл жирних кислот ряски з розподілом у найбільш поширених рослинних оліях та борошні з насіння бобових культур, як показано в табл. 2.5, спостерігаємо, що частка SFA у водяній лісовій рослині є значно вищою (за винятком кокосової та пальмової олії), тоді як частка MUFA значно нижча. Що стосується PUFA, її вміст у водяній лісовій рослині порівнянний із рослинними оліями (за винятком соняшникової олії) і перевищує PUFA у борошні з насіння бобових. Слід зазначити, що хоча частка SFA у водяній лісовій рослині висока, вона все ж менша за вміст PUFA і становить лише 4–7 % від сухої маси, тобто є найменшою серед основних хімічних компонентів (див. рис. 2.1).

Цікавою є також оцінка співвідношення n6/n3, тобто відношення між есенціальними омега-6 та омега-3 жирними кислотами. Згідно з рекомендаціями ФАО (2010), співвідношення n6/n3 не повинно перевищувати 5. Молекулярні дослідження Simopoulos (2006) показали, що люди еволюціонували на дієті із співвідношенням n6/n3, близьким до 1. На підставі цих рекомендацій можна відзначити, що співвідношення n6/n3 ряски завжди відповідає зазначеним нормам (табл. 2.5). Для рослинних олій співвідношення n6/n3 дуже варіює: від 0,28 у лляній олії до 2,2 у ріпаковій, до 15 в оливковій і 150 у соняшниковій. У пальмовій, кокосовій та арахісовій оліях жирні кислоти n3 практично відсутні. Для борошна з насіння бобових це співвідношення завжди перевищує 4 (Jahreis and Schäfer, 2011; Jahreis et al., 2016).

Окремо варто згадати вид *Wolffia globosa*, оскільки він домінує серед представників роду *Wolffia* у багатьох азійських країнах, де водяну лісову рослину традиційно використовують як їжу для людей. Вміст PUFA у цьому виді становить 61–64 % від загальної кількості жирних кислот, а співвідношення n6/n3 – 0,23–0,29 (Appenroth et al., 2017).

Таблиця 2.5 – Порівняння вмісту жирних кислот ряски з поширеними оліями з насіння та борошном бобових культур

Джерело	SFA	MUF	PUFA	n6 / n3	LA	ALA
---------	-----	-----	------	---------	----	-----

	(%)	A (%)	(%)		(n6, %)	(n3, %)
<i>S. polyrhiza</i>	40	4	11	1 : 4	44	1 : 4
<i>L. punctata</i>	46	6	14	1 : 2	32	1 : 2
<i>L. minor</i>	28	5	20	1 : 2	44	1 : 2
<i>L. gibba</i>	28	4	13	1 : 4	49	1 : 4
<i>W. hyalina</i>	32	5	14	1 : 3	48	1 : 3
<i>W. microscopica</i>	25	4	25	1 : 2	40	1 : 2
Лляна олія	9	21	15	1 : 4	53	1 : 4
Ріпакова олія	6	59	22	2 : 1	10	2 : 1
Горіхова олія	9	20	54	4 : 1	13	4 : 1
Соєва олія	15	23	54	7 : 1	8	7 : 1
Оливкова олія	15	75	10	15 : 1	<1	15 : 1
Соняшникова олія	12	16	72	140 : 1	<1	140 : 1
Пальмова олія	48	44	8	0	–	–
Кокосова олія	89	8	2	0	–	–
Арахісова олія	13	48	32	0	–	–
Борошно з нуту	14	28	56	22 : 1	3	22 : 1
Борошно з люпину	18	48	27	4 : 1	7	4 : 1
Борошно з гороху	18	26	48	6 : 1	8	6 : 1

Високий коефіцієнт $n6/n3$, якого дотримуються сучасні західні дієти (15:1–16,7:1), сприяє розвитку багатьох захворювань, включаючи серцево-судинні хвороби, рак, остеопороз, а також запальні та аутоімунні захворювання. Russo (2009) також підкреслив клінічне значення поліненасичених жирних кислот $n6$ та $n3$. Загальний жировий вміст ряски дуже багатий на α -ліноленову кислоту ($n3$), що призводить до дуже низьких співвідношень $n6/n3$. Додавання ряски до харчових продуктів людини може, хоча б частково, компенсувати несприятливе співвідношення $n6/n3$ жирних кислот, яке характерне для західної дієти, враховуючи при цьому низький загальний вміст ліпідів у цих рослинах.

2.1.4 Мінерали, вітаміни та фітохімічні сполуки ряски

У рамках досліджень ряски як потенційного альтернативного та стійкого джерела харчування, *Wolffia microscopica* виділяється як одна з найперспективніших видів через сприятливий склад амінокислот та жирних кислот. Для більш глибокого оцінювання її загальної харчової цінності було проведено розширений аналіз, який включав, крім білків, ліпідів та крохмалю,

також кількісний визначення мінералів, антиоксидантів (каротиноїди та токофероли), фітостеролів та харчових волокон (Appenroth et al., 2017). З точки зору мінерального складу (табл. 2.6), *Wolffia microscopica* характеризується особливо низьким вмістом натрію, що є важливим для харчування людини, особливо для пацієнтів із гіпертонією; водночас спостерігається висока концентрація калію, корисного для регуляції артеріального тиску. Серед мікроелементів виявлено дуже високі концентрації марганцю, заліза, цинку та міді, які є необхідними для нормального функціонування метаболічних, імунних та антиоксидантних процесів.

Варто зазначити, що ці значення сильно залежать від поживного середовища, яке використовувалося під час культивування. У табл. 2.6 також наведені концентрації деяких важких металів, присутність яких потребує ретельного контролю, враховуючи вплив на безпеку харчових продуктів *Lemnaseae*, які відомі здатністю накопичувати ці метали у значних кількостях. Аналогічні результати були наведені Ifie et al. (2021), які визначили K, Ca та Na як домінуючі мінерали у *Lemna minor*, за якими слідували Mn, Fe та Zn (Appenroth et al., 2017).

Таблиця 2.6 – Вміст макро- та мікроелементів у *Wolffia microscopica*

Макроелемент (г/кг сухої речовини)	Мікроелемент (мг/кг сухої речовини)	Важкі метали (мг/кг сухої речовини)
Калій (K) – 83,00	Марганець (Mn) – 755,00	Кадмій (Cd) – 0,40
Фосфор (P) – 7,04	Залізо (Fe) – 240,00	Свинець (Pb) – 0,24
Кальцій (Ca) – 6,00	Цинк (Zn) – 30,80	Ртуть (Hg) – 0,04
Магній (Mg) – 3,10	Мідь (Cu) – 3,52	Арсен (As) – 0,05
Натрій (Na) – 0,30	Йод (I) – 0,75	Селен (Se) – 0,06

Мінеральний склад водяного горіха має особливий інтерес. Зокрема, аналіз *Wolffia microscopica* показав дуже високий коефіцієнт K^+/Na^+ (277), тоді як співвідношення Mg^{2+}/Ca^{2+} є відносно низьким (0,52). Ці значення явно залежать від складу поживного середовища, використаного під час вирощування. Це свідчить про те, що водяний горіх може бути джерелом харчування з низьким вмістом натрію та хорошим внеском магнію. Загалом, золи, що утворюються при

спалюванні сухої речовини *Wolffia microscopica*, досягають значення 165 г/кг, що відповідає 16,5 % від сухої маси, що свідчить про значну присутність загальних мінеральних компонентів. Аналіз вітамінного профілю *Wolffia microscopica*, дозволив ідентифікувати ряд життєво важливих вітамінів, внесок яких може суттєво підвищувати загальну харчову цінність цієї рослини (Appenroth et al., 2017). Основні каротиноїди, виявлені у *Wolffia microscopica*, включають:

- (all-E)-лютеїн – 70 мг/100 г сухої речовини;
- (all-E)-віялаксантин – 46 мг/100 г сухої речовини;
- (all-E)- β -каротин – 28 мг/100 г сухої речовини;
- (all-E)-зеаксантин – 4,3 мг/100 г сухої речовини.

Хоча зеаксантин присутній у відносно невеликій кількості, він має особливе значення для споживання людиною. Разом із лютеїном він сприяє захисту від вікової макулярної дегенерації, ефект якої посилюється вмістом омега-3 жирних кислот та сприятливим співвідношенням $n6/n3$, що підтримує активність ксантофілів.

Іншим вивченим вітаміном є токоферол, важливий поживний елемент для людини та потужний антиоксидант. У *Wolffia microscopica* переважають α -токоферол (9 мг/100 г сухої речовини) та γ -токоферол (13 мг/100 г сухої речовини). Серед фітохімічних сполук стероли відіграють ключову роль у регуляції текучості та проникності клітинних мембран і відомі своєю здатністю знижувати рівень холестерину в сироватці крові людини. Дослідження фітостеролів у *Wolffia microscopica* показало загальний вміст близько 50 мг/г ліпідів, що в п'ять разів перевищує вміст у звичайних рослинних оліях. Основні компоненти, виражені у відсотках від загального вмісту стеролів, включають: ситостерол – 53 %, кампестерол – 18 %, стигмастерол – 15 % та 5-авенастерол – 11 %, а також сліди інших стеролів, таких як циклоратенол (2 %) та ізомер авенастеролу (1 %).

Нарешті, вміст сирої клітковини у *Wolffia microscopica* перевищує 28 % сухої маси, що підтверджується середнім значенням більш масштабного

дослідження 16 клонів роду *Wolffia*, де вміст харчових волокон становив близько 26 % (Appenroth et al., 2018). Цей високий внесок клітковини вказує на значну роль *Wolffia microscopica* у підтримці регулярності кишкових процесів та здоров'я метаболізму.

Більше того, високе споживання харчових волокон пов'язане зі зниженням факторів ризику серцево-судинних захворювань, таких як загальний холестерин та ЛПНЩ, що сприяє профілактиці та контролю серцево-судинних захворювань, основних причин смертності в європейських країнах.

Ці характеристики роблять *Wolffia microscopica*, а також інші види роду, не лише цінним джерелом білку та вітамінів, але й потенційним союзником у профілактиці метаболічних, травних та серцево-судинних розладів.

2.2 Токсичність та алергенність рослинних білків

Протягом останніх років альтернативні джерела білку для харчових продуктів привернули значну увагу як замітники тваринних білків завдяки їхньому сприятливому харчовому профілю та екологічній стійкості. Більшість джерел білку походять із виробництва продуктів тваринного походження, яке традиційно є основним постачальником білку в західній дієті.

Диверсифікація джерел харчових білків є одним із ключових аспектів цього процесу трансформації, спрямованого на підвищення сталості харчових систем. Така трансформація передбачає включення широкого спектру альтернативних джерел білку до раціону, які можна класифікувати наступним чином:

- джерела, що базуються на ґрунті, тобто культури, такі як бобові, насіння, листя та гриби;
- джерела, що базуються на воді, включаючи макро- та мікроальги, водяний горіх та інші водні рослини;
- клітинні джерела та білки, отримані з комах.

Нові джерела білку повинні бути ретельно оцінені перед виходом на ринок, оскільки вони можуть містити та/або піддавати споживачів різноманітним небезпекам для безпеки харчових продуктів, зокрема хімічним та

мікробіологічним забруднювачам, алергенам, токсинам та вторинним метаболітам, що продукуються рослинами. Питання безпеки альтернативних джерел білку та їхніх аналогів, тобто харчових продуктів, які імітують тваринні продукти, але виготовлені з різних білкових джерел, часто залишаються недостатньо дослідженими або не мають достатніх наукових доказів.

У цьому дослідженні надається оновлений огляд токсикологічних ефектів і потенційної алергенності альтернативних джерел білку, які наразі використовуються або готуються до використання у виробництві харчових аналогів. Особлива увага приділяється новим рослинним джерелам білку, оскільки вони легко доступні та загалом добре сприймаються споживачами.

Серед наземних джерел, що розглядаються, включені: чечевиця, боби, чорноглазка, мунг-боби (зелені та чорні) і кіноа; серед водних джерел були проаналізовані водяний горіх та мікроальги.

2.2.1 Токсикологічні ефекти

Отримані дані щодо токсикологічних ефектів стосуються переважно наявності вторинних метаболітів рослинного походження, серед яких антинутрієнти (ANF), фітоестрогени та олігосахариди, а також результатів токсикологічних досліджень, проведених на окремих джерелах білку та деяких білкових інгредієнтах.

Антинутрієнти (ANF) продукуються рослинами як механізм захисту від біотичних і абіотичних стресів, таких як комахи, мікроорганізми та несприятливі умови навколишнього середовища.

З харчової точки зору ANF вважаються антинутрієнтами, оскільки вони знижують якість рослинних білків, порушуючи біодоступність та засвоєння поживних речовин.

Фітоестрогени, у свою чергу, можуть чинити як терапевтичний, так і негативний ефект, оскільки вони діють як ендокринні інтерференти, потенційно змінюючи функціонування різних систем організму. До потенційно несприятливих ефектів належать зниження фертильності, інгібування росту та зміни апетиту. Подібно до цього, олігосахариди (коротколанцюгові цукри, що не

повністю перетравлюються людиною) можуть діяти як антинутрієнти, викликаючи травні розлади.

Щодо альтернативних джерел білку наземного походження, нижче наведено основні речовини з токсичними ефектами на прикладі деяких значущих видів рослин (Milana et al., 2025).

У чечевиці присутні різні антинутрієнти, серед яких феноли, таніни, фітинова кислота, сапоніни, лектини та гемаглютинуюча активність. Крім того, спостерігається інгібуюча активність протеаз, що може одночасно блокувати трипсин і хімотрипсин у різних ділянках зв'язування. У 2009 році EFSA повідомила про наявність L-канаваніну в борошні з чечевиці – непептидного амінокислоти, яка через структурну подібність до аргініну може взаємодіяти з останнім. Чечевиця також містить фітоестрогени, такі як ізофлавоони, флавоноїди та катехіни, а також олігосахариди (рафіноза, стахіоза та вербаскоза), що належать до класу α -галактозидів.

Боби відомі тим, що можуть викликати гемолітичну анемію (фавізм) у чутливих осіб, тобто у людей з дефіцитом ферменту глюкозо-6-фосфатдегідрогенази (G6PD), що призводить до зниження рівня глутатіону. У присутності піримідинових глікозидів, таких як віцина та конвіцина, що є окислювачами, та дефіциту глутатіону, може виникати гемолітичний криз. Загалом у бобах виявлено кілька антинутрієнтів: феноли, таніни, фітинова кислота, сапоніни та лектини. Щодо інгібіторів ферментів, були виявлені активності, що інгібують трипсин, хімотрипсин та амілазу, а також гемаглютинуюча активність. Боби також містять фітоестрогени, такі як ізофлавоони, і α -галактозидні олігосахариди.

У чорноглазому бобі гемаглютинуюча активність висока у білковій фракції альбуміну, тоді як вміст лектинів відносно низький. Інгібуюча активність трипсину залежить від типу зразка: вона висока у цільних сухих бобах, але значно знижена у борошні з цільних сухих бобів. Крім того, Frota et al. (2018) показали, що інгібуюча активність трипсину у білкових ізолятах знижується приблизно в сто разів після термічної обробки порівняно з необробленими

ізолятами. Чорноглазий боб також містить фітоестрогени, такі як куместани, та α -галактозиди (рафіноза, стахіоза, вербаскоза).

У мунг-бобах (зелених і чорних) присутні різні антинутрієнти в білкових інгредієнтах. Наприклад, у борошні з зелених мунг-бобів виявлено таніни, фітинову кислоту, ціаністу кислоту, сапоніни, а також інгібітори трипсину та α -амілази. Чорні мунг-боби, крім зазначених ANF, містять біогенні аміни, значну кількість сапонінів (2300 мг/г) і демонструють гемаглютинуючу активність. Незважаючи на наявність ANF, токсичність білків цих бобів у дослідях на щурах не виявила негативних ефектів (Brishti et al., 2020). Мунг-боби також містять олігосахариди (рафіноза, стахіоза, вербаскоза) та фітоестрогени, такі як лігани.

У кіноа виявлено кілька антинутрієнтів: фітинову кислоту, сапоніни, оксалати та таніни. Кіноа також демонструє слабку інгібуючу активність трипсину та хімотрипсину. Крім того, вона містить фітоестрогени, такі як лігани та ізофлавоїди, зокрема геністеїн та геністин (глікозильована форма геністеїну). Щодо токсичних ефектів водних альтернативних джерел білку, досліджувались водяний горіх і мікроальги.

Водяний горіх (*Lemna* spp. та *Wolffia* spp.) оцінювався в рамках запитів на авторизацію як Novel Food в EFSA. Дослідження не виявили значних токсичних ефектів або генотоксичних занепокоєнь. Серед вторинних метаболітів у продуктах з водяного горіха виявлено оксалати, таніни, фітинову кислоту та інгібітори трипсину, причому останні більш представлені у порошку та білкових концентратах *Lemna* (Turck et al., 2021b; Turck et al., 2022; Turck et al., 2023). Зокрема, *Wolffia arthiza* містить значні кількості оксалатів, фітинової кислоти, фенольних сполук, танінів і флавоноїдів (Hu et al., 2022). Ці дані свідчать про загалом сприятливий профіль безпеки, хоча потребують подальших досліджень для повної характеристики біоактивних компонентів.

Мікроальги є перспективним джерелом альтернативних білків, але містять різні антинутрієнти та біоактивні сполуки, наявність та токсичність яких вивчали в численних дослідженнях. Виявлено різні сполуки, такі як алкалоїди, сапоніни, стероїди, флавоноїди, фітинова кислота, таніни, інгібітори трипсину та лектини у

видах *Dunaliella salina*, *Botryococcus braunii* та *Chlorella* spp. (Ridlo et al., 2023). Деякі мікроальги, зокрема *Scenedesmus* і *Chlorella*, можуть розвивати цитотоксичність за специфічних умов культивування (наприклад, дефіцит заліза) або накопичувати стійкі забруднювачі, такі як гексахлорбензол. З токсикологічної точки зору більшість досліджень не виявила значних несприятливих ефектів. Різні види *Chlorella* (наприклад, *C. protothecoides*, *C. sorokiniana*), *Dunaliella salina* тощо показали сприятливий профіль безпеки навіть при високих дозах або хронічному застосуванні. Загалом, мікроальги здаються безпечними для використання в харчуванні, хоча різниця між видами та умовами виробництва вимагає подальшого вивчення токсикологічного профілю та вторинних метаболітів.

2.2.2 Потенційна алергенність

Результати, що стосуються потенційної алергенності, зосереджуються переважно на наявності алергенів, можливості перехресної реактивності та історії сенсibilізації, пов'язаної з різними джерелами білку. Важливо враховувати ці три фактори при оцінці потенційної алергенності харчового продукту, особливо коли мова йде про нові джерела їжі. Крім наявності внутрішньо властивих алергенів або білків, схожих на алергени, слід ретельно розглядати історію сенсibilізації продукту, а також філогенетичні зв'язки та структурні подібності з відомими алергенами, які можуть спричиняти перехресні реакції. Чутливі до алергенів особи можуть проявляти алергічні реакції через пряму сенсibilізацію до алергену або через перехресну реактивність (Soh et al., 2021). Бобові вважаються поширеними алергенними продуктами харчування, оскільки їхні внутрішньо властиві алергени були широко задокументовані та описані. Для сочевиці три основні алергени позначаються як *Lep* c1, c2 та c3. *Lep* c1 є резервним білком із суперсімейства коспінів (*cupin*), а його генетичний варіант *Lep* c1.01 (вісілина вагою 48 кДа) був ідентифікований як основний алерген сочевиці. Інші головні алергени включають біотинільований білок насіння (*Lep* c2) та неспецифічний білок переносу ліпідів (*ns-LTP*) із

суперсімейства проламін (Lep c3). Білки переносу ліпідів (LTP) вважаються паналергенами, оскільки вони широко поширені в рослинному світі.

Нещодавні дослідження застосовували як протеомний аналіз, так і *in silico* аналіз для ідентифікації потенційних алергенів у сочевиці. Протеомний профіль, заснований на експериментальних даних, виявив 44 алергенні або подібні до алергенів білки, серед яких провісіліна, легумін A2 та LTP. Паралельно *in silico* аналіз за допомогою інструменту AllerCatPro 2.0 виявив нові потенційні алергени, такі як білки, пов'язані з патологічною відповіддю (PR4, PR10b), та білок відповіді на стійкість до хвороб (DRR49). Ці білки демонструють подібність до алергенів інших бобових, що свідчить про можливі перехресні реакції. Комбінація цих підходів підкреслює складність алергенного профілю сочевиці та необхідність подальших досліджень. У літературі широко описана перехресна реактивність між сочевицею, люпином та іншими бобовими, такими як нут і горох. Зокрема, виявлено 40% гомології послідовностей і 70% подібності між алергенами люпину (Lup-1) та сочевиці (Lep c1.01). Крім того, документовані клінічні та імунологічні реакції на люпин у пацієнтів, алергічних до сочевиці, що підкреслює важливість врахування цих кореляцій при управлінні алергіями на бобові (Cabanillas et al., 2018; Shaheen et al., 2019; Halima et al., 2022).

У бобах виявлено вісім білків як потенційних алергенів, оскільки вони проявляють властивості, подібні до алергенів, такі як стійкість до травлення та здатність викликати IgE-опосередковані алергічні відповіді у сенсibilізованих мишей і пацієнтів-алергіків. Було виявлено перехресну реактивність, підтверджену тестом ELISA, з арахісом, пажитником, мунг-бобом та нутом. Інші дослідження повідомляли про перехресну реактивність із соєю та люпином (Kumar et al., 2014).

Для чорноглазого бобу визначено чотири алергени із суперсімейств коспінів, віцілінів та проламінів – резервні білки рослин. Сенсibilізацію чорноглазого бобу оцінювали у дітей-алергіків на бобові за допомогою шкірних проб (SPT), визначення специфічних IgE в сироватці (sIgE), тесту інгібування IgE

(для перевірки перехресної реактивності з іншими бобовими) та тесту активації базофілів (ВАТ, для оцінки чутливості та реактивності до бобових). В результаті більшість дітей виявила сенсibilізацію до чорноглазого бобу, причому частіше серед дітей, алергічних на арахіс. Також повідомлялося про подібність послідовностей алергенів чорноглазого бобу до алергенів арахісу, гороху, сочевиці, сої, мунг-бобу та люпину (Chentouh et al., 2022).

У зеленому мунг-бобі ідентифіковано шість алергенних послідовностей: Vig r1 (білок, пов'язаний з патогенезом), Vig r2 та r3 (резервні білки насіння типу віціліна), Vig r4 (білок альбуміну насіння), Vig r5 (фрагмент Vig r2) та Vig r6 (специфічний білок зв'язування цитокінів). Алергени Vig r2–r5 проявляють властивості, подібні до алергенів, такі як стійкість до травлення та здатність викликати IgE-опосередковані алергічні відповіді у людей і лабораторних тварин. Ці алергени також демонструють високу послідовнісну схожість із алергенами сої, сочевиці, гороху, арахісу та люпину, що свідчить про потенційну перехресну реактивність (Misra et al., 2011). Алергени Vig r1 (зазначені у проростках) та Vig r6 є гомологами алергену пилку берези (Bet v1) і можуть викликати IgE-опосередковані перехресні алергічні реакції у пацієнтів, сенсibilізованих до пилку берези (Guhsl et al., 2014). Крім білків переносу ліпідів (LTP), білки зеленого мунг-бобу викликали позитивні шкірні проби та імунологічні відповіді у пацієнтів, алергічних на арахіс, та демонстрували перехресну реактивність із соєю (Cho et al., 2017). Що стосується чорного мунг-бобу, у ньому виявлено кілька білків, що зв'язуються з IgE; проте на сьогодні єдиним ідентифікованим та охарактеризованим алергеном є Vig m вагою 28 кДа. Цей білок демонструє властивості, подібні до алергенів, зокрема стійкість до травлення. Крім того, чорний мунг-боб може проявляти перехресну реактивність з іншими бобовими, такими як боби, сочевиця та горох (Verma et al., 2012, 2013).

Щодо кіноа, досліджень небагато; однак встановлено перехресну реактивність із ліщиною, що свідчить про потенційно ширшу перехресну алергенність між кіноа та горіхами (Cho et al., 2017). Lenticchie d'acqua (водяні горошки) широко споживаються в Азії, де випадки алергічних реакцій не були

зафіксовані. Проте протеомні *in silico* аналізи цілих рослин виявили гомології з іншими рослинними алергенами, зокрема алергеном селери (Ari g3) та передбачуваними алергенами пилку ліщини (Cor a10) і пшениці (Tri a31, Tri a34), хоча перехресної реактивності з цими продуктами не зафіксовано. EFSA зазначає, що потенціал водяного горошку викликати алергічні реакції вважається низьким, але не нульовим через високий вміст білку в цих рослинах (Turck et al., 2021b, 2021c, 2022, 2023).

Нещодавно James et al. (2023) ідентифікували кілька потенційних алергенів у мікроальгах роду *Chlorella* із молекулярною масою від 13 до 72 кДа. Потенційну алергенність екстрактів *Chlorella vulgaris* оцінювали *in silico* за допомогою баз даних AllergenOnline та Allergome, застосовуючи критерії перехресної реактивності FAO/WHO. Серед виявлених алергенів найбільш значущими є кальмодулін та фруктозо-бісфосфат-альдолаза через їх схожість з алергенами істівних риб і ракоподібних (Bianco et al., 2022). Хоча клінічні дані про алергічні реакції на мікроальги обмежені, нещодавні повідомлення вказують на можливі побічні ефекти при вживанні харчових добавок на основі *Chlorella*, включаючи випадок анафілаксії та гострого тубуло-інтерстиціального нефриту, підтвердженого позитивними шкірними пробами та підвищенням IgE. Це вказує на потенційний ризик для чутливих осіб.

Усі розглянуті нові джерела рослинних білків можуть певною мірою спричиняти токсикологічні ефекти та/або алергічні реакції у чутливих осіб. Що стосується токсикології, визначено різні порогові показники, такі як NOAEL, летальні дози (мг/кг маси тіла) та концентрації, що спричиняють загибель 50% тестових об'єктів (LD50 та LC50), як для водяних горошків, так і для окремих видів мікроальг, а також для їхніх фракцій та білкових інгредієнтів. Окрім токсикологічних даних, усі ці джерела можуть продукувати різноманітні вторинні метаболіти, включно з факторами-антинутрієнтами, фітоестрогенами та олігосахаридами. При низьких дозах більшість цих сполук вважаються біологічно активними і можуть мати корисний ефект, наприклад, фітова кислота, лектини та фенольні сполуки можуть знижувати рівень глюкози в крові. Інші,

такі як піримідинові глікозиди, токсичні навіть у низьких дозах для осіб із фавізмом.

У підсумку слід зазначити, що лише наявність вторинних метаболітів недостатня для визначення рівня токсичності або ризику. Крім того, зареєстровані випадки побічних ефектів нових джерел білків не суттєво відрізняються від спостережуваних у добре вивчених альтернативних джерел білку, таких як соя (Porova and Mihaylova, 2019; Ali et al., 2022).

Що стосується потенційного алергенного впливу, усі проаналізовані джерела білку потенційно можуть сприяти виникненню несприятливих реакцій у чутливих осіб різними шляхами. Внутрішня наявність алергенів або білків, подібних до алергенів, була зафіксована для всіх альтернативних джерел білку, за винятком кіноа та водяних сочевиць. У випадку сочевиці та мунг-бобів алергени визнані в межах системи класифікації WHO/IUIS (<https://allergen.org>). Однак для багатьох інших нових джерел білку така включеність відсутня, ймовірно, через їх обмежене споживання у західних раціонах та відповідно меншу увагу з боку науковців. Поточний перехід до альтернативних джерел білку вимагає поглибленого розуміння алергенності для забезпечення безпеки харчових продуктів. На даний час жодне з проаналізованих рослинних джерел не вважається пріоритетним або регламентованим алергеном, ні в Європі, ні в Сполучених Штатах, і тому їх обов'язкове зазначення на етикетках не передбачено. У відсутності європейського стандарту щодо запобіжного маркування алергенів (PAL) залишається відкритим важливе питання щодо захисту чутливих споживачів (Linders et al., 2023).

Окрім наявності внутрішніх алергенів, результати свідчать про існування підтвердженої або потенційної перехресної реактивності для всіх досліджених джерел білку, включно з кіноа та водяними сочевицями, для яких не було виявлено внутрішніх алергенів. Більше того, серед різних ідентифікованих перехресних реактивностей більшість відбувається з відомими та пріоритетними алергенами, такими як соя або арахіс. У цьому контексті варто підкреслити, що існування перехресної реактивності, навіть потенційної, є корисним критерієм

для ідентифікації алергенів, але воно зовсім не є достатнім для класифікації білку як алергену. Тим не менш, ці знання є цінними для захисту споживачів, які можуть зазнавати несприятливих алергічних реакцій через перехресну реактивність. Це особливо актуально при включенні до раціону кількох альтернативних рослинних білків.

Попри наукове усвідомлення наявності біоактивних вторинних метаболітів та алергенів у численних рослинних джерелах, оцінка ризику, пов'язаного зі споживанням перероблених продуктів на основі альтернативних білків, залишається частковою та фрагментованою. Зокрема, відсутність стандартизованих протоколів для процесів переробки ускладнює однозначне прогнозування впливу таких обробок на видалення або модифікацію алергенів та анти-поживних факторів (ANF). Крім того, індивідуальні змінні, такі як генетична схильність, спосіб життя та харчові патерни, впливають на чутливість до сенсibiliзації, що ускладнює кількісну оцінку реального ризику на рівні популяції. Хоча наукові дані підтверджують, що термічна, фізична або ферментативна обробка може сприяти зниженню вмісту алергенів та ANF, повне усунення цих компонентів не гарантується. Крім того, процеси переробки можуть порушувати функціональність та біодоступність рослинних білків і генерувати контамінанти, пов'язані з процесом, такі як продукти реакції Майяра та кінцеві продукти глікації, з потенційним негативним впливом на безпеку харчових продуктів. Поточна обмежена наявність специфічних даних щодо небажаних фітохімічних сполук та залишкових алергенів у комерційних білкових аналогах є критичною перешкодою для комплексної оцінки ризику. Тому необхідні міждисциплінарні дослідження, які дозволять оптимізувати умови обробки для забезпечення ефективного зниження алергенного та токсикологічного ризику, одночасно зберігаючи функціональні та харчові властивості інгредієнтів. У цьому контексті попередня оцінка безпеки повинна становити стратегічний елемент для підтримки безпечного та сталого переходу у харчуванні (Milana et al., 2025).

На завершення, ключові результати можна підсумувати наступним чином:

Вторинні метаболіти рослин, такі як анти-поживні фактори та фітоестрогени, були виявлені у всіх джерелах білку та в деяких похідних білкових інгредієнтах. У певних випадках вони демонструють очевидні негативні ефекти для здоров'я, а для деяких джерел білку були визначені порогові рівні.

Розглянуті джерела білку потенційно можуть сприяти виникненню несприятливих алергічних реакцій у чутливих осіб. Проте жодне з них не є визнаним або пріоритетним алергеном. Внутрішні алергени були виявлені у більшості джерел білку, за винятком кіноа та водяних сочевиць. Потенціал перехресної реактивності був встановлений для всіх джерел білку.

Технологічні обробки, зазвичай застосовувані при виробництві аналогів із білкових джерел, мають зменшувати ризик виникнення несприятливих ефектів при споживанні, особливо якщо використовуються кілька технологічних методів у комбінації. На сьогодні відсутні дослідження впливу технологічної обробки на токсичність та алергенність комерційних білкових аналогів.

2.3 Хімічна та мікробіологічна безпека нових альтернативних джерел білку

Альтернативні джерела рослинного білку ґрунтового (бобові) та водного походження (мікроальги, ряска) можуть містити хімічні та мікробіологічні контамінанти, що потребує ретельного контролю безпечності. У бобових виявлено перевищення допустимих рівнів свинцю та кадмію, а також наявність нітратів, нітритів і мікотоксинів, хоча ризики їх харчового впливу ще недостатньо вивчені; водночас EFSA схвалила білок мунго як Novel Food (Milana et al., 2024; Turck et al., 2021a).

Для мікроальг основними ризиками є накопичення важких металів, пестицидів, РСВ, мікропластику, фармацевтичних сполук та ціанотоксинів, зокрема у представників роду *Aphanizomenon* (van Apeldoorn et al., 2007; van der Spiegel et al., 2013; Markou et al., 2018, 2021; Cirés and Ballot, 2016; Hadi & Brightwell, 2021; Álvarez-González et al., 2023). Також доведено здатність

мікроальг переносити контамінанти по трофічному ланцюгу, наприклад нанопластик у *Dunaliella salina* (Kim et al., 2022).

Безпечність ряски оцінювалася EFSA у межах схвалення Novel Food, при цьому основна увага приділялася накопиченню марганцю, нітратів, діоксинів і важких металів (Turck et al., 2021b, 2021c, 2022, 2023, 2024; Регламент (ЄС) 2024/1048; Регламент (ЄС) 2025/153). Ряска, вирощена у стічних водах або агропромислових відходах, здатна накопичувати кадмій, свинець, цинк, нікель і миш'як, тоді як проростки мунго часто асоціюються зі спалахами *Salmonella spp.* та *Escherichia coli* і поширенням антибіотикорезистентності (van der Spiegel et al., 2013; Markou et al., 2018, 2021; Milana et al., 2024). Для мікроальг характерні ризики накопичення ціанотоксинів, важких металів, стійких органічних сполук і нанопластику, а також асоціація з бактеріями та вірусами, зокрема *Acanthocystis turfacea chlorella virus 1* (ATCV-1) (Milana et al., 2024). Загалом найпоширенішими забруднювачами альтернативних джерел білку є мікроелементи, важкі метали, мікотоксини, нітрати та поліциклічні ароматичні вуглеводні, причому частина з них є екзогенними контамінантами, а частина утворюється під час технологічної обробки (Banach et al., 2023; Lin et al., 2023).

У рослинних аналогах м'яса додаткову небезпеку становлять процесні забруднювачі, зокрема гетероциклічні аміни та продукти реакції Майяра, що формуються при високотемпературній обробці (>140 °C), необхідній для створення м'ясоподібної текстури (Milana et al., 2024). Мікробіологічні ризики таких продуктів переважно пов'язані з неналежними умовами виробництва та зберігання, тоді як вплив технологічних процесів на профіль забруднювачів ще недостатньо вивчений (Lin et al., 2023; Milana et al., 2024).

Європейське законодавство наразі регулює лише окремі комбінації «забруднювач–продукт», зокрема рівні Pb і Cd у бобових та ПАВ у добавках на основі *Spirulina spp.*, тоді як багато нових джерел білку, включаючи *Chlorella spp.* та ряску, залишаються недостатньо охопленими нормативною базою (Регламент (ЄС) 2023/915). Загалом мікроальги та ряска розглядаються як

перспективні альтернативні джерела білку, однак питання їхньої хімічної та мікробіологічної безпеки потребують подальших досліджень (Milana et al., 2024).

РОЗДІЛ 3. ЗАСТОСУВАННЯ, ПРИЙНЯТНІСТЬ ТА ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ПЕРЕРОБКИ РЯСКИ

3.1 Основні сфери використання водяної ряски

Протягом останнього десятиліття ряска широко вивчалася завдяки своїм різноманітним застосуванням, серед яких очищення стічних вод (фіторемедіація), харчування людини та тварин (особливо пов'язане з вмістом білку), виробництво палива (у видів з високим вмістом крохмалю), мікробна взаємодія, виробництво вторинних метаболітів і корисних хімічних речовин (рис. 3.1).

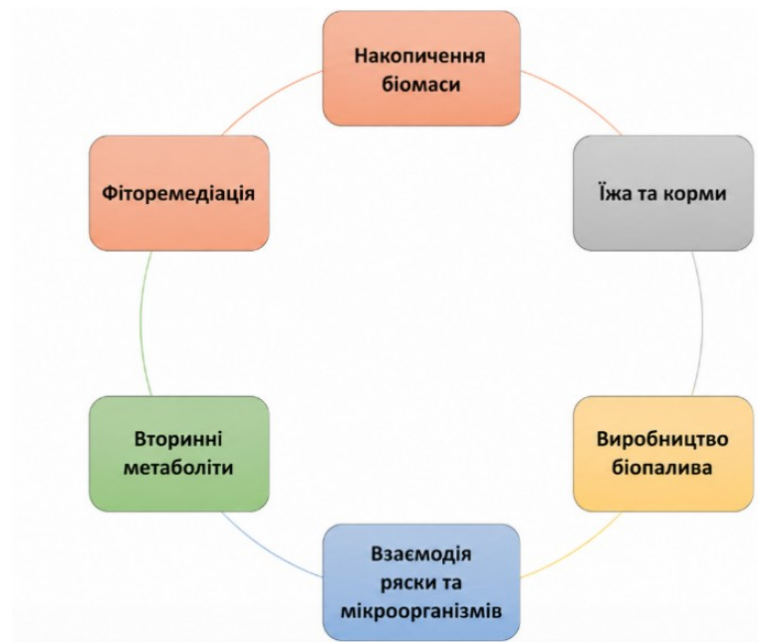


Рисунок 3.1 – Деякі способи використання видів ряски

Досягнення у сфері геноміки та досліджень метаболічних шляхів оптимізували використання ряски для численних застосувань. Ця рослина дедалі більше визнається джерелом білків високої якості: такі види, як *Lemna minor* і *Wolffia arrhiza*, можуть містити до 40% білку у перерахунку на суху масу, що є порівняним із традиційними рослинними білками, такими як соя.

Потенціал ряски у сфері очищення стічних вод є предметом дослідження, оскільки вона являє собою екологічне рішення для очищення сільськогосподарських та промислових стоків, перетворюючи забруднювачі на

цінну біомасу для кормів тварин, біодобрив або біопалива. Крім того, роль цієї рослини у секвестрації вуглецю наразі активно досліджується, що свідчить про можливий внесок у зусилля щодо пом'якшення змін клімату.

Ряска вирізняється швидким ростом, високою здатністю до поглинання поживних речовин та адаптивністю до різних середовищ, включаючи стічні води та ставки. Такі роди, як *Wolffia* і *Lemna*, можуть подвоювати свою масу за кілька днів за оптимальних умов, що робить її сталим варіантом для виробництва біомаси. Проте швидкість росту та врожайність суттєво змінюються залежно від виду та субстрату вирощування. Було запропоновано змішане культивування різних видів для підвищення загальної продуктивності. У міксотрофних умовах ряска досягала максимальної продукції біомаси приблизно 340 г м^{-2} , із білковою продуктивністю понад 40 г м^{-2} . Однак було встановлено, що вміст крохмалю в міксотрофних культурах приблизно удвічі менший порівняно з гетеротрофними умовами, що свідчить про те, що інтеграція гетеротрофних методів може оптимізувати виробництво біомаси з вищим вмістом крохмалю.

У змішаних культурах ряска демонструє вищі темпи росту та продукцію біомаси порівняно з монокультурами, особливо в таких середовищах, як свинячі стічні води. Для отримання ефективної виробничої системи необхідно ретельно обирати найбільш придатний штам серед численних місцевих різновидів та оптимізувати рівні поживних речовин. Також вибір субстрату для вирощування, наприклад стічних вод, є ключовим фактором для ефективного росту рослинної маси. Біомаса ряски є відновлюваною сировиною високої цінності, яка характеризується значним вмістом органічного азоту у формі білків і вільних амінокислот, а також важливою часткою крохмалю. Такі компоненти роблять її високоферментованою сировиною з широкими потенційними можливостями застосування. Високий вміст білків та амінокислот робить ряску цінним джерелом біодоступного азоту, який є важливим для численних біологічних процесів, що є перевагою у таких сферах, як розвиток мікробних культур або використання як харчової добавки в сільському господарстві. Крім того, ряска придатна як ідеальна сировина для виробництва біопалива завдяки високому

вмісту целюлози та крохмалю у поєднанні з низьким рівнем лігніну. Наявний крохмаль полегшує процеси біоконверсії, такі як анаеробне зброджування для виробництва біогазу та ферментація для отримання біоетанолу. У контексті біорафінерії біомаса ряски розглядається як універсальний ресурс, здатний задовольняти як енергетичні, так і харчові потреби.

Отже, незалежно від того, чи використовується вона у біорафінеріях, у виробництві біоенергії або як інгредієнт у продуктах харчування та кормах, ряска підтверджує свій статус відновлюваної та багатофункціональної сировини (Ujong et al., 2025).

3.1.1 Застосування ряски у харчових продуктах і кормах

Різні види ряски (наприклад *Lemna minor*, *Lemna gibba*, *Spirodela polyrhiza*, *Landoltia punctata*, *Wolffia globosa*, *Wolffia microscopica*) вирізняються високим вмістом основних макронутрієнтів – зокрема білків високої якості, поліненасичених жирних кислот і клітковини, а також наявністю мікронутрієнтів і біоактивних сполук. Добре збалансований амінокислотний профіль білків цих рослин робить їх харчовим ресурсом великого значення для харчування людини.

Продукти на основі зернових культур, особливо ті, що походять із пшениці, такі як хліб, печиво, макаронні вироби та снеки, є основним джерелом енергії у світовому масштабі. Однак їх високий вміст вуглеводів із високим глікемічним індексом та неповний білковий профіль створюють певні харчові обмеження. Часткова заміна пшеничного борошна борошном із ряски дозволяє покращити загальну харчову цінність цих продуктів завдяки більш збалансованому вмісту незамінних амінокислот, корисних жирних кислот, вітамінів, мінеральних речовин та антиоксидантів.

Завдяки вмісту білку, який у три рази перевищує його кількість у пшениці, ряска є оптимальною для створення збагачених харчових продуктів, таких як функціональні снеки та поживні батончики. Із ряски можна отримувати інгредієнти з високою технологічною цінністю, такі як концентровані або ізольовані білки, які використовуються для покращення консистенції, стабільності та реологічних властивостей різних категорій продукції.

У контексті зростаючого інтересу до рослинних білків, де традиційно домінують такі джерела, як соя, горох і пшеничний глютен, ряска є перспективним альтернативним джерелом, стійким та придатним для нових моделей харчування. Її використання може сприяти розробці продуктів plant-based без м'яса, молочних продуктів і яєць, відповідаючи потребам споживачів, які дбають про здоров'я, диверсифікацію джерел білку та екологічну стійкість (Xu et al., 2023).

Було розроблено спеціальні методи для ізоляції білку RuBisCO (рибулозо-1,5-бісфосфаткарбоксилази/оксигенази), який є основним листовим білком, присутнім у рясці (Nieuwland et al., 2021). Екстракція RuBisCO дозволила отримати білковий концентрат білуватого кольору, який характеризується перспективними функціональними властивостями для різних харчових застосувань. Амінокислотний склад концентрату відповідає оптимальним харчовим вимогам для споживання людиною, тоді як перетравність білку виявилася порівнянною з казеїном (Mes et al., 2022a). Однак екстракція білків із ряски є складнішою порівняно з екстракцією із зернових або бобових культур, що є типовим для білків листового походження. Це пояснюється тим, що білкові тілця інкапсульовані всередині клітинних стінок і можуть бути міцно зв'язані з полісахаридами, тому потребують більш складних методів екстракції.

Екстракція білків із ряски включає чотири основні етапи: руйнування клітин для вивільнення внутрішнього вмісту; солюбілізація білків за допомогою хімічних розчинників або специфічних фізичних умов; осадження білків, зазвичай через зміну рН в ізоелектричній точці; і, нарешті, концентрування або ізоляція отриманих білків. Ці етапи є необхідними для максимізації виходу білку та забезпечення якості кінцевого продукту. Методи екстракції можна поділити на три основні категорії: хімічні, ультразвукові та ферментативні.

Традиційні хімічні методи ґрунтуються на використанні тепла та розчинників для полегшення солюбілізації й осадження білків. Незважаючи на ефективність, підвищення температури може призводити до небажаної деградації, а лужні обробки можуть викликати реакції, що погіршують

властивості білків. Використання кислот виявилось більш ефективним, хоча ці методи мають обмеження щодо чистоти та виходу, особливо у промислових масштабах. Ультразвукові методи використовують кавітацію, спричинену ультразвуком, для руйнування клітинних стінок і швидкого вивільнення білків за помірних температур. Ця «зелена» технологія дозволяє отримувати високі концентрації білків та сприяє екстракції гідрофобних амінокислот із позитивними змінами вторинної структури білків. Ферментативна екстракція використовує специфічні протеази для деградації клітинної матриці, вивільняючи розчинні білки та біоактивні пептиди. Такі ферменти, як трипсин, папаїн і Flavourzyme, продемонстрували різну ефективність, але загалом забезпечили високий вихід і покращення функціональних властивостей екстрагованих білків.

У майбутньому будуть вивчатися інноваційні та стійкі технології, такі як subcritical water extraction (SWE) та pulsed electric field (PEF). SWE використовує воду в субкритичних умовах для екстракції білків без застосування розчинників, забезпечуючи швидші процеси, але з високими витратами у промисловому масштабі. PEF, нетермічна технологія з низьким енергоспоживанням, підвищує проникність клітин за допомогою імпульсних електричних полів, покращуючи ефективність екстракції. Однак метод PEF все ще потребує оптимізації параметрів для ряски. Підсумовуючи, хоча традиційні методи становлять добре сформовану основу, ультразвукові та ферментативні методології забезпечують більш ефективні та функціонально значущі результати. Новітні технології, за умови належного розвитку, можуть революціонізувати процес екстракції білків, роблячи його більш сталим і придатним до сучасних промислових та екологічних вимог (Sulaiman et al., 2025).

Після розгляду основних методів екстракції білків із ряски важливо також врахувати інші біоактивні сполуки, присутні в цій рослині, які значно підвищують її харчову та функціональну цінність. Окрім білків, ряска є багатим джерелом природних пігментів, таких як каротиноїди та фітостероли, відомих своїми антиоксидантними й протизапальними властивостями. Ці компоненти

відіграють важливу роль у підтриманні здоров'я людини та становлять перспективний напрям досліджень для харчових і нутрицевтичних застосувань. Біоактивні сполуки, такі як каротиноїди, фітостероли та інші пігменти, природним чином синтезуються у рясці. Як зазначалося у Розділі 2, рід *Wolffia* містить високі кількості α -токоферолу, β -каротину, лютеїну та зеаксантину – потужних антиоксидантів із протизапальними властивостями. Ці сполуки широко використовуються у харчових продуктах і нутрицевтичних засобах завдяки їх здатності захищати від раку, ішемічної хвороби серця, катаракти та ушкоджень, спричинених вільними радикалами. Ці пігменти також можуть використовуватися як натуральні барвники у соусах, морозиві, пудингах, жувальних гумках і молочних продуктах завдяки їх унікальному вигляду та смаку, а також харчовим перевагам. Крім того, рід *Wolffia* багатий на фітостероли – β -ситостерол, кампестерол і стигмастерол – які мають протипухлинні та протизапальні властивості й можуть бути цінними добавками у традиційних харчових продуктах для підтримання здоров'я людини.

Одним із можливих застосувань у харчовій галузі є продукти харчування для використання у космосі, розроблені для забезпечення астронавтів достатньою кількістю калорій та оптимальним балансом вітамінів і мінералів, необхідних для підтримання фізіологічних функцій у космічному середовищі. National Aeronautics and Space Administration (NASA) підкреслює важливість самозабезпечення систем життєзабезпечення, що є необхідним для підтримання сталості життя під час довготривалих місій. Ці системи повинні забезпечувати відновлення ресурсів, замкненість біологічних циклів і мінімальне використання витратних матеріалів. Отже, виробництво харчових продуктів у межах обмеженого космічного середовища повинно забезпечувати необхідні поживні речовини для організму людини та сприяти замиканню циклу вуглецю шляхом видалення вуглекислого газу, виробництва кисню, відновлення води та переробки відходів. У цьому контексті деякі види ряски (такі як *Lemna minor*, *Lemna gibba*, *Spirodela polyrhiza*, *Landoltia punctata* і *Wolffia globosa*) розглядаються як перспективні кандидати для вирощування у космосі завдяки

їхньому харчовому профілю та здатності інтегруватися у замкнені життєві цикли космічних середовищ існування (Xu et al., 2023).

Рослини родини ряскових (*Lemnaceae*) тривалий час споживалися в деяких країнах Південно-Східної Азії (Лаос, М'янма, Таїланд тощо). Види, які використовуються, документовані недостатньо, але часто класифікуються як *Wolffia arrhiza* і *Wolffia globosa* (також відомі та комерціалізовані під назвою Mankai). Рослини, що споживаються в Азії, здебільшого збирають із відкритих водойм. Європейське агентство з безпеки харчових продуктів (EFSA) заявило, що використання цих видів є безпечним для споживачів у Європі за умови, що вони є чистими та вирощеними в гігієнічних умовах. У грудні 2021 року це призвело до ухвалення законодавства ЄС, яке дозволяє виведення на ринок свіжих рослин *Wolffia arrhiza* та/або *Wolffia globosa* як «традиційної харчової продукції з третьої країни» відповідно до Регламенту (ЄС) 2015/2283 Європейського парламенту. Виробництво у належних гігієнічних умовах вирощування наразі є дуже обмеженим, однак найближчим часом воно зростатиме. Усі інші види родини ряскових та продукти їх переробки вважаються «новими харчовими продуктами», для яких необхідне схвалення EFSA перед виходом на європейський ринок.

Протягом останніх років у Wageningen University & Research були проведені всі необхідні наукові та технологічні дослідження для підтвердження того, що ряска може безпечно вироблятися та споживатися як овочева культура. У травні 2020 року Wageningen Plant Research подала заявку до Європейської комісії щодо дозволу на виведення на ринок Європейського Союзу рослин *Lemna minor* та *Lemna gibba* як нових харчових продуктів для використання як листових овочів. У науковому висновку EFSA від вересня 2022 року зазначалося, що концентрація марганцю у двох видах (5–21 мг/кг свіжої маси) була вищою, ніж у шпинаті, що викликало сумніви щодо безпечності.

Однак слід підкреслити, що:

- законодавство ЄС не встановлює максимальних меж споживання марганцю;

- багато поширених рослинних продуктів, таких як картопля, овес, пшениця, горіхи та нут, містять подібні або навіть вищі рівні марганцю;
- затверджені види *Wolffia globosa* та *Wolffia arrhiza* мали концентрації від 20 до 32 мг/кг свіжої маси, однак усе ж були дозволені за умови зниження вмісту марганцю нижче 6 мг/кг свіжої маси.

Оскільки вміст мінеральних речовин залежить від добрив, що використовуються, Wageningen Plant Research продемонструвала, що шляхом зниження вмісту марганцю в поживному середовищі можна отримати рівні нижче 6 мг/кг свіжої маси. Відповідно, у висновку EFSA від липня 2024 року було підтверджено, що вміст марганцю в новому харчовому продукті був знижений до значень, порівнянних з іншими листовими овочами, із встановленням максимального рівня 6 мг/кг свіжої маси.

Нарешті, Виконавчий регламент 2025/153 від 29 січня 2025 року дозволив виведення на ринок *Lemna minor* та *Lemna gibba*, включивши їх до Союзного списку нових харчових продуктів (додаток до Регламенту (ЄС) 2017/2470).

Усе це може бути досягнуто шляхом використання відповідних агрономічних систем вирощування, оскільки наші знання про гідропонне культивування значно розширилися протягом останнього десятиліття.

Крім того, впровадження повністю контрольованих систем indoor-вирощування та рециркуляції води й поживних речовин створило потребу у високосталому культивуванні, яке забезпечує високу якість рослин та контроль шкідників. На завершення, ряска є дуже легкою у вирощуванні та збиранні, що робить її придатною для використання як нової білкової культури для дрібних фермерів у країнах, що розвиваються, а також у розвинених країнах із надмірною залежністю від соєвого білку. Надзвичайно високий рівень утворення біомаси забезпечує високий прогнозований вихід білку (на гектар), який у шість–сім разів перевищує показники сої у річному обчисленні. А якщо вдасться вирощувати цю рослину на десяти рівнях один над одним за допомогою вертикального землеробства, виробництво з одного гектара справді матиме велике значення (рис. 3.2) (Our future proteins, 2023).

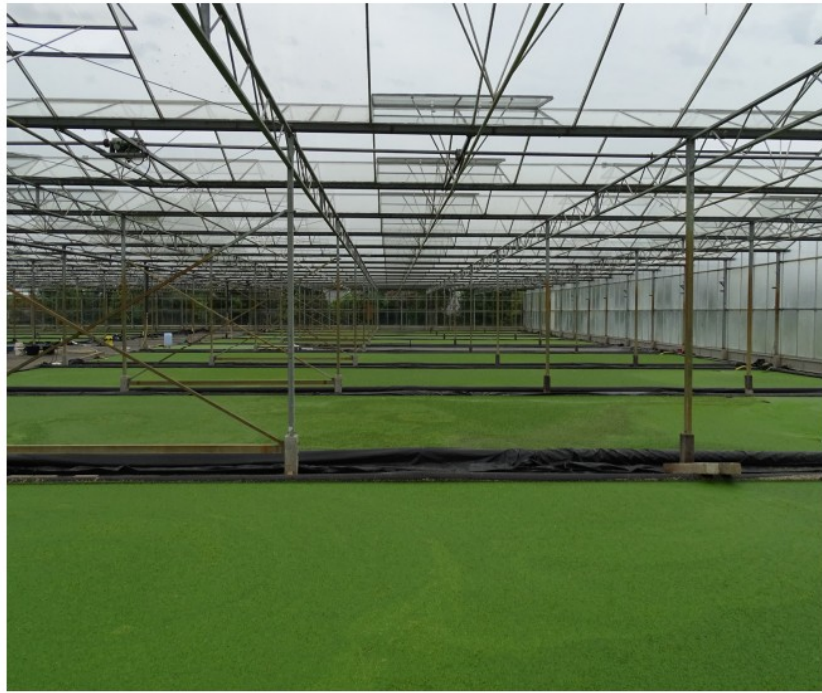


Рисунок 3.2 – Великомасштабне виробництво ряски у теплиці

Різні види ряски використовувалися як поживна речовина для худоби протягом сотень років і довели свою поживність. Корм на основі ряски може забезпечувати тварин фосфатом та азотом. *Lemna minuta* може використовуватися як харчова добавка завдяки здатності поглинати такі мікроелементи, як селен і цинк, які є необхідними для тварин. *Wolffia arrhiza*, що використовується як корм для тварин, забезпечує вміст білку, порівнянний із соєю. *Lemna minor* і *Spirodela polyrhiza* є економічно вигідними альтернативами кормам на основі соєвого борошна для риби і водоплавних птахів. У великої рогатої худоби не було виявлено жодних аномалій у перетравленні сухої речовини та білків ряски; тому вона може використовуватися як альтернативне джерело поживних речовин замість соєвого борошна (Baek et al., 2021).

Розглядаючи детальніше використання ряски у тваринництві, наведемо деякі результати щодо застосування саме *Lemna minor* як корму для різних сільськогосподарських тварин, зокрема великої рогатої худоби, овець, свиней, птиці та риби. Літературні дані щодо використання *Lemna minor* у жуйних тварин є обмеженими, хоча в оглядовій статті Soñta et al. (2019) було досліджено різні роди ряски, такі як *Spirodela*, *Lemna* та *Wolffia*, і продемонстровано, що суха

речовина та сирий білок є високодеградованими у рубці тварин. В іншому дослідженні Damru et al. (2001) визначали кількість та характеристики вовни овець породи меринос (вихід і швидкість росту вовни, діаметр волокон), які споживали ряску та інші джерела білку. Під час порівняння група, яку годували *Lemna minor*, показала вищу швидкість росту та більший об'єм вовни. Крім того, автори вважали білок *Lemna minor* хорошим «байпасним білком» для жуйних тварин, аналізуючи концентрацію аміаку в рубці тварин. Reid Jr. (2004) у своїй магістерській роботі досліджував чотири різні групи бурських кіз, яких поступово годували ряскою як заміником соєвого борошна. Наприкінці експерименту не було виявлено відмінностей між групами щодо споживання та виділення азоту, рівня азоту сечовини в сироватці крові та фосфору. Дослідження показало, що ряска є порівнянною із соєю за поживною цінністю, а також не було виявлено негативного впливу її споживання на рН рубця, кількість іонів амонію та леткі жирні кислоти. Загалом застосування *Lemna minor* у жуйних тварин виглядає перспективним, хоча у цьому напрямі тваринництва проведено ще недостатньо досліджень. *Lemna minor* використовується як кормовий заміник у свинарстві, демонструючи хороше сприйняття тваринами та покращення якості туші, зі збільшенням кількості м'яса і шкіри та зменшенням жиру. Дослідження свідчать, що білковий концентрат Lemna (LPC) має перетравність фосфору та амінокислот, порівнянну або навіть вищу, ніж у традиційних білкових борошнах, таких як рибне та соєве борошно, головним чином завдяки низькій концентрації фітатів. Крім того, експерименти на свинях у період росту показали, що *Lemna minor* разом з іншими кормовими рослинами є дуже привабливою для тварин та сприяє кращому засвоєнню поживних речовин, особливо утриманню азоту, що свідчить про ефективне використання білку. Ці результати вказують на потенціал *Lemna minor* як альтернативного та сталого джерела білку у годівлі свиней (Sosa et al., 2024).

Плаваючі водні рослини, зокрема *Lemna minor*, також випробовувалися як замітники тваринних білків у раціонах птиці. В одному дослідженні аналізували заміну кунжуту на *Lemna minor*, згодовуючи різним групам курей раціони зі

зростаючим вмістом ряски: 0% (контрольна група), 3%, 6% і 9%. Після шести тижнів відгодівлі найкращі результати щодо росту були зафіксовані у групах, які отримували 3% та 6% *Lemna minor*. У другому дослідженні оцінювали показники росту курей, яких годували раціонами із вмістом *Lemna minor* 0% (контроль), 5% і 10%, з ферментною добавкою або без неї. Найвища маса тіла була зареєстрована у контрольній групі та у групі, що отримувала 5% *Lemna minor* з ферментами. Споживання корму було найбільшим у контрольній групі, тоді як найнижчий показник спостерігався у тварин, яких годували 10% *Lemna minor* з ферментами, що свідчить про вищий рівень насичення у тварин, які споживали цю рослину. Ще один експеримент проводили на качках, яких протягом приблизно трьох місяців годували раціонами на основі рисових висівок і сої (контроль), рисових висівок та двох різних рівнів *Lemna minor* (із низьким і високим вмістом білку). Добовий приріст маси та кінцева маса були вищими зі збільшенням частки *Lemna minor* у раціоні. Крім того, у качок, яких годували цією рослиною, спостерігалось більш привабливе забарвлення шкіри та туші, а також покращення якості м'яса та економічні переваги для виробника. Загалом отримані результати свідчать про те, що *Lemna minor* є перспективним варіантом альтернативного джерела білку у кормах для птиці, з потенційними перевагами щодо сталості, продуктивності тваринництва та економіки (Sosa et al., 2024).

Багато видів риб у природі живляться плаваючими рослинами, такими як *Lemna minor*, які в деяких випадках становлять основу їхнього раціону. Goswami et al. (2022) досліджували вплив різних часток *Lemna minor* (0%, 5%, 10%, 15% і 20%) у кормі для *Cyprinus carpio* (звичайного коропа), виявивши значне збільшення кінцевої маси, швидкості росту та вмісту амінокислот при 15% і 20% додавання. Це покращення харчової цінності коропа пояснюється збільшенням у раціоні білків, ліпідів, амінокислот і омега-3 жирних кислот. Інші дослідження показали, що заміна до 50% корму для тілапії (*Oreochromis niloticus*) та прісноводних креветок (*Macrobrachium rosenbergii*) на *Lemna minor* сприяє швидшому росту та більшому приросту маси. Надалі ці ж дослідження показали, що 50% заміни є оптимальним для сома (*Clarias gariepinus*), тоді як частка понад

60% знижує темпи росту. Devi et al. (2022) оцінювали перетравність білку *in vitro* із *Lemna minor* у *Anabas testudineus* (лазячий окунь) та *Channa punctata* (плямистий змієголов), виявивши перетравність понад 50%, яка хоча й є нижчою порівняно з іншими рослинними білками, однак підтверджує її потенціал як заміни тваринних білків. Окрім використання як основного корму для риб, *Lemna minor* може застосовуватися як висушена добавка у поєднанні із соєвими бобами, органічними кислотами та рибним борошном для покращення харчової цінності водних раціонів (Sosa et al., 2024).

Така універсальність використання у тваринництві супроводжується зростаючим інтересом до потенціалу ряски як сталої альтернативи сої, яка широко застосовується як корм. Справді, розширення вирощування сої, зумовлене зростанням світового попиту, пов'язане зі значними викидами парникових газів через зміну землекористування. Натомість ряска є перспективним інгредієнтом для зниження таких викидів, сприяючи пом'якшенню екологічного впливу виробництва кормів. Крім того, її високий вміст білку, особливо при вирощуванні на органічних субстратах, таких як гній, робить її також ефективним рішенням для сталого очищення тваринницьких стоків.

У таблиці 3.1 наведено основні харчові та кормові застосування, а також види ряски, які використовуються найчастіше (Baek et al., 2021).

Таблиця 3.1 – Ряска, що використовується як харчовий продукт і корм

Харчовий продукт	Вид
Амінокислотна добавка	<i>Wolffia globosa</i>
Джерело заліза	<i>Wolffia globosa</i>
Білковий порошок	<i>Lemna spp.</i>
Традиційна їжа	<i>Wolffia arrhiza</i> і <i>Wolffia globosa</i>
Вітамін В12	<i>Wolffia globosa</i>
Корм	Вид
Велика рогата худоба	<i>Lemna spp.</i> , <i>Spirodela spp.</i> і <i>Wolffia spp.</i>
Вівці	<i>Landoltia punctata</i>
Свині	<i>Lemna minor</i>
Птиця	<i>Landoltia punctata</i> , <i>Lemna minor</i> і <i>Lemna gibba</i>

Риби	<i>Lemna gibba</i> , <i>Lemna minor</i> , <i>Lemna perpusilla</i> і <i>Spirodela polyrrhiza</i>
Кормова добавка	<i>Lemna minuta</i>

3.1.2 Інші застосування

Біомаса ряски є ідеальною сировиною для біорафінерій, з якої можна отримувати продукти з високою доданою вартістю. Завдяки своєму багатому біохімічному складу ця мікророслина знаходить застосування у різних сферах, окрім харчової та тваринницької, таких як виробництво біопалива, очищення стічних вод (фіторе mediaція), а також у фармацевтичній, медичній і нутрицевтичній галузях. Біоафінерії на основі ряски мають численні переваги порівняно з традиційними. Вони дозволяють отримувати широкий спектр продуктів – від енергетичних носіїв до біоактивних сполук – використовуючи відносно прості реакторні системи. Крім того, вони використовують природні ресурси, такі як сонячне світло, повітря та стічні води, функціонуючи в нестерильних умовах довкілля. Натомість традиційні біоафінерії, що базуються на лігноцелюлозній біомасі або цукровій тростині, часто потребують складних процесів, таких як енергоємні попередні обробки та стерильні умови, що підвищує складність і вартість виробництва. Однак однією з головних проблем використання ряски у біоафінеріях є оптимізація виходу під час розділення різних компонентів. Невеликі розміри культур ускладнюють ефективне вилучення біомаси, що робить необхідним розроблення масштабованих, енергоефективних та недорогих технологій розділення. Крім того, біоафінерії ряски відповідають моделі циркулярної економіки «zero waste», оскільки залишки після екстракції ліпідів або білків можуть бути повторно використані для виробництва біопалива або кормів для тварин.

Виробництво біоетанолу

Ряска, зокрема *Lemna minor*, багата на вуглеводи, такі як крохмаль і целюлоза, що робить її перспективною та сталою сировиною для виробництва біоетанолу. Завдяки регулюванню умов вирощування можна значно підвищити

вміст крохмалю, досягаючи значень, які у шість разів перевищують показники кукурудзи. М'яка структура біомаси та високий вміст крохмалю полегшують процес оцукрювання до глюкози – ключовий етап виробництва біоетанолу, який включає попередню обробку, ферментативний або кислотний гідроліз, ферментацію та дистиляцію. У контексті відновлюваної енергетики біоетанол є більш екологічною альтернативою викопному паливу, сприяючи зниженню викидів CO₂. Для ефективного виробництва біоетанолу крохмаль ряски, що складається приблизно з 36% амілози та 64% амілопектину, повинен бути перетворений у прості цукри шляхом ферментативного оцукрювання. Склад крохмалю, зокрема співвідношення амілоза/амілопектин, змінюється залежно від виду та впливає на ефективність конверсії. Оптимізація процесу оцукрювання потребує контролю таких факторів, як концентрація ферментів, рН, температура та час інкубації. Дослідження показали ефективність таких видів, як *Lemna punctata*, *Lemna aequinoctialis*, *Spirodela polyrhiza* та *Wolffia arrhiza*, у виробництві біоетанолу. Оптимальне співвідношення ферментів (2:1 α-амілаза : амілоглюкозидаза) та інкубація при 50 °C протягом 24 годин забезпечили вихід етанолу 0,16–0,19 г на грам сухої біомаси.

У умовах дефіциту поживних речовин або при обробці рослинним гормоном уніконазолом *Lemna punctata* може накопичувати крохмаль у межах 30–45%. Однак для комерційної конкурентоспроможності необхідно подальше підвищення вмісту крохмалю. Застосування абсцизової кислоти, яка регулює ендогенні гормони та ключові ферменти метаболізму крохмалю, виявилось ефективною стратегією. Подальше підвищення було досягнуто шляхом поєднання дефіциту поживних речовин, обробки уніконазолом та високих концентрацій CO₂, що дозволило досягти швидкості росту понад 9 г/м² на день і вмісту крохмалю 76%, з розрахунковим виходом 31 тонна крохмалю на гектар на рік. Без попередньої обробки така біомаса виділяє понад 88% глюкози, забезпечуючи вихід біоетанолу близько 16 000 літрів на гектар на рік, що приблизно у 2,6 рази перевищує показники кукурудзи.

Вирощування ряски для біоетанолу є масштабованим, але потребує ретельного контролю світла, температури, CO₂, а також використання абсцизової кислоти та уніконазолу для підтримання оптимальних умов і максимізації накопичення крохмалю, що підтверджує її потенціал як сталої сировини. Окрім біоетанолу, ряска також використовується для виробництва біогазу шляхом анаеробного зброджування органічних відходів. Її швидкий ріст і низький вміст лігніну, який зазвичай ускладнює мікробну деградацію, роблять її ідеальною біомасою для ферментерів аграрного масштабу. Вміст летких твердих речовин приблизно на 20% вищий, ніж у великої рогатої худоби, що сприяє більшому утворенню біогазу. Крім того, нижчий вміст золи покращує перетравність, а сприятливе співвідношення C/N (9,5 проти 22,7 у гною великої рогатої худоби) забезпечує вищу продукцію метану. Серед водних рослин *Lemna minor* виробляє приблизно 368 л біогазу на кг летких твердих речовин (VS), у порівнянні з 410 л/кг-VS у *Pontederia crassipes* (водяний гіацинт) та 269 л/кг-VS у *Pistia stratiotes* (водяний салат). Для оптимізації виходу біогазу досліджували такі методи, як сонячне сушіння при 35 °C і використання двоступеневих реакторів, при цьому оптимальною температурою виявлено 35 °C, що максимізує виробництво метану.

Підсумовуючи, ряска є перспективним ресурсом для сталого виробництва біоетанолу та біогазу з високим потенціалом масштабування за умови належного контролю умов вирощування та інтеграції в системи анаеробного зброджування аграрного масштабу (Ujong et al., 2025).

Фітоочищення

Ряска, відома своєю стійкістю до екстремальних умов навколишнього середовища, є ефективним ресурсом для очищення забруднювачів, присутніх у стічних водах. Вона очищує стічні води шляхом накопичення хімічних речовин через процеси адсорбції та абсорбції. Видалення амонію (NH₄⁺) є особливо важливим, оскільки цей іон сприяє евтрофікації водойм та утворенню нітратів у ґрунтових водах. Наприклад, *Landoltia punctata* поглинає іони амонію з води, накопичуючи їх як корисне джерело азоту. Надмірна присутність бору, який є

побічним продуктом промислових процесів, є токсичною для водних екосистем; було доведено, що *Lemna gibba* видаляє бор із води завдяки адсорбції, яку здійснюють апіогалактуронани – тип пектину, присутній у її клітинних стінках. Крім того, *Lemna minor* накопичує залізо, *Lemna gibba* затримує сульфат (SO_4^{2-}), а *Spirodela polyrhiza* уловлює фториди (F^-). Викиди азоту та фосфору з гною у тваринницьких господарствах сприяють евтрофікації екосистем; тому їх відновлення та повторне використання є надзвичайно важливими. Різні види ряски, такі як *Landoltia punctata*, *Lemna gibba*, *Lemna minuta*, *Lemna turionifera*, *Spirodela polyrhiza* та *Wolffia borealis*, очищують стічні води або свинячі лагуни, ефективно видаляючи азот і фосфор. Ця здатність є особливо цінною, оскільки ряска згодом може бути використана як природне добриво, повільно вивільняючи азот і фосфор у ґрунт. Крім того, ряска діє як хелатуючий агент, зменшуючи стрес від важких металів, таких як хром, кобальт, нікель, миш'як, кадмій і свинець. Потрапляння лікарських засобів у навколишнє середовище може спричиняти серйозний вплив на флору і фауну; тому фітоочищення є ключовою стратегією для їх видалення. Такі види, як *Lemna turionifera* та *Wolffia borealis*, здатні видаляти такі препарати, як парацетамол, флуоксетин, прогестерон і сульфаметоксазол. *Lemna minor* видаляє бензотриазолі, які використовуються в антикорозійних засобах та мийних продуктах, тоді як *Lemna turionifera* усуває пестициди, такі як імідаклоприд. *Lemna gibba* застосовували для очищення вод, забруднених ібупрофеном, тетрацикліном та іншими антимікробними препаратами. Стічні води промислових підприємств, інтенсивних тваринницьких господарств, лікарень і житлових будинків є важливим джерелом забруднювачів у водних екосистемах (Baek et al., 2021).

Ефективність ряски у процесах очищення стічних вод може бути додатково підвищена за допомогою бактерій, що стимулюють ріст рослин (PGPB). Дослідження спільного культивування показали, що ці бактерії підвищують ефективність видалення забруднювачів. Наприклад, *Paracoccus marcusii* W7-16 забезпечував зниження COD приблизно на 43%, видалення 100% нітратів і зменшення вмісту фосфатів більш ніж на 50%. Аналогічно, *Acidovorax*

kalamii W7-18 сприяв зниженню рівня фосфору приблизно на 20% та зменшенню COD на 43%. Ці результати демонструють потенціал інтеграції RGPB та ряски у процесах фітоочищення (Ujong et al., 2025).

Отже, фітоочищення за допомогою ряски є екологічною та економічною стратегією запобігання забрудненню довкілля та збереження водних і наземних екосистем. Проте необхідно ретельно оцінювати очисну здатність ряски та безпечну утилізацію забрудненої біомаси.

Фармацевтичні, медичні та нутрицевтичні продукти

Ряска привертає дедалі більшу увагу завдяки перспективним застосуванням у фармацевтичній та медичній галузях через численні переваги для здоров'я. Білкові гідролізати, отримані з її порошку, демонструють значну інгібуючу активність щодо ангіотензинперетворювального ферменту (АСЕ), який бере участь у регуляції артеріального тиску, що свідчить про потенційне застосування у контролі гіпертензії. *Wolffia arrhiza* має виняткову антиоксидантну активність, вищу, ніж у багатьох овочів та культур, що широко споживаються. Вона особливо багата на α -токоферол і каротиноїди, зокрема лютеїн – сполуки, відомі здатністю протидіяти оксидативному стресу. Крім того, екстракти *Lemna minor* продемонстрували протизапальні властивості щодо ідіопатичного легеневого фіброзу (IPF), знижуючи запалення, фіброз і рівні прозапальних цитокінів у експериментальних моделях. Ряска також містить численні біоактивні метаболіти з фармакологічними властивостями, зокрема антимікробними. Порівняльні дослідження показали, що *Spirodela* має вищу антибактеріальну активність, ніж *Lemna*, тоді як етанольні екстракти *Lemna minuta* були ефективними проти різних мікроорганізмів, хоча демонстрували обмежену протигрибкову активність. Білкові гідролізати також показали здатність знижувати бактеріальне та грибкове мікробне навантаження (Ujong et al., 2025). У галузі онкологічних досліджень флавоноїди, отримані з ряски, продемонстрували здатність індукувати апоптоз у клітинах мієлоїдної лейкемії та пригнічувати ріст пухлин *in vivo*. Зокрема, *Landoltia punctata* містить апігенін і вітексин – два флавоноїди, які вважаються перспективними у лікуванні

недрібноклітинного раку легень (Baek et al., 2021). Щодо метаболічного здоров'я, *Wolffia globosa* продемонструвала антидіабетичні ефекти, покращуючи контроль постпрандіальної глюкози. У рандомізованому перехресному клінічному дослідженні за участю 45 пацієнтів зі стабільним цукровим діабетом 2 типу споживання 300 мл напою на основі Mankai після вечері значно зменшувало глікемічні піки, подовжувало час до досягнення піку та покращувало різні метаболічні показники без суттєвих побічних ефектів (Ujong et al., 2025). Флавоноїди, присутні у *Spirodela polyrhiza*, мають антиадипогенні властивості, знижуючи рівень тригліцеридів, тоді як регулярне споживання ряски було пов'язане зі збільшенням рівня масляної кислоти у фекаліях – речовини, корисної для здоров'я товстої кишки та джерела енергії для колонцитів (Baek et al., 2021).

Загалом ряска є перспективним джерелом біоактивних сполук із терапевтичним потенціалом у різних клінічних напрямках. Дослідження продовжують відкривати нові функціональні молекули та механізми дії, посилюючи її роль у сфері нутрицевтики та превентивної медицини. Сектор функціональних харчових продуктів також демонструє зростаючий інтерес до цих рослин. Ряска, наприклад, є ідеальним кандидатом як рослинний замітник яєчного жовтка завдяки добрій перетравності та біодоступності, а також подібному зовнішньому вигляду. Білки RuBisCO, отримані з ряски, використовувалися для виробництва аналогів яєчного білку з хорошими властивостями гелеутворення та в'язкості, хоча все ще необхідні покращення кольору та консистенції.

Нарешті, здатність білків ряски стабілізувати емульсії повітря–олія свідчить про подальші харчові застосування з потенційними перевагами для здоров'я, особливо у контексті продуктів рослинного походження. У таблиці 3.2 узагальнено деякі з цих застосувань.

Таблиця 3.2 – Включення ряски до складу деяких харчових продуктів

Продукт	Включена ряска	Додавання (%)	Потенційні переваги для здоров'я
Снеки	<i>Wolffia globosa</i>	20–40	Підвищення вмісту білків і харчових волокон, антиоксидантні властивості та покращення мікробіологічної якості
Хліб	<i>Lemnaceae</i>	–	Покращує харчовий профіль хліба, вирішуючи проблеми розподілу білків та підвищуючи вміст основних поживних речовин
Морозиво	<i>Wolffia globosa</i>	2	Підвищений вміст білків, волокон і золи, низький вміст жиру, низьке загальне мікробне навантаження, придатність до харчових потреб людини
Рослинний заміник яйця	<i>Lemna minor</i>	12,5	RuBisCO, отриманий із ряски, забезпечує термостабільний білок, який імітує кулінарні властивості та структурні характеристики справжніх яєць. Забезпечує гнучкість у створенні емульсій без погіршення біодоступності
Яловичий бургер	<i>Lemna minor</i>	0,1–1	Покращує антиоксидантну активність, пригнічує окиснення ліпідів та сприяє подовженню терміну зберігання

Дослідження щодо включення ряски у харчові продукти демонструють перспективні результати з точки зору покращення харчового профілю. Наприклад, додавання 2% порошку ряски до морозива призвело до збільшення вмісту білку на 8% та харчових волокон на 13%. Аналогічно, включення ряски до снєків і хліба показало значні підвищення: +51% сирого білку, +147% незамінних амінокислот і +83% харчових волокон. Проте такі рецептури створюють певні технологічні та сенсорні труднощі, особливо щодо текстури, кольору та рН, які можуть впливати на сприйняття продукту споживачами. Споживання ряски також асоціюється зі збільшенням рівня вітаміну B12 (кобаламіну), що робить її можливою рослинною альтернативою червоному м'ясу. Її виражені антиоксидантні властивості також свідчать про можливість

використання як природного подовжувача shelf-life у м'ясних продуктах. Однак природний зелений колір біомаси може негативно впливати на візуальне сприйняття та сенсорну оцінку продукту.

Незважаючи на ці труднощі, харчові та функціональні переваги використання ряски є значними. Тому майбутні дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію рецептур і сенсорну адаптацію для підвищення прийнятності серед споживачів та полегшення її інтеграції у промислових масштабах (Ujong et al., 2025).

Вторинні метаболіти у рясці

Ряска багата на широкий спектр вторинних метаболітів, головним чином фенольних сполук і терпеноїдів, які відіграють фундаментальну роль у захисті рослини від біотичних та абіотичних стресів і мають численні застосування у фармацевтичній, косметичній та харчовій галузях. Фенольні сполуки, присутні у рясці, включають флавоноїди, фенілпропаноїди та таніни, відомі своїми антиоксидантними, протипухлинними, антимікробними та протизапальними властивостями. Зокрема, флавоноїди є одними з найпоширеніших метаболітів, причому такі види, як *Wolffia globosa* та *Spirodela polyrrhiza*, містять їх у значних концентраціях – відповідно до 5,85% і 4,22% сухої маси, що значно перевищує показники багатьох інших рослин, де їх вміст зазвичай коливається від 0,5% до 1,5%. Серед основних флавоноїдів апігенін і лютеолін вирізняються своїм потенціалом як допоміжні протипухлинні засоби та високою антиоксидантною активністю. Апігенін, присутній у високій концентрації в *Landoltia punctata*, та вітексин були широко досліджені через їхні протипухлинні властивості, тоді як флавоноїди *Lemna japonica* продемонстрували цитотоксичну активність щодо різних ліній пухлинних клітин людини. Лютеолін та його похідні були виявлені у численних видів, серед яких *Lemna gibba*, *Wolffia borealis* та *Wolffiella caudata*, з високим потенціалом для фармацевтичної промисловості у лікуванні запальних і дегенеративних захворювань. Гідроксикоричні кислоти, такі як кавова кислота, корична кислота, ферулова кислота та синапова кислота, є біоактивними сполуками з антибактеріальними, антиколагеназними, антиоксидантними та

протиожирінними властивостями. Присутні у різних видах ряски, ці сполуки пов'язані з позитивним впливом на здоров'я людини, включаючи захист від окисдаивних ушкоджень та зменшення запалення. Серед терпеноїдів виділяють каротиноїди (β -каротин, лютеїн, лікопін) та фітостероли (кампестерол, стигмастерол, β -ситостерол) – сполуки, що мають велике значення для фармацевтичної, харчової та косметичної промисловості. Каротиноїди відомі своїми антиоксидантними та нейропротекторними властивостями, тоді як фітостероли визнані завдяки здатності знижувати рівень холестерину в крові, що робить їх цінним засобом для профілактики та лікування серцево-судинних захворювань. Сапоніни, такі як ехінозид А та стихопозид D, присутні у рясці, були відзначені завдяки їх протипухлинній, антигіпертензивній та гіполіпідемічній активності. Ці сполуки сприяють зниженню рівня холестерину та контролю накопичення жиру в організмі, а також демонструють потенціал у боротьбі з онкологічними та метаболічними захворюваннями. Отже, ряска є надзвичайно універсальним і перспективним природним ресурсом завдяки багатому спектру вторинних метаболітів. Основними компонентами, відповідальними за біоактивні властивості ряски, є фенольні сполуки (зокрема флавоноїди) та терпеноїди, які забезпечують антиоксидантну, протизапальну, протипухлинну та іншу активність. З огляду на зростаючу увагу до сталих природних ресурсів, ряска може відігравати центральну роль у розробці інноваційних продуктів для здоров'я людини, особливо у фармацевтичній, косметичній та харчовій галузях, із врахуванням екологічної стійкості (Nikita et al., 2024; Baek et al., 2021).

Взаємодія між ряскою та мікроорганізмами

Дослідження численних взаємодій між різними родами ряски та різними класами бактерій, які поділяють однакове середовище існування з водними рослинами, швидко прогресує. Взаємодія між ряскою та мікроорганізмами не лише сприяє біоремедіації у забруднених водах, але й часто стимулює розвиток ряски (Arpenroth et al., 2015). Бактерії, що стимулюють ріст рослин (PGPB), можуть сприяти росту своїх рослин-господарів. Механізми стимуляції росту та

філогенія RGPB, пов'язаних із водними рослинами, вивчені недостатньо порівняно з наземними аналогами, які були досліджені значно глибше. Ряска є середовищем існування широкого мікробного консорціуму як усередині рослинних тканин (ендофітні бактерії), так і на поверхні рослини (епіфітні бактерії). Ендофітні бактерії, що розвиваються всередині рослин, забезпечують численні переваги для рослин-господарів як у нормальних умовах, так і в умовах стресу. Ці бактерії можуть покращувати поглинання поживних речовин і модулювати фітогормони, сприяючи росту рослин та стійкості до стресів. Дослідження ендофітних бактерій, ізольованих із ряски, виявили декілька важливих видів, серед яких *Paenibacillus lemnae*, *Janibacter spp.*, *Deinococcus spp.* та *Acinetobacter spp.*, які відіграють ключову роль у стимулюванні росту рослин, підвищенні стійкості до хвороб і захисті рослини від несприятливих умов навколишнього середовища, таких як хронічне опромінення. Бактерії, такі як *Paenibacillus lemnae*, здатні покращувати ріст ряски *Lemna minor*, збільшуючи біомасу завдяки таким властивостям, як висока здатність до адгезії та стимуляція росту. *Janibacter spp.* підвищує поглинання поживних речовин і покращує толерантність до біотичних та абіотичних стресів, тоді як *Deinococcus spp.* демонструє надзвичайний ріст за умов високого рівня хронічного опромінення, що дозволяє захищати рослину-господаря від будь-яких речовин, здатних її пошкодити. Нарешті, *Acinetobacter spp.* також має потенціал швидко набувати антимікробних генів, продукуючи ферменти β-лактамази, які можуть захищати ряску від захворювань. Отже, ці бактерії є важливими не лише для здоров'я рослини, а й для покращення поживної цінності рослинної біомаси (Zuki et al., 2022).

Ряска здатна взаємодіяти з бактеріями навколишнього середовища та формувати мікробіом, який допомагає їй у видаленні забруднювачів. Бактерії, що стимулюють ріст рослин, відіграють ключову роль у цьому процесі, оскільки підтримують здоров'я рослини, покращують засвоєння поживних речовин і захищають рослину від токсичних сполук. Наприклад, *Acinetobacter calcoaceticus* P23 був ідентифікований як один із перших RGPB, асоційованих із

ряскою, здатний розчиняти фосфати та розкласти фенол, позитивно впливаючи на ріст рослини та утворення біомаси, зокрема шляхом підвищення вмісту хлорофілу. Подальші дослідження також повідомляли про інші RGPB для ряски, серед яких: *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42, *Exiguobacterium* sp. MH3, *Aquitalea magnusonii* H3, штами *Pseudomonas*, *Ensifer* sp. SP4 та штами *Acidobacteria* (Makino et al., 2022). Місцеві бактерії, що колонізують природну ряску, становлять особливий інтерес через їхній потенціал покращення поживної цінності. Зокрема, такі бактерії, як *Aquitalea magnusonii* H3 та *Chryseobacterium* sp. 27AL, ізольовані з ряски у природних середовищах, демонструють потенційні можливості для виробництва високоякісної біомаси. Однак широкомасштабне застосування цих RGPB ускладнюється труднощами адаптації бактерій до нових середовищ, конкуренцією з автохтонними мікроорганізмами та складністю забезпечення стабільної колонізації рослин-господарів. Тому необхідно розробляти стратегії для оптимізації колонізації та довготривалої адаптації RGPB. Дослідження місцевих бактерій також показали, що основні бактерії, асоційовані з ряскою, які зберігаються на рослинах навіть у середовищі стічних вод, є особливо перспективними для забезпечення стабільного та сталого росту рослини.

На завершення, ці бактерії є необхідними для сталого виробництва біомаси та покращення поживної цінності рослин, сприяючи підвищенню здатності ряски очищувати воду та продукувати біомасу, багату на поживні речовини. Вони виконують такі основні метаболічні функції:

- біологічна фіксація азоту, забезпечуючи доступність засвоюваного азоту (NH_4^+ , NO_3^-), необхідного для синтезу білків;
- продукування фітогормонів (наприклад, індол-3-оцтової кислоти), які стимулюють ріст пластинок та фотосинтетичну активність, сприяючи синтезу білків;
- солюбілізація фосфатів та вивільнення сидерофорів, які покращують біодоступність мінеральних поживних речовин, залучених до біосинтетичних процесів;

- стабільні симбіотичні взаємодії, які модулюють азотний метаболізм та співвідношення C/N, сприяючи більшому накопиченню білків у біомасі.

Експерименти з інокуляцією відібраними мікробними штамами показали значне підвищення вмісту білку в біомасі *Lemna minor*, *Spirodela polyrhiza* та *Wolffia arrhiza* порівняно з контрольними зразками, вирощеними без інокуляції (Boonmak et al., 2023).

3.2 Сприйняття водяної ряски споживачами

Як уже зазначалося раніше, споживання ряски людиною є поширеним у деяких регіонах Південно-Східної Азії (Лаос, Таїланд, М'янма), де її використовують як овоч, відомий під назвами “Khai-Nam”, “Khai-Pum” або “Khai-Phae”, що часто перекладаються як “водяні яйця”, натякаючи на овальну форму рослини (Bhanthumnavin and McGarry, 1971). Основними видами, призначеними для споживання людиною, є *Wolffia arrhiza* та *Wolffia globosa*. Незважаючи на великий потенціал ряски як джерела рослинних білків, вона ще не є поширеною у раціоні країн Заходу. Наразі не до кінця зрозуміло, як західні споживачі сприймають ряску як харчовий продукт і в яких продуктах вони готові прийняти ряску та її похідні. Далі ми прагнемо висвітлити цей аспект, щоб надати рекомендації для оптимального впровадження ряски як харчового продукту для людини у західних суспільствах, аналізуючи, які застосування є прийнятними для споживачів і чому зміна харчових звичок є складним викликом, оскільки прийнятність та вибір їжі залежать від багатьох факторів, а сенсорні вподобання відіграють важливу роль. Класичний підхід до нових харчових альтернатив з метою зробити їх прийнятними для споживачів полягає у наданні інформації з метою переконати споживача у харчовій цінності нового продукту. Така стратегія, заснована на комунікації функціональних властивостей продукту (корисний, позитивний, доступний), може бути недостатньою, оскільки ставлення формується на основі поєднання когнітивних та емоційних елементів і, ймовірно, включає як свідомі, так і несвідомі оцінки (Gawronski and Bodenhausen, 2006). Отже, емоційні та несвідомі оцінки можуть не змінюватися під впливом початкової інформації про функціональні переваги. Крім того,

особистісні фактори також відіграють роль у прийнятності нових харчових продуктів. Дослідження, присвячені комахам, показали, що екологічні мотиви, ймовірно, сприяють їх прийняттю, коли їх просувають як сталу альтернативу (Schultz, 2001). Також харчова неофобія, тобто страх вживання нових або незнайомих продуктів, може перешкоджати споживанню нетрадиційних джерел білку, таких як ряска. Ця неофобія є індивідуальною рисою, яка варіює від людини до людини; вона особливо поширена серед маленьких дітей і зазвичай зменшується з віком (Cooke et al., 2006).

Для ефективної зміни поведінки необхідно приділяти увагу як когнітивним, так і емоційним процесам кожної людини. Це розмежування у сфері харчування може бути реалізоване через два типи оцінювання споживачем: автоматичне та усвідомлене. Вважається, що автоматичні оцінки є негайними, мимовільними, імпліцитними, заснованими на стимулах і безпосередньо пов'язаними з мотивацією наближення або уникнення. Це передбачає емоційні судження, що ґрунтуються на швидких інтуїтивних реакціях, тобто “вісцеральних відчуттях”, включаючи реакції емоційної огиди, пов'язані з їжею. Люди використовують ці реакції для швидкої оцінки нових стимулів як хороших або поганих без значних когнітивних зусиль (Duckworth et al., 2002). Такі початкові реакції можуть впливати на негайну оцінку, тоді як більш обдумане (усвідомлене) оцінювання інформації про харчовий продукт може викликати інші думки, які здатні переважити початкову автоматичну реакцію. Отже, як автоматичні, так і усвідомлені оцінки харчових продуктів вважаються предикторами готовності спробувати нові джерела їжі (Gawronski and Bodenhausen, 2006).

З метою пояснення понять автоматичних та усвідомлених оцінок, нижче наведено чотири основні гіпотези, які були предметом дослідження на вибірках реальних споживачів щодо використання ряски як харчового продукту для людини.

1. Чим більш позитивними є автоматичні та усвідомлені оцінки споживачів щодо ряски як харчового продукту, тим більшою буде їхня готовність спробувати або придбати ряску для споживання людиною.

Певний харчовий продукт може паралельно викликати обидва типи оцінювання (автоматичне та усвідомлене); однак автоматичні оцінки є швидшими та можуть впливати на усвідомлені, які формуються повільніше (Gawronski and Bodenhausen, 2006).

2. Чим більш позитивною є автоматична оцінка ряски як харчового продукту для людини, тим більш позитивною буде і усвідомлена оцінка.

Споживачі загалом мають позитивне ставлення до сталого розвитку. Отже, надання позитивної інформації про екологічну стійкість нового харчового продукту підвищує позитивне ставлення до нього. Проте було доведено, що така інформація впливає на навмисні (тобто усвідомлені) оцінки, але не на автоматичні та швидкі. Аналогічна ситуація спостерігається і щодо здорового харчування: ставлення є позитивним, однак обробка інформації відбувається свідомо і, відповідно, повільніше.

3. Люди, яким надається інформація про харчові та екологічні переваги ряски як продукту харчування для людини, мають вищу ймовірність сформулювати позитивну усвідомлену оцінку порівняно з людьми, яким така позитивна інформація не надається.

Оцінка нового харчового продукту ґрунтується не лише на міркуваннях щодо здоров'я та сталого розвитку, але й значною мірою залежить від очікувань щодо смаку та доречності продукту, які часто формуються ще до споживання лише на основі візуального сприйняття. Зовнішній вигляд може викликати бажання скуштувати продукт та сформулювати сенсорні очікування, таким чином сприяючи його прийнятності. Продукт класифікується у першу найбільш імовірну категорію через процеси автоматичної категоризації (несвідомі когнітивні процеси) або мотивованої категоризації (індивідуальні потреби та бажання), а також через аналогії, засновані на частковій схожості. Для того щоб новий харчовий продукт був прийнятий, його характеристики повинні бути

узгодженими та легко співвідноситися зі знайомими категоріями або продуктами. Сприйняття узгодженості, на яке також впливає контекст використання, є визначальним для позитивної оцінки. Отже, успіх нових харчових продуктів, таких як ряска, залежить від їхньої здатності викликати асоціації з уже відомими характеристиками та усталеними контекстами споживання.

4. Люди, які бачать зображення ряски у відповідному контексті, більш схильні до позитивних автоматичних та усвідомлених оцінок ряски як харчового продукту для людини порівняно з тими, хто бачить зображення ряски у невідповідному контексті.

Для перевірки чотирьох гіпотез було проведено два дослідження, які узагальнені на рис. 3.3.

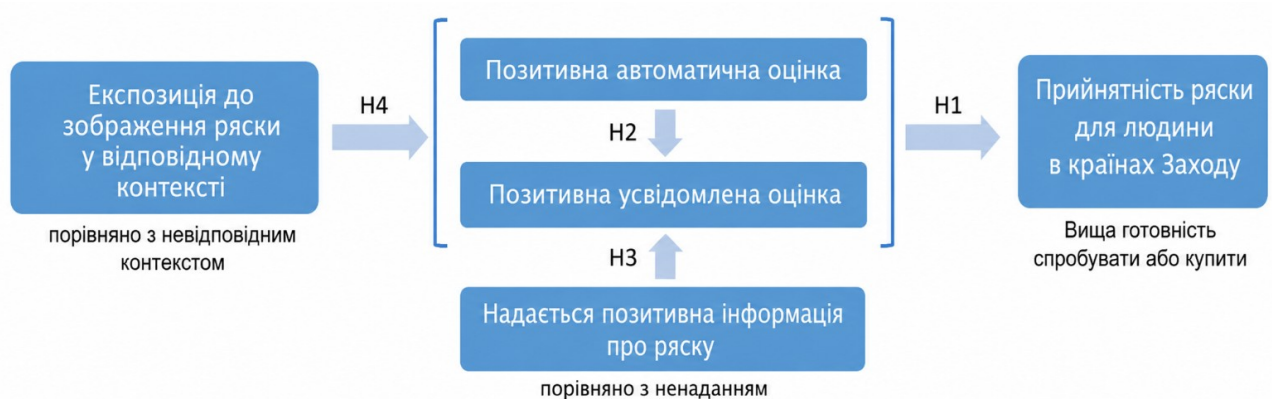


Рисунок 3.3 – Основні гіпотези щодо використання ряски як харчового продукту для людини та їхні наслідки

Перше дослідження було зосереджене на сприйнятті споживачами ряски та визначенні найбільш і найменш відповідних контекстів її споживання. Отримані результати стали основою для другого дослідження, у якому аналізувалися ефекти відповідності контексту (відповідний проти невідповідного) та інформації (наявність проти відсутності), використовуючи різні кулінарні застосування ряски. Учасники, які загалом були відкритими до цієї ідеї, асоціювали ряску із солоними стравами, особливо холодними (наприклад, салатами та сендвічами), тоді як солодощі та випічка вважалися

невідповідними. Продукт сприймався як корисний, інноваційний і потенційно привабливий за умови належної презентації та ефективної комунікації через «food-блогерів» і кулінарні медіа. Перше дослідження, яке мало якісний характер, визначило найбільш цінні характеристики ряски, зокрема її свіжий зелений вигляд, що робить її візуально схожою на інші листові овочеві продукти. Було встановлено, що ряска сприймається як овоч і вважається придатною для солоних страв, у яких традиційно використовуються овочі. Зокрема, споживачі, здається, приймають ідею використання ряски як інгредієнта у стравах, де овочі зазвичай є звичним компонентом, наприклад у салатах та гарячих і холодних основних стравах.

Друге дослідження, яке мало кількісний підхід, підтвердило, що споживачі (нідерландські) загалом готові спробувати та придбати страви на основі ряски. Результати показали, що представлення ряски у складі «відповідної» страви, наприклад основної страви або салату, робить продукт більш прийнятним порівняно з приготуваннями, які вважаються невідповідними, такими як десерти та торти. Страви з ряскою оцінювалися більш позитивно, коли оцінка була усвідомленою (обдуманною), однак не було виявлено жодного впливу відповідності контексту на процес автоматичної оцінки. Це свідчить про те, що інтерпретація відповідності потребує свідомого осмислення і не є автоматичною сама по собі. Іншим важливим аспектом другого дослідження є вплив інформації про харчові та екологічні переваги ряски. Коли учасників інформували про корисні для здоров'я та екологічні аспекти ряски, їхня оцінка покращувалася, але лише у випадку, якщо ряска була представлена у відповідному харчовому контексті. Навпаки, якщо ряска демонструвалася у нетрадиційних стравах, таких як десерти чи тістечка, позитивна інформація не могла покращити оцінку і в деяких випадках навіть виявлялася контрпродуктивною, призводячи до нижчої прийнятності. Це явище може пояснюватися психологічною реакцією опору (психологічною реактивністю), коли споживачі чинять опір тому, що сприймають як нав'язування, як у випадку солодких страв, які рекламуються як корисні. Водночас інформація як загальне поняття, здається, є важливою;

справді, учасники в обох дослідженнях відзначали «нестачу інформації» та запитували відомості про смак, користь для здоров'я й екологічні переваги в умовах, коли такі деталі не надавалися. Це свідчить про те, що певна інформація є необхідною при впровадженні ряски як харчового продукту для людини, однак можливість негативних ефектів вимагає ретельного опрацювання такого контенту (de Beukelaar et al., 2019).

Ще одним важливим аспектом, який впливає з дослідження, є значення адаптації продукту до кулінарного контексту. Люди більш схильні приймати ряску як їжу, коли вона представлена у рецептах, що вважаються «відповідними» для овочів. Проте взаємозв'язок між відповідністю та прийнятністю не є автоматичним, а потребує глибшого осмислення з боку споживачів. Це дослідження показало, що саме усвідомлена (раціональна) оцінка страв із ряскою є ключовим фактором визначення їхньої прийнятності, тоді як автоматична самооцінка, хоча й зазнає впливу неофобії, не є вирішальною для прийняття продукту. З точки зору маркетингу, інформація про харчову цінність ряски здається надзвичайно важливою, однак її необхідно подавати обережно. Асоціація ряски з бобовими культурами та її просування як овочу з високим вмістом білку можуть бути складними для реалізації, оскільки овочі зазвичай не асоціюються з білками. Проте ця концепція може працювати краще у контекстах, де бобові вже є частиною раціону. Крім того, просування рецептів, які включають ряску як повноцінну страву, наприклад як основний прийом їжі, може стати корисною відправною точкою для підвищення прийнятності продукту.

Наявність продукту в магазинах також розглядається як необхідна умова для подолання розриву між наміром придбати та реальною поведінкою – явища, відомого як «розрив між наміром і поведінкою», яке вже було задокументоване в попередніх дослідженнях у контексті здорових снєків. Відсутність смачного та відповідного контексту разом із обмеженою доступністю високоякісних продуктів може призвести до провалу впровадження продукту, як це сталося з появою та подальшим зникненням продуктів на основі комах (House, 2016).

Окрім доступності продукту, надання рецептів також слід розглядати як передумову успіху. Якщо споживачі не знатимуть, як готувати «лемну», вони її не купуватимуть!

Окрім основних гіпотез, друге дослідження виявило вплив харчової неофобії. Учасники з високим рівнем неофобії (страху перед новою їжею) виявилися менш готовими приймати ряску як харчовий продукт, що негативно впливало як на автоматичні, так і на усвідомлені оцінки. Це свідчить про те, що хоча більш відкриті споживачі можуть легко адаптуватися до ряски, більш консервативні сегменти населення можуть мати труднощі з її прийняттям як їжі. Навпаки, респонденти з високими «біосферними» цінностями (тобто ті, хто цінує екологічні продукти) продемонстрували більшу схильність приймати ряску як їжу для людини в усвідомленій оцінці та в показниках прийнятності, однак жодного такого ефекту не було виявлено щодо автоматичної оцінки. Це свідчить про те, що орієнтація на споживачів, які цінують органічні продукти, може бути перспективним ринком для продуктів на основі ряски.

Незважаючи на просування та доступність інформації про харчову цінність, важливо зазначити, що прийнятність ряски не гарантує автоматично її купівельну поведінку. Майбутні дослідження повинні глибше вивчати ефективність цільових маркетингових стратегій шляхом просування ряски як здорового та модного продукту через вибрані канали (наприклад, спеціалізовані магазини, соціальні мережі, гастрономічні блоги). Крім того, ряска належить до категорії «нових» харчових продуктів відповідно до європейського законодавства про харчові продукти, що зумовлює необхідність проведення суворих досліджень безпечності харчових продуктів перед їх масштабним виходом на ринок. Важливим обмеженням дослідження є склад вибірки, використаної для оцінювання, яка може бути нерепрезентативною для середньостатистичного (нідерландського) населення. Зокрема, вона складалася переважно з осіб із високим рівнем освіти, які зазвичай більш схильні до експериментування з новими харчовими продуктами. Відповідно, результати

могли б відрізнятися за більш різноманітної вибірки, враховуючи, що старші вікові групи, як правило, менш відкриті до змін (de Beukelaar et al., 2019).

До цього моменту було проаналізовано очікування щодо ряски у контексті її прийнятності, однак без урахування важливого аспекту, пов'язаного з дегустацією. Тому доцільно звернутися до ще одного дослідження, проведеного Mes et al. (2022b), основною метою якого було оцінити переносимість споживання ряски (*Lemna minor*) здоровими дорослими людьми порівняно з традиційним харчовим продуктом зі схожими кулінарними характеристиками – шпинатом (*Spinacia oleracea*). Це дослідження за участю людей, окрім фундаментального аспекту харчової безпеки, дало змогу включити й сенсорну оцінку, яка є критично важливим чинником успіху продукту. Таким чином, проведене дослідження аналізувало вплив на загальні показники здоров'я, а також на смакові характеристики протягом одинадцяти послідовних днів споживання 170 г *Lemna minor* як овоча у різних видах страв.

Оцінювання сенсорних характеристик (загальна привабливість, приємний аромат, хороший смак, приємні відчуття у роті, приємний післясмак) та готовності повторно спробувати продукт здійснювали за шкалою від 1 до 10 балів. У середньому базові страви отримали подібні оцінки, серед яких найменш схвально був оцінений ризото (рис. 3.4). Лише для пасти було виявлено статистично значущу різницю ($p < 0,05$) щодо загального смакового сприйняття, відчуттів у роті та післясмаку в перший день тестування між ряскою та шпинатом. Статистично значущу різницю також було зафіксовано для післясмаку «кішу», спожитого на сьомий день (рис.3.4). Із сенсорних оцінок очевидно, що продукти на основі *Lemna minor* та шпинату були сприйняті майже однаково позитивно. Учасники дослідження (нідерландці) регулярно споживають шпинат, тому добре знайомі зі смаком і текстурою цього овочу (Mes et al., 2022b).

Учасникам повідомили, чи належать вони до групи ряски або шпинату, оскільки дослідники не мали наміру маскувати смак і текстуру продуктів. Значуща різниця, виявлена в перший день тестування, може бути пов'язана з

певним рівнем харчової неофобії. Майбутні дослідження мають передбачати тестування учасників на наявність високого рівня харчової неофобії.

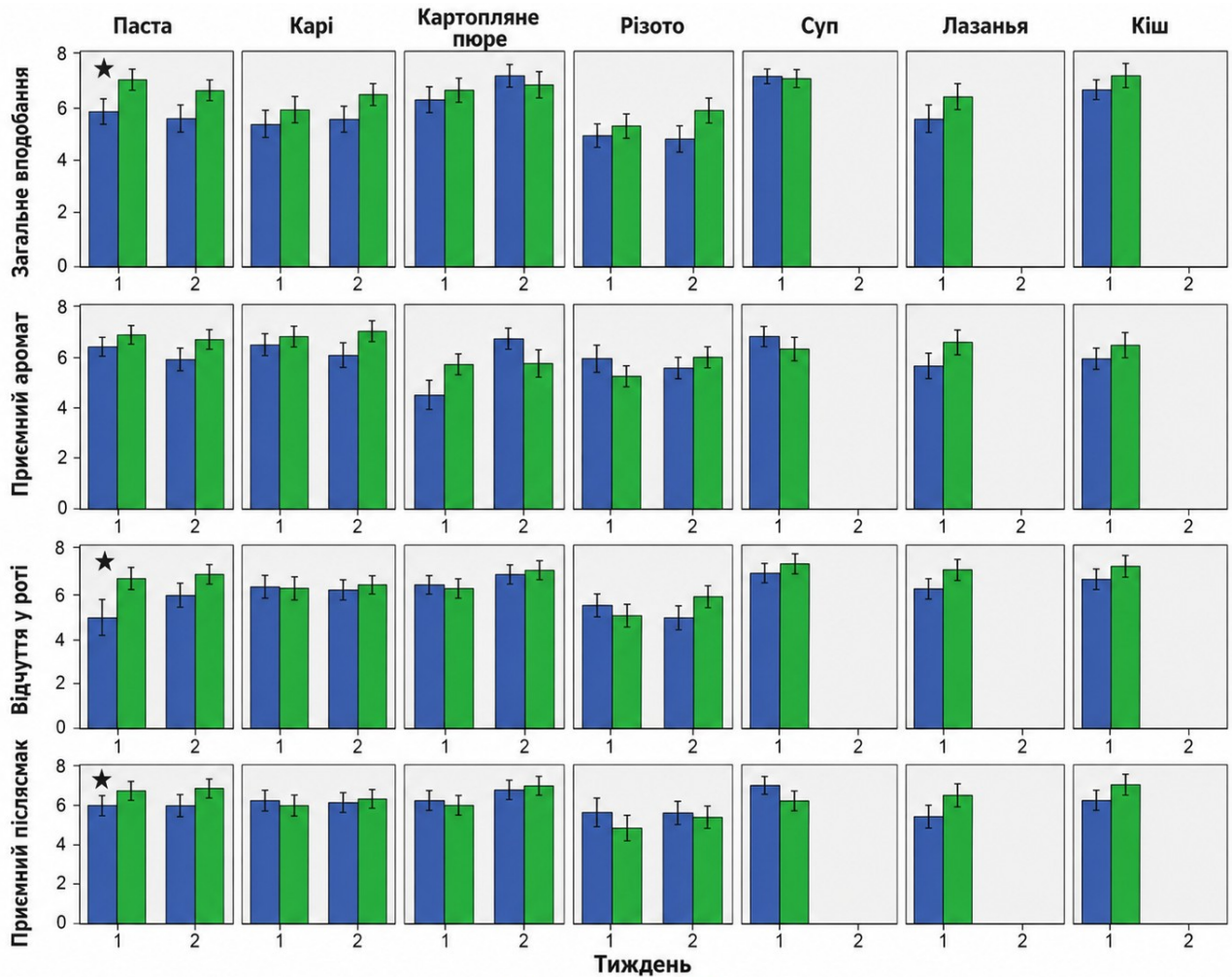


Рисунок 3.4 – Сенсорний аналіз різних страв за тижнем випробування (синім кольором – продукти на основі ряски; зеленим кольором – продукти на основі шпинату)

* позначає статистичну різницю між ряскою та шпинатом ($p < 0,05$)

Інше спостереження, що впливає із сенсорних оцінок, полягає в тому, що оцінки другого тижня були подібними до оцінок першого тижня. При споживанні одного й того ж продукту протягом одинадцяти днів поспіль смак міг би стати неприємним, однак цього не було зафіксовано в даних проведеного дослідження. Смак *Lemna minor* не є дуже вираженим і може бути таким, до якого легко звикають. На завершення, надання інформації про харчові та екологічні переваги ряски позитивно впливає на її прийнятність як харчового

продукту для людини, за умови що вона використовується в належному прийомі їжі, тобто має практичний і кулінарний сенс.

Таким чином, підкреслюється важливість введення ряски в відповідні контексти для підвищення ймовірності її прийняття в західному суспільстві, яке є інформаційно насиченим і керованим маркетингом (Mes et al., 2022b).

3.3 Економічні аспекти використання ряски

Останніми роками ряска викликала зростаючий інтерес не лише через свої агрономічні та харчові властивості, вже розглянуті в попередніх розділах, але й через свій економічний та комерційний потенціал. Цей підрозділ має на меті дослідити основні ринкові динаміки, що характеризують цю нову культуру, аналізуючи тенденції зростання, структуру галузі, а також виклики та можливості, що впливають на її розвиток. Особлива увага приділяється факторам, які визначають поширення та комерціалізацію ряски в різних сферах застосування, зокрема в глобальному та європейському контексті. Світовий ринок ряски формує сектор, що розвивається і має високий потенціал: прогнозується зростання з 89 млн доларів США у 2025 році до приблизно 257 млн доларів США до 2035 року, що підтримується середньорічним темпом зростання (CAGR) на рівні 11%. Це розширення зумовлене зростаючим попитом на альтернативні джерела білку, екологічно дружні рішення для виробництва харчових продуктів, кормів, очищення стічних вод та виробництва біопалива, у яких ряска відіграє дедалі важливішу роль. Завдяки високому вмісту білку (до 45% від сухої маси), швидкому росту та ефективному поглинанню ресурсів, ряска є реальною альтернативою сої та іншим традиційним бобовим культурам. Її застосування поширюється у сферах харчування людини та тварин, зокрема у веганській дієті, аквакультури та сталому тваринництві. Одночасно культура пропонує інноваційні рішення в екологічній сфері завдяки здатності очищувати стічні води, сприяти поглинанню вуглецю та підтримувати процеси виробництва біопалива.

Зростаючий інтерес з боку урядів, компаній і дослідницьких центрів, а також нормативна база, спрямована на декарбонізацію та сталість, створюють

динамічне та перспективне середовище для глобальної комерціалізації цього виду. У цьому контексті співпраця між промисловістю та наукою відіграє ключову роль у розвитку передових технологій біопереробки, культивування та переробки, які підвищують вихід продукції та ефективність виробництва, одночасно зменшуючи екологічний вплив. Перспективи ринку є особливо сприятливими в Північній Америці, Європі та Азійсько-Тихоокеанському регіоні, де технологічні інновації, сприятливе регулювання та зростання обізнаності споживачів прискорюють промислове впровадження ряски. Зростання сектору підтримується розвитком біотехнологічних рішень, таких як екстракція білків, ферментація, сушіння та мікронізація. Крім того, удосконалені системи культивування та нові формати продуктів сприятимуть зміцненню позицій ряски в контексті сталого сільського господарства та біоекономіки. Глобальний сектор ряски домінують великі транснаціональні корпорації агропродовольчої, біотехнологічної галузей та виробництва альтернативних білків, які утримують від 50% до 60% частки ринку та мають річні доходи понад 1,5 мільярда доларів США. Серед операторів першого рівня, таких як Cargill, ADM та DSM-Firmenich, комерціалізація базується на великомасштабному виробництві, передових дослідженнях та інвестиціях у точне землеробство, штучний інтелект і інноваційні технології екстракції. Компанії другого рівня, серед яких Parabel USA, Hinoman Ltd. та GreenOnyx, із доходами від 300 до 900 мільйонів доларів США, орієнтуються на локальні та регіональні ланцюги постачання, використовуючи запатентовані біотехнологічні процеси та масштабовані дистрибуційні мережі. Нарешті, малі капіталізаційні компанії, такі як LemnaPro, Plantible Foods та DryGro, є підприємствами, орієнтованими на дослідження та розробки і нішеві інгредієнти з високою доданою вартістю. З часткою ринку від 10% до 15% вони працюють на пілотному рівні, орієнтуючись на преміальні ринки, такі як спортивне харчування, високоякісні корми та нутрицевтичні продукти. Уся промислова екосистема характеризується зростаючою вертикальною інтеграцією та вираженою орієнтацією на інновації,

що позиціонує ряску як стратегічну культуру в переході до більш сталих та ефективних агропромислових систем.

Європейський ринок білків із ряски (*Lemna minor*) очікує значного зростання в період між 2025 і 2035 роками, що зумовлено попитом на сталі рослинні білки, політичною підтримкою переходу до нових харчових систем та зростанням екологічної обізнаності споживачів. За оцінками, середньорічний темп зростання (CAGR) становитиме близько 20%, а ринкова вартість збільшиться з менш ніж 2 мільйонів до понад 11 мільйонів доларів США, зокрема завдяки інвестиціям у передові технології вирощування та екстракції. У Північній Європі ринок отримує переваги завдяки сильній екологічній політиці, усталеним рослинним дієтам і проєктам декарбонізації. Південна Європа, завдяки сприятливому клімату та водним ресурсам, має високий виробничий потенціал у синергії з середземноморською дієтою. У Східній Європі низькі витрати та зростаюча увага до сталого розвитку підтримують поступове розширення, тоді як Західна Європа, з розвиненим агропродовольчим сектором і вимогливими споживачами, є основним рушієм впровадження (FMI, 2025). Зростання ринку стимулюється інноваціями, співпрацею між промисловістю та наукою, а також широким спектром застосувань у харчовій, нутрицевтичній, тваринницькій та екологічній галузях. На європейському ринку білків із ряски існують різні виклики, що впливають на його розвиток і поширення, а також певні можливості. Серед основних перешкод – відносно високі виробничі витрати та труднощі масштабування. Технології, що використовуються для вирощування, збирання та переробки білків із ряски, є дорогими та потребують значного споживання енергії, води та поживних речовин. Це ускладнює впровадження великомасштабного економічно ефективного виробництва, уповільнюючи впровадження культури в харчовій, кормовій та біоенергетичній галузях.

Іншим критичним аспектом, уже згаданим у попередньому розділі, є обізнаність і прийняття з боку споживачів. В Європі ряска все ще залишається маловідомим джерелом білку, і її низька впізнаваність серед населення є

суттєвим бар'єром для поширення. Для сприяння комерціалізації продукту необхідно впроваджувати цілеспрямовану освіту споживачів з метою формування довіри щодо безпечності, смаку та екологічної стійкості культури. Попри ці обмеження, існує значна кількість можливостей для ринку білків із ряски. Однією з головних є зростаючий попит на альтернативні джерела білку. Європа демонструє високий інтерес до рослинних і сталих білкових джерел; ряска повністю відповідає цим вимогам завдяки низькому екологічному впливу та відповідності політикам Європейського зеленого курсу (Green Deal). Крім того, розвиток технологій біопереробки та екстракції робить виробництво білків із ряски дедалі більш економічно доступним. Ці досягнення, разом із низькоенергетичними методами збирання та високоефективними способами екстракції, позиціонують ряску як комерційно життєздатне джерело білку для харчової, нутрицевтичної та кормової промисловості.

Як уже неодноразово зазначалося, ряска має надзвичайно швидкий темп росту, здатна подвоювати біомасу кожні 2–3 дні, що дозволяє отримувати до 20 урожаїв на рік за оптимальних умов. Це відповідає річній продуктивності, яка може перевищувати 20 тонн/га сухої речовини з вмістом білку від 20% до 40%, залежно від виду та умов живлення. Такі показники роблять ряску висококонкурентною порівняно з такими культурами, як соя, горох та інші подібні рослини, якщо розглядати вихід білку на квадратний метр посівної площі. Системи культивування ряски можуть впроваджуватися у відкритих установках, таких як штучні ставки. Вони характеризуються низькими початковими витратами, однак мають підвищений ризик контамінації. Альтернативно можуть використовуватися закриті та контрольовані системи, такі як водні теплиці, аквапонічні установки або вертикальне фермерство, які забезпечують вищі санітарно-гігієнічні стандарти та є більш придатними для виробництва харчових продуктів для людини, хоча й потребують значніших початкових інвестицій. Інтеграція з використанням очищених стічних вод, біофільтрів або супутніх культур дозволяє додатково зменшити витрати на

добрива, вписуючи культивування у моделі циркулярної економіки та сприяючи відновленню поживних речовин у контексті сталого розвитку.

З операційної точки зору витрати на управління залишаються відносно низькими завдяки невеликій потребі в робочій силі та можливості автоматизації більшості процесів збирання. Основні витрати зосереджені на етапах переробки та зберігання біомаси, особливо на сушінні, яке є критично важливим для забезпечення харчової безпеки та стабільності продукту в часі. Водночас можливість отримання білкового борошна і функціональних інгредієнтів із високою доданою вартістю, які вже використовуються у харчових добавках, хлібобулочних виробках і м'ясозамінниках, дозволяє значною мірою компенсувати ці витрати. У сучасному контексті переходу до більш сталих агропродовольчих систем ряска розглядається як одна з найперспективніших нових культур, що пропонує цікаві перспективи прибутковості для сільськогосподарських підприємств, зацікавлених у диверсифікації виробництва з екологічним спрямуванням та високою ринковою доданою вартістю. Ланцюг постачання ряски складається з чотирьох основних етапів: виробництво (або постачання як сировини), переробка (з біорефінуванням або без нього), дистрибуція та комерціалізація (рис. 3.5).

Ряска використовується у ланцюгу постачання у трьох основних формах:

- свіжа сировина, призначена для розмноження (садивний матеріал/пропагули) або безпосереднього споживання як харчовий продукт;
- висушена сировина, що використовується для базової переробки, наприклад для екстракції гідроколідів або виробництва кормів;
- сировина, перероблена у біорефінерії, для отримання білків, крохмалю, мінеральних солей та інших високоцінних супутніх продуктів.

Останніми роками дослідники та компанії все більше орієнтуються на виробництво продуктів із високою доданою вартістю, використовуючи біорефінерії та передові технології, такі як анаеробне зброджування, ферментація, трансестерифікація, піроліз або гідротермальна ліквіфікація (Sonnenberg et al., 2007). Ці процеси дозволяють перетворювати біомасу ряски на

широкий спектр продуктів, зокрема функціональні харчові продукти, хімічні сполуки та біопаливо.

Вираз «біорефінерія» вживається, коли йдеться про процес переробки біомаси на паливо, енергію та хімічні речовини. Біорефінерія (від англ. biorefinery) – це комплекс, що використовує сировину біологічного походження (агропромислові відходи, харчові відходи, біомасу) для виробництва продуктів.

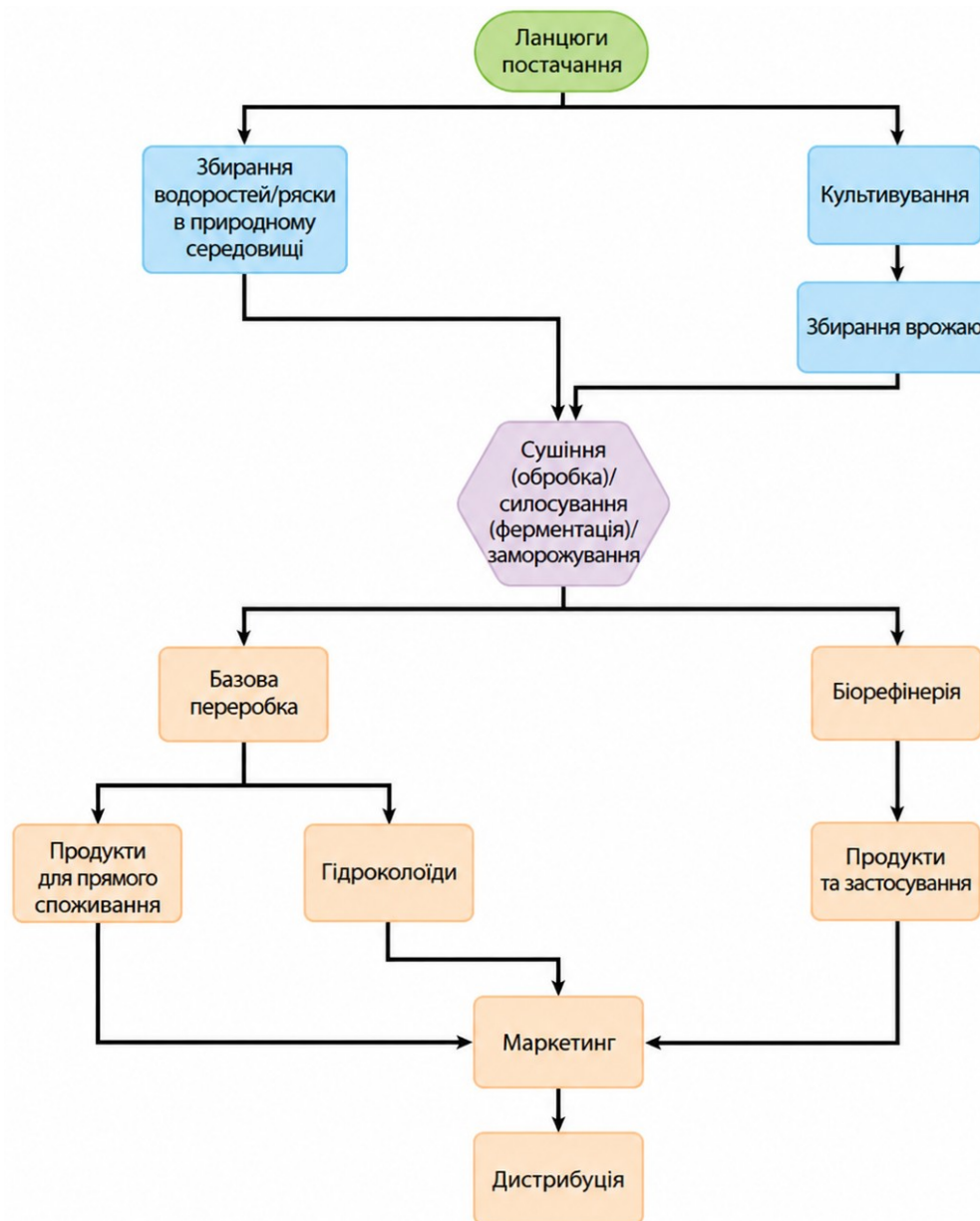


Рисунок 3.5 – Ланцюги постачання продуктів на основі ряски

Рішення виробників уздовж ланцюга постачання безпосередньо впливають на операційні витрати, продуктивність і рентабельність. Такі рішення включають: обсяг виробництва, рівень вертикальної інтеграції (тобто скільки

етапів ланцюга постачання управляються всередині підприємства) та способи координації з іншими учасниками ланцюга постачання (Zilberman et al., 2019). Стратегічним елементом є вибір виду ряски, оскільки він визначає вміст білку, частоту збору врожаю та тривалість виробничого циклу. Крім того, кожен етап ланцюга постачання передбачає технічні рішення, які впливають на постійні витрати (часто неповернені) та змінні витрати, а також на масштабованість системи. Наукова література підкреслює важливість оцінювання витрат, пов'язаних із масштабуванням виробництва (Seghetta et al., 2016; Emblemstvig et al., 2020), однак багато аналізів базуються на спрощених лінійних моделях, які не завжди відображають реальну складність виробничих процесів. Тому такі припущення слід інтерпретувати обережно, особливо в експериментальних або стадійно-розробних умовах. Хоча багато цих досліджень виконано в суміжних сферах, таких як вирощування водоростей, вони підкреслюють важливий міжгалузевий аспект, що також є актуальним для ланцюга постачання ряски, а саме роль навчання з часом як стратегічного інструменту підвищення ефективності та рентабельності.

У нових галузях, таких як виробництво ряски, процес навчання є ключовим чинником оптимізації використання ресурсів і зниження витрат. Цей процес розвивається через операційний досвід, ефекти масштабу, технологічні інновації та заміщення виробничих факторів. Навчання є особливо важливим на етапі культивування, де економічні ефекти є більш значущими порівняно з етапом промислової переробки (Hochman and Palatnik, 2022). Інші ініціативи для максимізації прибутку та екологічних переваг вирощування ряски включають системи інтегрованої мультитрофічної аквакультури (ІМТА). Ці системи передбачають вирощування видів на різних трофічних рівнях у межах взаємодоповнювальної екосистеми, де відходи або продукти одних видів стають ресурсами для інших. Виробництво ряски може бути поєднане з аквакультурою (Lawrence et al., 2021) або з тваринництвом великої рогатої худоби та свиней.

Експериментальне дослідження, проведене Devlamynck (2021) на пілотній установці площею 140 м², оцінювало вирощування ряски на стоках, отриманих

після обробки свинячого гною, з використанням отриманої біомаси як прямого корму для свиней. Результати показали, що це рішення є економічно доцільним лише за умови врахування додаткової вартості очищення стічних вод. Коли вміст азоту у стоках знижується до $0,23 \text{ кг N/m}^3$, економічні втрати зменшуються приблизно до $-0,40 \text{ €}$ на кг сухої речовини (СР). У цьому сценарії оціночна вартість ряски як корму становить близько $0,22 \text{ €/кг СР}$, тоді як як енергетичної біомаси – приблизно $0,31 \text{ €/кг СР}$. Найвища потенційна вартість спостерігається при використанні в харчуванні людини (до $1,72 \text{ €/кг СР}$), хоча цей напрям має обмеження, пов'язані з регуляторними вимогами та соціальною прийнятністю. Системи ІМТА також сприяють перехопленню стоку добрив із інтенсивно оброблюваних сільськогосподарських територій, запобігаючи шкоді водним екосистемам. Сучасні промислові системи ІМТА перетворюють органічні відходи на корисну біомасу, повертають у довкілля воду, очищену від азоту та фосфору, знижують витрати на фільтрацію завдяки ролі ряски як біофільтра та обмежують утворення відходів. Таким чином, ряска відіграє ключову роль у розвитку систем ІМТА, знижуючи витрати на корм і рівень забруднення та підтримуючи систему фільтрації (Alexander et al., 2016). Ці принципи належать до парадигми циркулярної біоекономіки, яка спрямована на усунення відходів через компостування, повторне використання та переробку матеріалів, забезпечуючи каскадне використання біомаси з максимальним доданим значенням і мінімізацією споживання природних ресурсів та викидів у довкілля. Такий підхід створює як екологічні, так і економічні переваги, оскільки відновлення відходів або біологічних побічних продуктів запобігає забрудненню та сприяє їх комерційному використанню з доданою вартістю, що в кінцевому підсумку підтримує економічне зростання (Hochman and Palatnik, 2022).

Промислове вирощування ряски має значний потенціал у контексті диверсифікації виробництва та сталого розвитку, однак стикається з численними технічними, економічними та регуляторними викликами. До них належать високі витрати на вирощування та збирання, екологічна мінливість, невизначеність урожайності та нестача відповідної інфраструктури. Доступні

технології є дорожчими порівняно з наземними культурами, тоді як низький рівень довіри між учасниками ланцюга постачання та інформаційна асиметрія стримують масштабне впровадження. Для сприяння розвитку сектору необхідно формувати стійкі та інклюзивні ланцюги постачання, інвестувати в дослідження та людський капітал, а також впроваджувати чітке нормативне регулювання, засноване на наукових доказах. Особливе значення має циркулярна біоекономіка, яка дозволяє повністю використовувати біомасу, зменшуючи відходи та екологічний вплив. Водночас для досягнення цих цілей необхідно усувати ринкові провали за допомогою цілеспрямованої державної політики, такої як ціноутворення на викиди вуглецю та стимули для утилізації та захоплення поживних речовин.

ВИСНОВКИ

У контексті глобального білкового переходу ряска постає як інноваційний і стійкий ресурс, здатний ефективно відповідати на зростаючі виклики, зумовлені підвищенням попиту на білок, змінами клімату та тиском на природні ресурси. Її особливо багатий поживний профіль – з високим вмістом білків, незамінних амінокислот, харчових волокон і мікроелементів – робить її ідеальним кандидатом для часткової заміни або доповнення традиційних тваринних і рослинних джерел білку.

Окрім харчової цінності, ряска має численні екологічні переваги. Її здатність до швидкого росту та можливість вирощування в закритих системах, таких як вертикальне фермерство, значно підвищує врожайність з одиниці площі, суттєво перевищуючи показники традиційних культур, таких як соя. Крім того, використання належним чином очищених стічних вод для її культивування зменшує навантаження на ресурси прісної води, тоді як відсутність потреби у родючих сільськогосподарських ґрунтах запобігає конкуренції з іншими важливими продовольчими культурами. Усі ці характеристики сприяють зниженню екологічного сліду виробництва білку та формуванню більш стійкої харчової системи, здатної протистояти змінам клімату та демографічним викликам.

Впровадження ряски в раціон людини, однак, порушує важливі санітарно-гігієнічні та харчові питання, які потребують ретельного врахування та контролю. Її природна здатність поглинати забруднювачі з води, зокрема важкі метали та пестициди, робить необхідним суворий контроль якості води та систем вирощування, щоб гарантувати безпечність кінцевого продукту. Паралельно, контроль бактеріального навантаження та запобігання грибковим або іншим біологічним забрудненням вимагають розробки ефективних гігієнічних протоколів, особливо у випадку великомасштабного виробництва або інтегрованих аквакультурних систем. Важливо також враховувати наявність

антинутриєнтів, таких як оксалати, а також потенційний алергенний потенціал, який необхідно дослідити для мінімізації ризиків для споживачів.

Ще одним ключовим аспектом є сенсорні характеристики – смак, консистенція, колір і запах, які відіграють вирішальну роль у комерційному та масовому прийнятті цього нового харчового ресурсу. Інвестиції в дослідження та розробки є критично важливими для покращення смакових властивостей і інтеграції ряски в існуючі харчові раціони.

У технологічному контексті розвиток передових методів екстракції та використання біоактивних сполук, що містяться в рясці, є необхідним для підвищення її засвоюваності, біодоступності та біоактивності. Такі технології, як ферментація, ферментативна обробка, ультразвукова екстракція або структурні модифікації білків, можуть зменшити вміст антинутриєнтів і покращити сенсорні властивості кінцевих продуктів, посилюючи їх харчову цінність та розширюючи застосування у харчовій і нутрицевтичній промисловості.

Часто недооціненим аспектом є соціальна прийнятність ряски, яка розглядається на двох основних рівнях: практичному та ідеологічному. Практична прийнятність пов'язана з фактичною інтеграцією цього нового джерела білку у формовані харчової звички. Для сприяння її поширенню ряска повинна сприйматися як доступний, простий у приготуванні, смачний продукт, сумісний із повсякденними моделями споживання. Технологічні інновації та діяльність учасників харчового ланцюга, включно з виробниками та шеф-кухарями, є ключовими для створення продуктів, що відповідають цим вимогам.

Ідеологічна прийнятність стосується культурного, політичного та соціального виміру харчових змін. Зменшення споживання тваринного білку часто пов'язане з глибоко вкоріненими цінностями, звичками та уявленнями, які можуть викликати опір або недовіру до нових альтернатив. Для подолання цих бар'єрів необхідний інклюзивний і партисипативний підхід, що залучає споживачів до процесів інформування, освіти та спільного створення рішень, уникаючи нав'язування змін, які можуть сприйматися як примусові або елітарні. У цьому контексті державна політика повинна підтримувати білковий перехід

через стимули, інформаційні кампанії та підтримку локальних ініціатив, що сприяють визнанню ряски як стійкого та культурно прийнятного ресурсу.

З соціально-економічної точки зору, поширення ряски як нової білкової культури також буде залежати від ефективності політик підтримки, здатності розвивати ефективні ланцюги постачання та конкурентоспроможності кінцевої ціни на ринку. Необхідним є мультидисциплінарний і кооперативний підхід, що об'єднує науковців, агрономів, харчових технологів, економістів, учасників харчової індустрії та споживачів для подолання технічних, нормативних і ринкових викликів.

Підсумовуючи, ряска є ресурсом із високим потенціалом для формування більш стійкої, адаптивної та інклюзивної харчової системи. Її повна реалізація потребує інтегрованого та міждисциплінарного підходу, який поєднує технологічні інновації, наукову обґрунтованість, захист громадського здоров'я та активну участь споживачів. За умови далекоглядного та відповідального впровадження ряска може суттєво сприяти формуванню більш справедливого, безпечного та екологічно збалансованого майбутнього, пропонуючи інноваційну та практичну білкову альтернативу для вирішення сучасних нутриційних, екологічних та економічних викликів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Akyüz, A., Ersus, S., 2024. Оптимізація макроелементів розчину Хогланда як культурального середовища для підвищення вмісту білку у рясках (*Lemna minor*). *Food Chemistry* 453, 139647. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139647>

Alexander, K.A., Angel, D., Freeman, S., Israel, D., Johansen, J., Kletou, D., Meland, M., Pecorino, D., Rebours, C., Rousou, M., Shorten, M., Potts, T., 2016. Підвищення сталості аквакультури в Європі: діалоги зі стейкхолдерами щодо інтегрованої мультитрофічної аквакультури (ИМТА). *Environmental Science & Policy* 55, 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.09.006>

Ali, A., Devarajan, S., Manickavasagan, A., Ata, A., 2022. Антинутрієнтні фактори та біологічні обмеження у використанні рослинних білкових продуктів, у: Manickavasagan, A., Lim, L.-T., Ali, A. (ред.), *Рослинні білкові продукти*. Springer International Publishing, Cham, с. 407–438. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91206-2_14

Álvarez-González, A., Uggetti, E., Serrano, L., Gorchs, G., Escolà Casas, M., Matamoros, V., Gonzalez-Flo, E., Díez-Montero, R., 2023. Потенціал мікрководоростей, вирощених у стічних водах, для сільськогосподарських цілей: оцінка забруднювачів, важких металів і патогенів. *Environmental Pollution* 324, 121399. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121399>

Appenroth, K.-J., Sree, K.S., Bog, M., Ecker, J., Seeliger, C., Böhm, V., Lorkowski, S., Sommer, K., Vetter, W., Tolzin-Banasch, K., Kirmse, R., Leiterer, M., Dawczynski, C., Liebisch, G., Jahreis, G., 2018. Харчова цінність видів ряски роду *Wolffia* (Lemnaceae) як їжі для людини. *Frontiers in Chemistry* 6. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00483>

Appenroth, K.-J., Sree, K.S., Böhm, V., Hammann, S., Vetter, W., Leiterer, M., Jahreis, G., 2017. Харчова цінність ряски (Lemnaceae) як їжі для людини. *Food Chemistry* 217, 266–273. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.116>

Appenroth, K.-J., Sree, K.S., Fakhoorian, T., Lam, E., 2015. Відродження досліджень ряски та її застосувань: звіт з 3-ї міжнародної конференції з ряски. *Plant Molecular Biology* 89, 647–654. <https://doi.org/10.1007/s11103-015-0396-9>

Baek, G., Saeed, M., Choi, H.-K., 2021. Ряска: використання, метаболіти та культивування. *Applied Biological Chemistry* 64, 73. <https://doi.org/10.1186/s13765-021-00644-z>

Banach, J.L., van der Berg, J.P., Kleter, G., van Bokhorst-van de Veen, H., Bastiaan-Net, S., Pouvreau, L., van Asselt, E.D., 2023. Альтернативні білки для заміників м'яса та молочних продуктів: безпека харчових продуктів і майбутні тенденції. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 63, 11063–11080. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2089625>

Bergmann, B.A., Cheng, J., Classen, J., Stomp, A.-M., 2000. In vitro селекція географічних ізолятів ряски для очищення свинячих стічних вод. *Bioresource Technology* 73, 13–20. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00137-6](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00137-6)

Bhanthumnavin, K., McGarry, M.G., 1971. Wolffia arrhiza як можливе джерело недорогого білку. *Nature* 232, 495–495. <https://doi.org/10.1038/232495a0>

Bianco, M., Ventura, G., Calvano, C.D., Losito, I., Cataldi, T.R.I., 2022. Новий підхід до виявлення алергенних білків у нових продуктах харчування. *Talanta* 240, 123188. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2021.123188>

Bog, M., Appenroth, K.-J., Sree, K.S., 2019. Ряска (Lemnaceae): її молекулярна таксономія. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 3, 117. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00117>

Boonmak, C., Kettongruang, S., Buranathong, B., Morikawa, M., Duangmal, K., 2023. Бактерії, асоційовані з ряскою, як стимулятори росту рослин для Spirodela polyrrhiza у стічних водах птахофабрики. *Archives of Microbiology* 206, 43. <https://doi.org/10.1007/s00203-023-03778-4>

Brishti, F.H., Chay, S.Y., Muhammad, K., Ismail-Fitry, M.R., Zarei, M., Saari, N., 2020. Текстурований білок машу як сталий харчовий ресурс: функціональні властивості та харчова якість. *Food & Function* 11, 8918–8930. <https://doi.org/10.1039/D0FO01463J>

Cabanillas, B., Jappe, U., Novak, N., 2018. Алергія на бобові: сучасні досягнення. *Molecular Nutrition & Food Research* 62, 1700446. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201700446>

Chen, Y., McGee, R., Vandemark, G., Brick, M., Thompson, H.J., 2016. Аналіз харчових волокон бобових культур. *Nutrients* 8, 829. <https://doi.org/10.3390/nu8120829>

Chentouh, M.M., Codreanu-Morel, F., Boutebba, A., et al., 2022. Оцінка алергенного ризику коров'ячого гороху та перехресної реактивності. *Pediatric Allergy and Immunology* 33, e13889. <https://doi.org/10.1111/pai.13889>

Chikuvire, T.J., Muchaonyerwa, P., Zengeni, R., 2018. Біомаса та вміст азоту *Wolffia arrhiza* залежно від стічних вод. *Water Environment Research* 90, 2066–2074. <https://doi.org/10.2175/106143017X15131012188204>

Cho, C.Y., Oles, C., Nowatzke, W., Oliver, K., Garber, E.A.E., 2017. Перехресна реактивність бобових і горіхів. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 409, 5999–6014. <https://doi.org/10.1007/s00216-017-0528-y>

Chua, M.X., Cheah, Y.T., Tan, W.H., Chan, D.J.C., 2023. Інноваційна система вирощування ряски з використанням воскових покриттів. *Environmental Research* 224, 115544. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115544>

Cirés, S., Ballot, A., 2016. Ціанобактерії, що утворюють токсичні «цвітіння». *Harmful Algae* 54, 21–43. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2015.09.007>

Cooke, L., Carnell, S., Wardle, J., 2006. Харчова неофобія у дітей 4–5 років. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity* 3. <https://doi.org/10.1186/1479-5868-3-14>

Cox, A.L., Eigenmann, P.A., Sicherer, S.H., 2021. Клінічна значущість перехресної алергії у харчових алергіях. *J Allergy Clin Immunol Pract* 9, 82–99. <https://doi.org/10.1016/j.jaip.2020.09.030>

Damry, Nolan, J.V., Bell, R.E., Thomson, E.S., 2001. Ряска як білковий корм для овець. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 14, 507–514. <https://doi.org/10.5713/ajas.2001.507>

de Beukelaar, M.F.A., Zeinstra, G.G., Mes, J.J., Fischer, A.R.H., 2019. Ряска як їжа для людини: вплив контексту харчування та інформації. *Food Quality and Preference* 71, 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2018.06.005>

Devlamynck, R., 2021. Стале виробництво білку на основі сільськогосподарських стоків із використанням ряски. Гентський університет.

Dhamaratana, S., Methacanon, P., Charoensiddhi, S., 2024. Хімічний склад та in vitro перетравність ряски (*Wolffia globosa*) та її полісахаридних і білкових фракцій. *Food Chemistry Advances*. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100867>

Duckworth, K.L., Bargh, J.A., Garcia, M., Chaiken, S., 2002. Автоматична оцінка нових стимулів. *Psychological Science* 13, 513–519. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00490>

Edelman, M., Appenroth, K.-J., Sree, K.S., 2020. Редакційна стаття: біологічна хімія та застосування ряски. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.615135>

Emblemsvåg, J., Kvadsheim, N.P., Halfdanarson, J., Koesling, M., Nystrand, B.T., Sunde, J., Rebours, C., 2020. Стратегічні аспекти створення морської індустрії на основі водоростей для кормів. *Journal of Applied Phycology* 32, 4159–4169. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02234-w>

FMI, 2025. Ринок ряски. Future Market Insights, Inc. <https://www.futuremarketinsights.com/reports/duckweed-market>

Frota, K.D.M.G., Lopes, L.A.R., Silva, I.C.V., Arêas, J.A.G., 2018. Молекулярний профіль і наявність інгібіторів трипсину в білкових ізолятах квасолі вігни. *Revista Caatinga* 31, 202–208. <https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n123rc>

Gawronski, B., Bodenhausen, G.V., 2006. Асоціативні та пропозиційні процеси в оцінюванні: огляд змін імпліцитних і експліцитних установок. *Psychological Bulletin* 132, 692–731. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.132.5.692>

González, A., Cruz, M., Losoya, C., Nobre, C., Loredó, A., Rodríguez, R., Contreras, J., Belmares, R., 2020. Їстівні гриби як нове джерело білку для

функціональних продуктів. *Food & Function* 11, 7400–7414.
<https://doi.org/10.1039/D0FO01746A>

Goswami, R.K., Sharma, J., Shrivastav, A.K., Kumar, G., Glencross, B.D., Tocher, D.R., Chakrabarti, R., 2022. Вплив раціону з *Lemna minor* на ріст і метаболізм коропа. *Scientific Reports* 12, 3711. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07743-x>

Gregory, P.J., Mayes, S., Hui, C.H., Jahanshiri, E., Julkifle, A., Kuppusamy, G., Kuan, H.W., Lin, T.X., Massawe, F., Suhairi, T.A.S.T.M., Azam-Ali, S.N., 2019. Недостатньо використовувані культури: огляд досліджень. *Planta* 250, 979–988. <https://doi.org/10.1007/s00425-019-03179-2>

Guhsl, E.E., Hofstetter, G., Hemmer, W., Ebner, C., Vieths, S., Vogel, L., Breiteneder, H., Radauer, C., 2014. Перехресна реактивність алергенів рослинного походження. *Molecular Nutrition & Food Research* 58, 625–634. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201300153>

Hadi, J., Brightwell, G., 2021. Безпечність альтернативних білків: технологічні, екологічні та регуляторні аспекти. *Foods* 10, 1226. <https://doi.org/10.3390/foods10061226>

Halima, O., Najar, F.Z., Wahab, A., Gamagedara, S., Chowdhury, A.I., Foster, S.B., Shaheen, N., Ahsan, N., 2022. Алергени сочевиці: оновлений огляд. *Food Chemistry: Molecular Sciences* 4, 100109. <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2022.100109>

Hochman, G., Palatnik, R.R., 2022. Економіка водних рослин: випадок водоростей і ряски. *Annual Review of Resource Economics* 14, 555–577. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-111920-011624>

House, J., 2016. Прийнятність їжі на основі комах у Нідерландах. *Appetite* 107, 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2016.07.023>

Hu, Z., Fang, Y., Yi, Z., Tian, X., Li, J., Jin, Y., He, K., Liu, P., Du, A., Huang, Y., Zhao, H., 2022. Харчова цінність та антиоксидантна активність ряски. *LWT* 153, 112477. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112477>

Ifie, I., Olatunde, S., Ogbon, O., Umukoro, J.E., 2021. Вплив технологічної обробки на фітохімічний склад ряски. *International Journal of Vegetable Science* 27, 294–302. <https://doi.org/10.1080/19315260.2020.1781320>

Imron, M.F., Kurniawan, S.B., Soegianto, A., Wahyudianto, F.E., 2019. ФітореMediaція метиленового синього за допомогою ряски. *Heliyon* 5, e02206. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02206>

Jahreis, G., Brese, M., Leiterer, M., Schäfer, U., Böhm, V., 2016. Бобові борошна як джерело білку і харчових волокон. *Ernährungs Umschau* 63.

Jahreis, G., Schäfer, U., 2011. Олія ріпаку та її користь для здоров'я. у: Nuts and Seeds in Health and Disease Prevention. Academic Press, pp. 967–974. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375688-6.10114-8>

James, C.A., Welham, S., Rose, P., 2023. Алергенність їстівних водоростей. *Journal of Applied Phycology* 35, 339–352. <https://doi.org/10.1007/s10811-022-02880-2>

Jha, U.C., Nayyar, H., Parida, S.K., Deshmukh, R., von Wettberg, E.J.B., Siddique, K.H.M., 2022. Підвищення білку в бобових культурах за допомогою «омікс»-технологій. *International Journal of Molecular Sciences* 23, 7710. <https://doi.org/10.3390/ijms23147710>

Kim, L., Cui, R., Kwak, J.I., An, Y.-J., 2022. Передача нанопластику в харчовому ланцюгу та вплив на травні ферменти риб. *Journal of Hazardous Materials* 440, 129715. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129715>

Kuehdorf, K., Jetschke, G., Ballani, L., Appenroth, K.-J., 2014. Формування туріонів у рясці *Spirodela polyrhiza*. *Physiologia Plantarum* 150, 46–54. <https://doi.org/10.1111/ppl.12065>

Kumar, D., Kumar, S., Verma, A.K., Sharma, A., Tripathi, A., Chaudhari, B.P., Kant, S., Das, M., Jain, S.K., Dwivedi, P.D., 2014. Гіперчутливість до білків бобових. *Nutrition* 30, 903–914. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2013.11.024>

Kurek, M.A., Onopiuk, A., Pogorzelska-Nowicka, E., Szpicer, A., Zalewska, M., Póltorak, A., 2022. Нові джерела білку для застосування в м'ясо-

альтернативних продуктах: перспективи та виклики. *Foods* 11, 957.
<https://doi.org/10.3390/foods11070957>

Lawrence, L., Sorrels, S., Sivaram, S., Lam, E., Hochman, G., 2021. Підвищення прибутковості та сталості аквакультури через інтеграцію з ряскою. *Archives of Agriculture Research and Technology* 2.

Lee, C.J., Yangcheng, H., Cheng, J.J., Jane, J., 2016. Характеристика крохмалю та виробництво етанолу з ряски та кукурудзи. *Starch - Stärke* 68, 348–354. <https://doi.org/10.1002/star.201500126>

Lin, X., Duan, N., Wu, J., Lv, Z., Wang, Z., Wu, S., 2023. Потенційні ризики безпеки рослинних продуктів харчування: джерела та методи виявлення. *Trends in Food Science & Technology* 138, 511–522.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.06.032>

Linders, Y.F.M., Lentz, L.R., Blom, W.M., Michelsen-Huisman, A., Strikwerda, J., van Dijk, L.M., Knulst, A.C., Houben, G.F., van Os-Medendorp, H., Holleman, B.C., 2023. Маркування алергенів: проблеми та шляхи вдосконалення. *Food Control* 147, 109561. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109561>

Ma, Y.B., Zhu, M., Yu, C.J., Wang, Y., Liu, Y., Li, M.L., Sun, Y.D., Zhao, J.S., Zhou, G.K., 2018. Масштабний скринінг ряски для виробництва крохмалю. *Plant Biology* 20, 357–364. <https://doi.org/10.1111/plb.12679>

Makino, A., Nakai, R., Yoneda, Y., Toyama, T., Tanaka, Y., Meng, X.-Y., Mori, K., Ike, M., Morikawa, M., Kamagata, Y., Tamaki, H., 2022. Виділення бактерій, що стимулюють ріст ряски. *Microorganisms* 10, 1564.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms10081564>

Markou, G., Chentir, I., Tzovenis, I., 2021. Мікроводорості та ціанобактерії як їжа: законодавчі та безпекові аспекти. у: *Cultured Microalgae for the Food Industry*. Academic Press, pp. 249–264. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821080-2.00003-4>

Markou, G., Wang, L., Ye, J., Unc, A., 2018. Використання агровідходів для вирощування мікроводоростей і ряски: ризики забруднення. *Biotechnology Advances* 36, 1238–1254. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.04.003>

Mes, J.J., Esser, D., Oosterink, E., Van Den Dool, R.T.M., Engel, J., De Jong, G.A.H., Wehrens, R., Van Der Meer, I.M., 2022a. Клінічне дослідження якості білку з ряски. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 73, 251–262. <https://doi.org/10.1080/09637486.2021.1960958>

Mes, J.J., Esser, D., Somhorst, D., Oosterink, E., Van Der Haar, S., Ummels, M., Siebelink, E., Van Der Meer, I.M., 2022b. Вплив ряски на здоров'я та смакові переваги. *Plant Foods for Human Nutrition* 77, 121–127. <https://doi.org/10.1007/s11130-022-00952-9>

Milana, M., van Asselt, E.D., van der Fels-Klerx, H.J., 2024. Безпека альтернативних білкових джерел: огляд. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13377>

Milana, M., van Asselt, E.D., van der Fels-Klerx, H.J., 2025. Токсикологічні та алергенні ефекти нових білкових джерел. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 24, e70123. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70123>

Misra, A., Kumar, R., Mishra, V., Chaudhari, B.P., Raisuddin, S., Das, M., Dwivedi, P.D., 2011. Алергени зеленої квасолі та їх характеристика. *Clinical & Experimental Allergy* 41, 1157–1168. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2222.2011.03780.x>

Navruz-Varli, S., Sanlier, N., 2016. Харчова цінність кіноа. *Journal of Cereal Science* 69, 371–376. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.05.004>

Nieuwland, M., Geerdink, P., Engelen-Smit, N.P.E., Van Der Meer, I.M., America, A.H.P., Mes, J.J., Kootstra, A.M.J., Henket, J.T.M.M., Mulder, W.J., 2021. Виділення білку ряски та його гелеутворювальні властивості. *ACS Food Science & Technology* 1, 908–916. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.1c00009>

Nikita, Sharma, M., Sharma, M., 2024. Дослідження ряски як найменшої квіткової рослини. *International Journal of Plant Environment* 10, 1–11. <https://doi.org/10.18811/ijpen.v10i01.01>

Our future proteins: a diversity of perspectives, 2023. VU University Press, Amsterdam. ISBN 978 90 8659 882 3

Our World in Data, 2024. OWID Homepage. <https://ourworldindata.org/>

- Popova, A., Mihaylova, D., 2019. Антинутрієнти в рослинній їжі. <https://doi.org/10.2174/1874070701913010068>
- Quintieri, L., Nitride, C., Angelis, E.D., Lamonaca, A., Pilolli, R., Russo, F., Monaci, L., 2023. Альтернативні білки: харчові застосування та безпека. *Nutrients* 15, 1509. <https://doi.org/10.3390/nu15061509>
- Reid Jr., W.S., 2004. Використання ряски як білкової добавки для жуйних тварин. North Carolina State University.
- Ridlo, A., Pringgenies, D., Perangin-angin, R.A.B., Ariyanto, D., 2023. Фітохімічні властивості мікрowodоростей. *Journal of Integrated Coastal Research* 15, 438–447. <https://doi.org/10.20473/jipk.v15i2.36740>
- Rusoff, L.L., Blakeney, E.W., Culley, D.D., 1980. Ряска як джерело білку. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 28, 848–850. <https://doi.org/10.1021/jf60230a040>
- Russo, G.L., 2009. Омега-3 та омега-6 жирні кислоти та їх вплив на здоров'я. *Biochemical Pharmacology* 77, 937–946. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2008.10.020>
- Schreuders, F.K.G., Sagis, L.M.C., Bodnár, I., Erni, P., Boom, R.M., Van Der Goot, A.J., 2021. Текстура рослинних білкових сумішей. *Food Hydrocolloids* 118, 106753. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106753>
- Schultz, P.W., 2001. Структура екологічної свідомості. *Journal of Environmental Psychology* 21, 327–339. <https://doi.org/10.1006/jevp.2001.0227>
- Seghetta, M., Hou, X., Bastianoni, S., Bjerre, A.-B., Thomsen, M., 2016. Життєвий цикл макроводоростей для біорефінерії. *Journal of Cleaner Production* 137, 1158–1169. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.195>
- Shaheen, N., Halima, O., Akhter, K.T., Nuzhat, N., Rao, R.S.P., Wilson, R.S., Ahsan, N., 2019. Протеоміка алергенів сочевиці. *Food Chemistry* 297, 124936. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.06.003>
- Shewry, P.R., 2024. Використання пшениці як джерела білку. *Journal of Cereal Science* 117, 103899. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2024.103899>

Simopoulos, A.P., 2006. Співвідношення жирних кислот у харчуванні та хронічні захворювання. *Biomedicine & Pharmacotherapy* 60, 502–507.

Sonnenberg, A., Baars, J., Hendrickx, P., 2007. Біорефінерія та біоекономіка. Wageningen University and Research Centre.

Sońta, M., Rekiel, A., Batorska, M., 2019. Використання ряски у тваринництві. *Annals of Animal Science* 19, 257–271. <https://doi.org/10.2478/aoas-2018-0048>

Sońta, M., Więcek, J., Szara, E., Rekiel, A., Zalewska, A., Batorska, M., 2023. Ряска на основі гноївки: продуктивність і властивості. *Agronomy* 13, 1951. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071951>

Sosa, D., Alves, F.M., Prieto, M.A., Pedrosa, M.C., Heleno, S.A., Barros, L., Feliciano, M., Caroch, M., 2024. Lemna minor у харчовій промисловості. *Foods* 13, 1435. <https://doi.org/10.3390/foods13101435>

Sree, K.S., Adelmann, K., Garcia, C., Lam, E., Appenroth, K.-J., 2015a. Сольова толерантність ряски. *Planta* 241, 1395–1404. <https://doi.org/10.1007/s00425-015-2264-x>

Sree, K.S., Sudakaran, S., Appenroth, K.-J., 2015b. Швидкість росту ряски Wolffia. *Acta Physiologiae Plantarum* 37, 204. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-1951-3>

Sulaiman, N.S., Mohd Zaini, H., Wan Ishak, W.R., Matanjun, P., George, R., Mantihal, S., Ching, F.F., Pindi, W., 2025. Білок ряски: екстракція та застосування. *Food Chemistry* 463, 141544. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141544>

Sun, Z., Guo, W., Yang, J., Zhao, X., Chen, Y., Yao, L., Hou, H., 2020. Біомаса ряски в змішаних умовах. *Bioresource Technology* 317, 124029. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124029>

Tang, J., Li, Y., Ma, J., Cheng, J.J., 2015. Ліпідний склад ряски. *Plant Biology* 17, 1066–1072. <https://doi.org/10.1111/plb.12345>

Turck, D. et al., 2024. Безпека Lemna gibba та Lemna minor як нової їжі. EFSA. <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2024.EN-8963>

Turck, D. et al., 2023. Безпека білкового концентрату ряски. *EFSA Journal* 21, e07903. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.7903>

Turck, D. et al., 2022. Безпека цільної ряски як нової їжі. *EFSA Journal* 20, e07598. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2022.7598>

Turck, D. et al., 2021a. Безпека білку машу. *EFSA Journal* 19, e06846. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6846>

Turck, D. et al., 2021b. Безпека порошку ряски. *EFSA Journal* 19, e06845. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6845>

Turck, D. et al., 2021c. Безпека *Wolffia globosa*. *EFSA Journal* 19, e06938. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6938>

Ujong, A., Naibaho, J., Ghalamara, S., Tiwari, B.K., Hanon, S., Tiwari, U., 2025. Потенціал ряски у харчовій промисловості. *Sustainable Food Technology* 3, 54–80. <https://doi.org/10.1039/D4FB00288A>

van Apeldoorn, M.E., van Egmond, H.P., Speijers, G.J.A., Bakker, G.J.I., 2007. Ціанотоксини. *Molecular Nutrition & Food Research* 51, 7–60. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200600185>

van der Spiegel, M., Noordam, M.Y., van der Fels-Klerx, H.J., 2013. Безпека нових джерел білку. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 12, 662–678. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12032>

Verma, A.K., Kumar, S., Das, M., Dwivedi, P.D., 2013. Огляд алергії на бобові. *Clinical Reviews in Allergy & Immunology* 45, 30–46. <https://doi.org/10.1007/s12016-012-8310-6>

Verma, A.K., Kumar, S., Das, M., Dwivedi, P.D., 2012. Вплив термічної обробки на алергени бобових. *Plant Foods for Human Nutrition* 67, 430–441. <https://doi.org/10.1007/s11130-012-0328-7>

Walsh, É., Paolacci, S., Burnell, G., Jansen, M.A.K., 2020. Співвідношення кальцію і магнію у фіторемедіації. *International Journal of Phytoremediation* 22, 694–702. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1707478>

Wang, W., Kerstetter, R.A., Michael, T.P., 2011. Еволюція розміру геному ряски. *Journal of Botany* 2011, 570319. <https://doi.org/10.1155/2011/570319>

Xu, J., Cui, W., Cheng, J.J., Stomp, A.-M., 2011. Виробництво етанолу з ряски. *Biosystems Engineering* 110, 67–72. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.06.007>

Xu, J. et al., 2023. Ряска як їжа для людини: огляд. *Food Reviews International* 39, 3620–3634. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.2012800>

Yan, Y., Candreva, J., Shi, H., Ernst, E., Martienssen, R., Schwender, J., Shanklin, J., 2013. Жирнокислотний склад ряски. *BMC Plant Biology* 13, 201. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-13-201>

Zahari, I., Östbring, K., Purhagen, J.K., Rayner, M., 2022. Рослинні м'ясні аналоги: огляд. *Foods* 11, 2870. <https://doi.org/10.3390/foods11182870>

Zhao, Y., Li, J., Yang, Y., Ma, R., Peng, Y., Sun, X., Gao, S., Chang, J., Duan, C., 2024. Очищення води за допомогою ряски. *Journal of Water Process Engineering* 58, 104942. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104942>

Zhu, F., 2021. Білки гречки: функції та застосування. *Trends in Food Science & Technology* 110, 155–167. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.081>

Ziegler, P., Adelman, K., Zimmer, S., Schmidt, C., Appenroth, K.-J., 2015. Швидкість росту ряски. *Plant Biology* 17, 33–41. <https://doi.org/10.1111/plb.12184>

Zielińska, E., Karaś, M., Baraniak, B., 2018. Порівняння функціональних властивостей білків комах. *LWT* 91, 168–174. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.058>

Zilberman, D., Lu, L., Reardon, T., 2019. Інновації у ланцюгах постачання їжі. *Food Policy* 83, 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2017.03.010>

Zuki, N.A.A.M., Yahya, H., Ariffin, N., Yahya, H.N., 2022. Класифікація ряски та її бактеріальної спільноти. *Malaysian Journal of Science Health & Technology* 8, 14–26. <https://doi.org/10.33102/mjosht.v8i1.238>

РЕЦЕПТУРНИЙ ДОДАТОК

Ряска – це швидкорослі водні рослини з високим вмістом білка, перспективні для сталого виробництва харчових продуктів і використання у кулінарії. Різні види ряски характеризуються специфічними ароматичними профілями, що зумовлює їхню гастрономічну цінність.

Примітка: для очищення ряску необхідно кілька разів промити в проточній воді, як інші листові овочі. Перед споживанням бланшувати в киплячій воді протягом кількох хвилин.



Lemna minor – найпоширеніший вид ряски; має діаметр 2–5 мм, овальну та плоску форму.



Lemna gibba – один із найпоширеніших видів; має діаметр 2–5 мм і овальну форму.



Spirodela polyrhiza – один із найбільших видів ряски; має діаметр приблизно 10–15 мм. Часто має кілька коренів, а нижня частина забарвлена в червоний колір.



Wolffia arrhiza – один із найменших видів ряски. Має дрібні яйцеподібні листки, без коренів. Діаметр становить приблизно 0,5–1,5 мм. Відома своїм горіховим смаком.

Гострий салат із Wolffia в тайському стилі (Orathai Pakdee)

Інгредієнти (на дві порції)

- ½ кг свіжої Wolffia
- 1 склянка нарізаних помідорів
- 1 склянка нарізаної цибулі
- ½ склянки нарізаної селери (або селери)
- 5 столових ложок соку лайма
- 1 столова ложка рибного соусу (або суміш соєвого соусу з дрібною подрібненою анчоуса)
- ½ столової ложки цукру
- ¼ склянки подрібненого перцю чилі (або солодкої паприки для не гострого варіанту)



Приготування (10 хвилин)

1. Ретельно промийте Wolffia кілька разів, доки вода після промивання не стане прозорою.
2. Бланшуйте Wolffia в киплячій воді протягом 2 хвилин. Злийте воду через дрібне сито або марлю та дайте охолонути.
3. Приготуйте заправку, змішавши в окремій мисці сік лайма, рибний соус і цукор. Відрегулюйте смак за бажанням (у Таїланді зазвичай надають перевагу кисло-солодкому смаку).
4. Додайте охолоджену Wolffia до заправки та ретельно перемішайте до утворення кремоподібної маси.
5. Додайте помідори, цибулю, крупно нарізану селеру та перець чилі (кількість можна зменшити для меншої гостроти) і знову перемішайте.

Примітка: кремоподібну масу з Wolffia можна подавати з гарячим білим рисом або намазувати на крекери чи солоні печива для європейського варіанту подачі.

Салат із ряски (Cees Gauw)

Ряску можна додавати до смачних салатів. Цей салат швидкий і простий у приготуванні та може подаватися як обід, а також як свіжа основна страва або гарнір.

Інгредієнти (на 2 порції)

- 100 г ряски
- 100 г жовтих, червоних та помаранчевих помідорів
- 50 г бекону
- 25 г м'якого козячого сиру
- 2 столові ложки насіння соняшника
- 1 чайна ложка лимонного соку
- жменя зеленої цибулі



Приготування (5–10 хвилин)

1. Швидко обсмажте бекон і насіння соняшника на сковороді з оливковою олією.
2. Тим часом наріжте помідори шматочками, а зелену цибулю – дрібними кільцями.
3. Покладіть помідори та зелену цибулю в миску разом із козячим сиром.
4. Зніміть бекон і насіння з вогню та додайте їх до салату.
5. Додайте ряску, попередньо бланшовану протягом 2 хвилин, у миску та скропіть салат лимонним соком.

Минестроне (Cees Gauw)

Овочевий суп – це дуже універсальна страва, яка може містити багато різних інгредієнтів, зокрема ряску. Можна вільно змінювати рецепт і додавати улюблені продукти.

Інгредієнти (на 4 порції)

- оливкова олія
- 1 цибулина
- 800 г консервованих помідорів
- 1 жменя пасти
- 1 банка білої квасолі
- 100 г ряски
- 200 г змішаних овочів (наприклад: порей, морква, кабачок)
- 1 жменя базиліку
- 0,5 л овочевого бульйону
- сіль і перець за смаком

Приготування (30 хвилин)

1. Розмістити велику каструлю на вогонь. Наріжте цибулю та обсмажте її в оливковій олії до прозорості.
2. Очистіть і промийте овочі та ряску, додайте їх до цибулі.
3. Коротко обсмажте все разом.
4. Додайте овочевий бульйон і консервовані помідори (нарізані шматочками).
5. Доведіть до кипіння.
6. Додайте жменю пасти та зціджену білу квасолю.
7. Варіть до готовності пасти.
8. В кінці додайте сіль, перець і базилік.

Кіш із ряскою (Cees Gauw)

Цей кіш із ряскою є смачною та простою вечерею. Завдяки своїй легкості він подобається як дорослим, так і дітям, і часто стає улюбленою стравою. Ідеально підходить для літа, а також як святкова страва.

Інгредієнти (на 4 порції):

- 200 г свіжої ряски;
- кілька листів листкового тіста (можна замороженого);
- оливкова олія;
- 1 цибулина;
- 1 зубчик часнику;
- 50 г в'ялених помідорів;
- 1 болгарський перець;
- 4 яйця;
- 50 г пармезану;
- 50 г козячого сиру;
- свіжий базилік.



Приготування (50 хвилин)

1. Розігрійте духовку до 200°C і використовуйте розморожене тісто.
2. Змастіть форму для кішу оливковою олією та викладіть у неї листи тіста.
3. Розігрійте вок або велику сковороду на слабкому вогні, додайте трохи оливкової олії. Обсмажте подрібнені цибулю та часник кілька хвилин.
4. Додайте нарізаний перець, в'ялені помідори, ряску та стебла базиліку.
5. Готуйте кілька хвилин, доки овочі не стануть м'якими.
6. В окремій ємкості збийте яйця з твердим сиром, козячим сиром і листям базиліку.
7. Вилийте яєчну суміш на овочі, добре перемішайте та перекладіть у форму з тістом. За потреби загорніть краї тіста всередину.
8. Випікайте приблизно 30 хвилин до золотистого кольору та повної готовності.

Карі з ряскою (Ceese Gauw)

Ряску можна використовувати також у гострих стравах міжнародної кухні.

У цьому рецепті вона є головним інгредієнтом карі з імбиром і помідорами.

Інгредієнти (на 4 порції):

- 700 г ряски
- оливкова олія
- 1 велика цибулина
- свіжий імбир (подрібнений корінь)
- 2 зубчики часнику
- 1 банка очищених помідорів
- 200 мл кокосового «молока» (або мигдалевого)
- 4 гвоздики
- 2 стручки кардамону
- 1 паличка кориці
- 1 невеликий сушений перець чилі
- 4 листки карі (або лавровий лист, але це інше!)
- ½ ч. л. насіння коріандру
- ½ ч. л. кмину
- 1 ч. л. солодкої паприки
- 500 г рису



Приготування (50 хвилин)

1. Швидко обсмажте добре промиту та відціджену ряску на оливковій олії, потім відкладіть її.
2. Наріжте цибулю та часник і додайте їх разом з імбиром у сковороду.
3. Готуйте на слабкому вогні, поки цибуля не стане прозорою.
4. Додайте помідори та кокосове (або мигдалеве) молоко, потім спеції за смаком.
5. Тушкуйте на слабкому вогні приблизно 20–25 хвилин.
6. Тим часом зваріть рис (приблизно 10 хвилин після закипання води).
7. Зніміть карі з вогню та змішайте його з обсмаженою ряскою.
8. Подавайте разом із вареним рисом.

Тушкована ряска з беконом (Cees Gauw)

Ця страва – поживна та насичена, ідеальна для повноцінної вечері. Поєднання ряски, картоплі, яєць, м'яса та спецій створює інтенсивний смак і добре збалансований склад білків, вуглеводів і жирів. Легка у приготуванні, вона дозволяє експериментувати з новими інгредієнтами.

Інгредієнти (на 4 порції)

- 300 г свіжої ряски
- 500 г картоплі
- 100 г бекону
- 1 свіжа ковбаска
- 1 столова ложка гірчиці
- 1–2 яйця
- масло або молоко



Приготування (25–30 хвилин)

1. Очистіть картоплю та відваріть її протягом 15 хвилин до стану «аль денте».
2. Зваріть яйця та очистіть їх.
3. Тим часом обсмажте бекон і ковбаску.
4. Злийте воду з картоплі, додайте бекон, трохи масла (або молока), гірчицю та яйця, потім розімніть усе разом.
5. Викладіть ряску на гарячу картопляну суміш.
6. Коротко перемішайте.
7. Використайте жир, що залишився від ковбаски, для приготування соусу: додайте трохи води або вина на сковороду та прогрійте на сильному вогні, добре перемішуючи.
8. Подавайте тушковану страву разом із ковбаскою та соусом.

Торт із моркви та ряски (Cees Gauw)

Навіть для приготування смачного торта ряска є чудовим інгредієнтом. У цьому рецепті готують торт із моркви та ряски – дуже вдала комбінація, навіть якщо спочатку це може здатися несподіваним.

Інгредієнти (на 12 порцій)

Для тіста:

- 200 г ряски
- 200 г моркви
- 4 яйця
- 300 г борошна
- 250 г цукру
- 185 мл соняшникової олії
- 50 г горіхів
- 1 пакетик розпушувача

для тіста

- 2 ч. л. кориці
- ½ ч. л. солі
- 1 апельсин

Для глазури:

- 50 г масла
- 50 г цукрової пудри
- кілька печив Bastogne

Приготування (90 хвилин)

Тісто:

1. Натріть моркву.
2. Збийте яйця та додайте цукор.
3. Змішайте борошно, сіль, розпушувач і корицю.
4. Постійно перемішуючи, додайте олію. Мішайте до отримання гладкого та однорідного тіста.
5. Натріть цедру апельсина та додайте її разом із горіхами до тіста.
6. Розділіть тісто на дві миски. В одну додайте натерту моркву, в іншу – ряску. Ретельно перемішайте окремо.
7. Змастіть форму для випікання маслом. Викладіть у неї шар тіста з морквою, рівномірно розподіліть. Зверху викладіть шар тіста з ряскою та розрівняйте.
8. Випікайте при 180°C приблизно 1 годину. Готовність перевіряйте дерев'яною шпажкою – вона має виходити чистою.
9. Дістаньте з духовки та залиште охолоджуватися при кімнатній температурі.

Глазур:

1. Збийте масло міксером до легкої та пухкої консистенції.
 2. Додайте цукрову пудру та продовжуйте збивати.
 3. Розріжте торт горизонтально навпіл і відкладіть верхню частину.
 4. Нанесіть тонкий шар глазури на нижню частину.
 5. Обережно накрийте верхньою частиною торта.
 6. Обмажте всю поверхню глазурю.
- Подрібніть печиво Bastogne і посипте крихтами торт.





І наприкінці – соки з ряски

На завершення ми пропонуємо також соки з ряски: свіжий, цікавий і поживний спосіб споживати ці маленькі рослини, багаті на білок. Для приготування соку можна використовувати повільну соковижималку, яка ідеально зберігає всі властивості, або кухонний комбайн.

Ряска є занадто дрібною для звичайної соковижималки, але за допомогою цих методів можна отримати альтернативний, корисний сік, що підходить для тих, хто шукає нові здорові та оригінальні ідеї.

Orange Above: 30 г ряски 1 морква ½ яблука 1 ч. л. кориці	Фруктовий смузі 30 г ряски ½ яблука 1 груша шматочок імбиру	Свіжий і фруктовий 30 г ряски ½ яблука 1 огірок шматочок імбиру	Сніданковий смузі 30 г ряски сік ½ лайма 1 груша шматочок імбиру
Green Monster 30 г ряски 1 огірок шматочок імбиру	Red Devil 30 г ряски 1 помідор сіль, перець і табаско	Чай із ряски 20 г ряски 1 пакетик чаю	Чистий сік із ряски 80 г ряски