УДК 577.23:665.939.35 (045) DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.16

А. Ю. КАРАЮМЕР
аспірант кафедри хімії і хімічної технології
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0002-7031-1096

А. Д. КУСТОВСЬКА
кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії і хімічної технології
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0002-6836-3305

БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ МОРСЬКИХ ТРАВ РОДИНИ *ZOSTERACEAE*: ЦІЛЬОВІ КОМПОНЕНТИ, МЕТОДИ ВИЛУЧЕННЯ ТА НАПРЯМИ ЗАСТОСУВАННЯ

У статті розглянуто біотехнологічний потенціал морських трав родини Zosteraceae з акцентом на вид Zostera marina Чорноморського басейну. Проаналізовано їхнє екологічне значення як ключових елементів прибережних екосистем та одночасно – проблему щорічних штормових викидів, які залишаються малоефективно використаним ресурсом. Узагальнено сучасні дані щодо хімічного складу біомаси, що включає полісахариди (целюлоза, геміцелюлози, пектини), ліпіди, фенольні метаболіти та мінеральні елементи. Визначено напрями їхнього прикладного використання у виробництві біопалива, харчових і фармацевтичних продуктів, а також у целюлозно-паперовій галузі та створенні біокомпозитів. Підкреслено, що Zostera marina протягом тривалого історичного періоду використовувалася в Європі та на узбережжі Чорного моря як традиційний природний ресурс, проте нині її потенціал розглядається у контексті сучасних наукових і технологічних викликів. Особливу увагу приділено аналізу методів вилучення цільових компонентів, серед яких органічна та надкритична екстракція, ферментативний гідроліз і мікробіологічна ферментація, що дозволяють підвищити ефективність переробки та отримати продукти з високою доданою вартістю. Показано, що комплексна переробка біомаси Zosteraceae на основі багатостадійних технологій здатна забезпечити безвідходність виробництва й інтегруватися у модель циркулярної економіки. Зроблено висновок, що раціональне використання штормових викидів морських трав може водночас знизити екологічне навантаження на прибережні території, сприяти створенню інноваційних виробництв в Україні та стати підґрунтям для розвитку «синьої біоекономіки», забезпечуючи інтеграцію у сучасні європейські стратегії сталого розвитку.

Ключові слова: *морські трави, біомаса, біоенергетика, циркулярна економіка, сталий розвиток, відходи.*

A. YU. KARAIUMER
Postgraduate Student at the Department of Chemistry
and Chemical Technology
State University “Kyiv Aviation Institute”
ORCID: 0000-0002-7031-1096

A. D. KUSTOVSKA
Ph.D., Associate Professor at the Department of Chemistry
and Chemical Technology
State University “Kyiv Aviation Institute”
ORCID: 0000-0002-6836-3305

BIOTECHNOLOGICAL POTENTIAL OF SEAWEEDS OF THE ZOSTERACEAE FAMILY: TARGET COMPONENTS, EXTRACTION METHODS AND DIRECTIONS OF APPLICATION

This article explores the biotechnological potential of seagrasses of the family Zosteraceae, with a particular emphasis on Zostera marina from the Black Sea basin. The ecological role of these species as keystone components of coastal ecosystems is considered, alongside the issue of annual storm-cast accumulations, which remain an insufficiently utilized biomass resource. Contemporary knowledge on the chemical composition of Z. marina is summarized, highlighting polysaccharides (cellulose, hemicelluloses, pectins), lipids, phenolic metabolites, and mineral elements. Potential application areas are identified, including the production of biofuels, functional food and pharmaceutical ingredients, paper and packaging materials, as well as plant-based biocomposites. Particular attention is given to extraction

© Караюмер А. Ю., Кустовська А. Д., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

and processing approaches – such as organic and supercritical fluid extraction, enzymatic hydrolysis, and microbial fermentation – that allow efficient recovery of target compounds and support the development of high value-added products. It is argued that the integrated, multistage processing of Zosteraceae biomass can ensure waste minimization, foster the transition to circular economy models, and contribute to the sustainable use of marine resources. The rational utilization of storm-cast seagrasses is concluded to provide dual benefits: mitigating environmental pressure on Black Sea coastal ecosystems and creating a foundation for innovative, resource-efficient industries in Ukraine. These findings highlight the potential of Zosteraceae to support the advancement of the blue bioeconomy and align national priorities with modern European sustainable development strategies.

Key words: *seagrasses, biomass, bioenergy, circular economy, sustainable development, waste.*

Постановка проблеми

Морські трави родини *Zosteraceae* відіграють ключову роль у функціонуванні прибережних екосистем Чорного моря, зокрема беруть участь у стабілізації донних відкладень, акумуляції вуглецю та створенні середовищ існування для різних груп гідробіонтів. Водночас щорічні штормові процеси спричиняють значні викиди біомаси на узбережжя, де вона накопичується, формуючи додаткові екологічні та санітарні проблеми, що особливо актуально в періоди рекреаційного навантаження. Традиційно зібрані відходи видаляють шляхом механічного очищення берегової лінії з подальшим захороненням або спалюванням, що не лише суперечить принципам екологічної безпеки, але й призводить до нераціональної втрати природних ресурсів [1, 2].

Біомаса *Zostera marina* характеризується високим вмістом полісахаридів (целюлоза, геміцелюлоза, пектинові речовини), ліпідів, фенольних та інших біоактивних сполук [3, 4]. Такий склад обумовлює перспективність комплексної переробки цієї сировини для отримання продуктів різного функціонального призначення – від біопалива та фармацевтичних субстанцій до біоактивних екстрактів і волокнистих матеріалів. Проте наразі відсутні інтегровані технологічні рішення, що одночасно забезпечували б утилізацію штормових викидів і ефективне вилучення цінних компонентів. Це призводить до втрати значного науково-технічного та економічного потенціалу біомаси *Zosteraceae*. Зазначене визначає необхідність розроблення інноваційних підходів, орієнтованих на зменшення екологічного навантаження прибережних зон та формування доданої вартості у межах концепції циркулярної економіки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Історичні відомості засвідчують, що морські трави роду *Zostera* здавна використовувалися у прибережних регіонах Європи та Середземномор'я як органічне добриво, теплоізоляційний матеріал, підстилка для тварин та покрівельна сировина [5, 6]. У подальшому інтерес до цієї біомаси поступово змістився від побутового застосування до вивчення її хімічного складу та біологічної активності. Рисунок 1 демонструє хронологію досліджень *Zostera marina*.

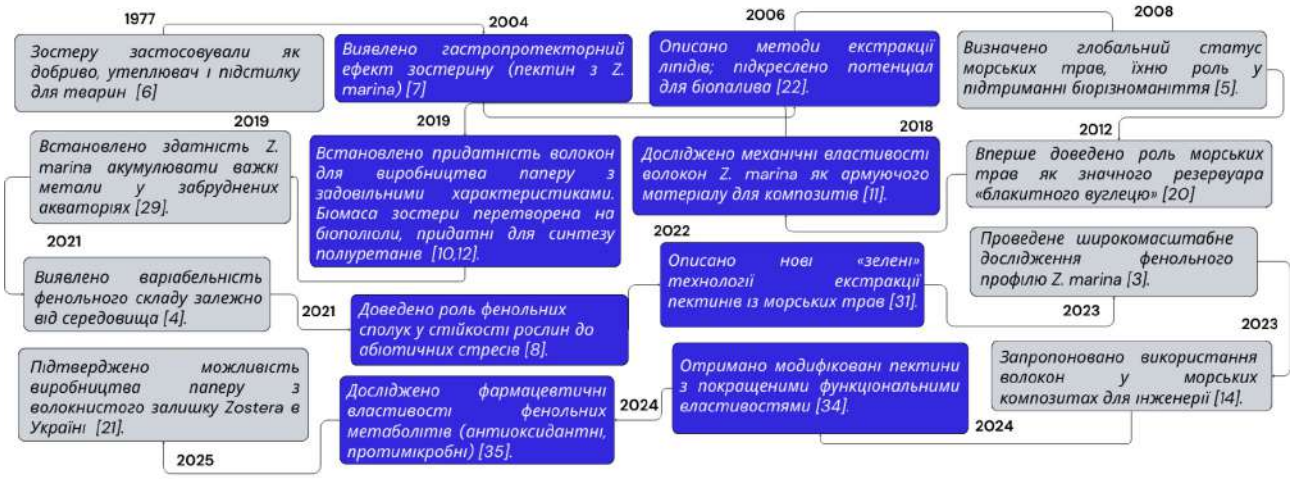

Рис. 1. Хронологія досліджень складу морських трав *Zostera marina*

На сучасному етапі наукові дослідження окреслюють два пріоритетні напрями. Перший пов'язаний із поглибленим аналізом хімічного складу *Zostera marina* та дослідженням функціональних властивостей її компонентів. Зокрема, встановлено гастропротекторну дію пектинових речовин зостерину [7], а також значну географічну варіабельність фенольних метаболітів, що зумовлює відмінності у біоактивності рослинної сировини [8, 9]. Другий напрям стосується розроблення практичних сфер застосування, серед яких фармацевтична та харчова промисловість, біоенергетика, виробництво біополімерів і целюлозно-паперових матеріалів [10–12].

Важливе місце у науковому дискурсі посідає дослідження екологічних функцій луків родини *Zosteraceae*. Наголошується на їхній ролі як екосистемних інженерів, що беруть участь у секвестрації «блакитного вуглецю»,

стабілізації донних відкладень і збереженні біорізноманіття прибережних акваторій [15, 16]. Це зумовлює подвійне значення біомаси морських трав: як сировини для отримання цінних продуктів і як чинника підтримання екологічної стійкості морських екосистем.

У європейському контексті дослідження інтегруються у концепцію «синьої біоекономіки», що спрямована на залучення морських біоресурсів у циркулярні моделі сталого виробництва. У відповідних аналітичних документах підкреслюється доцільність трансформації штормових викидів у продукти з високою доданою вартістю, що водночас сприяє зменшенню антропогенного навантаження на прибережні зони [17, 18].

Разом з тим, у літературі окреслюється низка наукових прогалин. Недостатньо дослідженими залишаються технологічні параметри комплексної переробки біомаси *Zostera marina*, вплив сезонних і географічних чинників на її якісний склад, а також підходи до масштабування запропонованих технологій для промислового використання. Вирішення зазначених завдань визначає актуальність і практичну значущість подальших досліджень у цій сфері.

Формулювання мети дослідження

Мета роботи полягає в аналізі можливостей практичного використання біомаси морських трав родини *Zosteraceae* Чорноморського басейну в Україні шляхом розробки підходів до комплексної переробки та одержання цільових продуктів (ліпідів, пектинів, фенольних сполук, целюлозних матеріалів). Особливу увагу зосереджено на перспективах інтеграції таких технологій у фармацевтичну, харчову, біоенергетичну та целюлозно-паперову галузі для створення доданої вартості та розвитку «синьої біоекономіки».

Викладення основного матеріалу дослідження

Родина *Zosteraceae* включає близько 15 видів морських трав, серед яких найбільш поширеною у північній півкулі є *Zostera marina L*. Це вищі квіткові рослини, які в процесі еволюції адаптувалися до морського середовища, зберігши фотосинтетичну активність та здатність до вегетативного розмноження. Їхні зарості формують підводні біоценози, що виконують важливі екосистемні функції.

Ареал поширення *Z. marina* (рис. 2) охоплює прибережні зони Північної Атлантики, Балтійського та Чорного морів, а також північні регіони Тихого океану. У Чорному морі основні угруповання зосереджені у північно-західній частині шельфу, у затоці Сиваш, біля узбережжя Кримського півострова та Одеської області. Дослідження, проведені в Україні, свідчать про зменшення площ поширення *Z. marina*, що зумовлено антропогенним навантаженням, евтрофікацією, підвищенням температури води та військовими діями від 24 лютого 2022 року [19, 20].

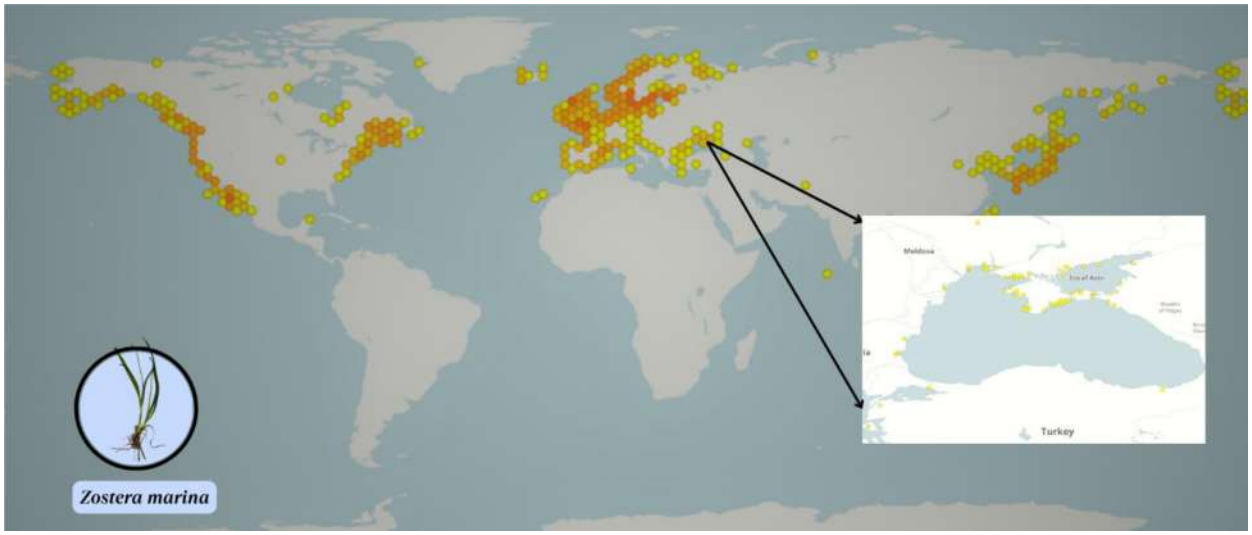

Рис. 2. Географічне поширення морської трави родини *Zosteraceae*

Екологічна роль представників *Zosteraceae* багатофункціональна. Вони здійснюють фотосинтез у прибережних акваторіях, виступають ефективним резервуаром секвестрації вуглецю (до 83 млн т на рік у глобальному масштабі) [20], стабілізують донні відкладення та знижують інтенсивність берегової ерозії. Крім того, зарості створюють біотопи для ранніх стадій розвитку риб, молюсків та інших безхребетних [21].

Характерним явищем для Чорного моря є штормові викиди морських трав, унаслідок яких значні обсяги біомаси накопичуються на береговій лінії. За даними Міністерства захисту довкілля України, такі відходи створюють екологічне навантаження на прибережні території та рекреаційну інфраструктуру. Найпоширенішим способом їх утилізації залишається механічне прибирання з подальшим захороненням [19], що не враховує можливостей використання цієї сировини. Біомаса морських трав родини *Zosteraceae* відзначається різноманітним хімічним складом, який визначає її біотехнологічний потенціал. Основними компонентами є полісахариди (целюлоза,

геміцелюлози, пектини), ліпіди, білкові сполуки, фенольні метаболіти та мінеральні елементи. Завдяки цьому можливе цільове використання окремих фракцій у харчовій, фармацевтичній, біоенергетичній та матеріалознавчій галузях, що схематично наведено на рисунку 3.

Рис. 3. Сфери застосування та приклади продуктів отриманих з морських трав *Zosteraceae*

Вміст ліпідів становить у середньому 2–6 % від сухої маси, при цьому понад 60 % припадає на ненасичені жирні кислоти, серед яких омега-3 та омега-6, що визначає їхню високу біологічну цінність [22, 23, 32, 33]. Пектинові речовини складають 10–15 % сухої маси й характеризуються гелеутворюючими, ентеросорбційними та антиоксидантними властивостями [21, 25]. Фенольні метаболіти представлені флавоноїдами, фенолкарбоновими кислотами та танінами, які виконують захисні функції та проявляють антиоксидантну й протимікробну активність [8, 9, 36]. Целюлозний комплекс становить 25–35 % сухої маси і відзначається зниженою кристалічністю, що спрощує його переробку порівняно з деревиною [25]. Додатково у біомасі містяться макро- та мікроелементи (Ca, Mg, K, Fe, I), що відкриває можливості використання подрібненої сировини у вигляді органо-мінеральних добрив.

Для поетапного вилучення цільових компонентів застосовуються фізико-хімічні та біотехнологічні методи. Ліпіди та фенольні сполуки отримують шляхом екстракції органічними розчинниками (гексан, етанол, метанол) або за допомогою надкритичного CO_2 [26], що відповідає принципам «зеленої хімії». Пектинові речовини ізолюють із використанням водно-спиртових систем або розбавлених мінеральних кислот, забезпечуючи вихід на рівні 10–15 % [21]. Волокнистий залишок після вилучення пектину й ліпідів може бути використаний як сировина для паперу, картону чи біокомпозитів. Перспективними є також ферментативний гідроліз і мікробна ферментація, які дають змогу отримувати біоетанол, біогаз та інші продукти [27].

Комплексна схема переробки біомаси *Zosteraceae* (рис. 4) включає кілька етапів, а саме: *вилучення ліпідної фракції* органічними розчинниками або надкритичним CO_2; *екстракцію пектину* водно-кислотними системами при оптимальних температурах (80–90 °C); *виділення фенольних сполук* і антиоксидантів водно-спиртовими екстрактами та використання *волокнистого залишку* для виготовлення паперових матеріалів, біокомпозитів або як субстрату в біогазових установках. Така багатостадійна схема спрямована на зменшення кількості відходів і узгоджується з принципами циркулярної економіки. Приклади її застосування описані для бурих і зелених водоростей, проте дослідження, орієнтовані на морські трави роду *Zostera*, перебувають на початкових стадіях [28, 29].

Поєднання фізико-хімічних та біотехнологічних методів створює підґрунтя для формування ефективних технологічних процесів комплексної переробки. Актуальним науковим завданням є оптимізація технологічних параметрів із урахуванням сезонності та географічного походження сировини, а також розробка промислових регламентів для масштабного впровадження.

Практичні напрями використання біомаси *Zostera marina* охоплюють широкий спектр галузей, що представлені у таблиці 1. Ліпідна фракція є придатною для виробництва біодизельного палива, харчових добавок і косметичних засобів [32, 33]; залишкова біомаса може слугувати субстратом для анаеробної ферментації з утворенням біогазу. Целюлозні компоненти використовуються як основа для отримання біоетанолу, паперових матеріалів [21] та біорозкладних композитів. Пектини мають значний фармацевтичний потенціал як ентеросорбенти та допоміжні речовини у лікарських формах, а також застосовуються у харчовій промисловості як натуральні загусники та стабілізатори [34, 35]. Фенольні сполуки завдяки антиоксидантній та антимікробній активності можуть бути використані у фармацевтиці, харчових технологіях і косметиці [36–39].

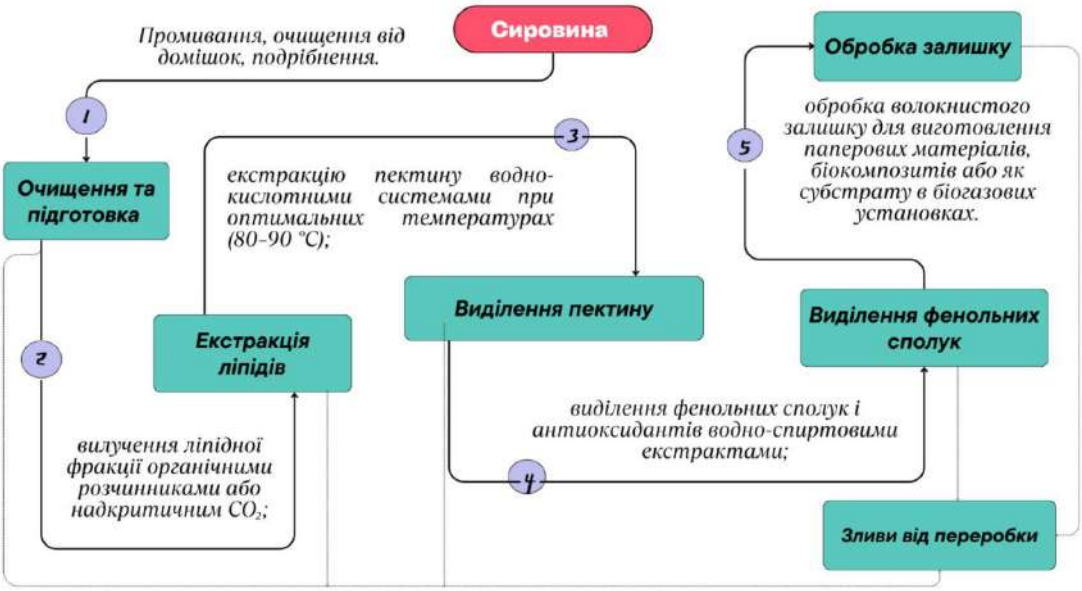

Рис. 4. Основні етапи схеми комплексної переробки морських водоростей роду Zostera

Таблиця 1

Цільові продукти біомаси *Zostera marina*, вміст і напрями застосування

Продукт	Вміст у сухій біомасі, %	Сфера застосування	Приклади речовин
Ліпіди	2–6 %	Біоенергетика, харчова, косметична промисловість	Ненасичені жирні кислоти (омега-3, омега-6) [10, 23, 27, 29]
Пектинові речовини	10–15 %	Харчова та фармацевтична промисловість	Пектини, зостерин [7, 34, 35]
Фенольні метаболіти	0,03–0,75 %	Фармацевтика, харчова промисловість, матеріалознавство	Флавоноїди, фенолкарбонові кислоти, таніни [3, 4, 9, 24, 36]
Целюлозний комплекс	25–35 %	Целюлозно-паперова промисловість, біокомпозити, пакувальні матеріали	Целюлоза, геміцелюлози [11, 12, 14, 21, 25]

Якість та кількість цільових компонентів біомаси визначаються поєднанням природних і технологічних чинників. Весняна біомаса містить підвищені концентрації білків і вуглеводів, тоді як восени збільшується частка структурних полісахаридів (30–35 %) [31]. Максимальний вміст пектину спостерігається у період активної вегетації [31], тоді як ліпідна фракція найбільш багата жирними кислотами у літньо-осінній період [31–33], що важливо для біопаливних застосувань. Вміст мінеральних елементів і полісахаридів варіює залежно від географічного походження: у Чорному морі показники відрізняються від аналогічних у Балтійському та Північному морях, що зумовлено відмінностями у солоності, температурі та рівні антропогенного навантаження [29, 30]. У зонах із підвищеним рівнем забруднення відзначається накопичення важких металів (Pb, Cd, Hg), що вимагає попереднього очищення або селективної утилізації такої біомаси [29, 30].

Ефективність подальшої переробки значною мірою визначається умовами збору й підготовки сировини. Механічне прибирання штормових викидів часто супроводжується домішками піску й мулу, що знижує якість біомаси. Попереднє промивання морською або прісною водою, сушіння при 40–60 °C та подрібнення підвищують вихід пектину та покращують властивості волокнистих залишків [31–33]. Зберігання сирої біомаси понад 48–72 годин призводить до втрати біоактивних компонентів унаслідок мікробних і ферментативних процесів [31]. Додатково кліматичні зміни – підвищення температури води, підкислення, евтрофікація – негативно впливають на продуктивність водоростей Zosteraceae та їхній біохімічний склад [29, 30].

Таким чином, *Zostera marina* становить перспективне джерело біомаси для комплексної багатостадійної переробки, яка передбачає вилучення ліпідів, пектинів, фенольних метаболітів та використання целюлозних залишків у матеріалознавстві й енергетиці [21–29, 32–39]. Раціональне залучення штормових викидів у виробничі ланцюги дозволяє поєднати завдання зменшення екологічного навантаження на узбережжя із формуванням нових секторів «синьої біоекономіки». Це створює підґрунтя для впровадження ресурсоефективних технологій у Чорноморському регіоні та сприяє інтеграції України у сучасні європейські стратегії сталого розвитку [28, 29].

Висновки

Морські трави родини Zosteraceae, зокрема *Zostera marina*, є перспективним джерелом біомаси для комплексної переробки. Штормові викиди цих рослин можуть стати цінною сировиною для фармацевтичної, харчової,

біоенергетичної та целюлозно-паперової промисловості. Хімічний склад біомаси включає пектинові речовини (10–15 %), целюлозу (25–35 %), ліпіди (2–6 %) та фенольні метаболіти. Пектини проявляють гастропротекторні й антиоксидантні властивості, феноли – антиоксидантну та протимікробну активність, ліпіди придатні для виробництва біодизелю й харчових добавок, а волокнистий залишок може бути використаний для паперу та біокомпозитів.

Перспективним напрямом є впровадження багатостадійних технологічних схем, що поєднують фізико-хімічні та біотехнологічні методи і враховують сезонну та географічну варіабельність складу біомаси. Такий підхід відповідає принципам циркулярної економіки, сприяє зменшенню екологічного навантаження на Чорноморський регіон і створює передумови для розвитку секторів «синьої біоекономіки» та інтеграції України у сучасні європейські стратегії сталого розвитку.

Список використаної літератури

1. Ukrainian Scientific Centre of Ecology of the Sea (UkrSCES). State Monitoring Programme of the Black and Azov Seas. Київ : Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine, 2022. URL: https://sea.gov.ua/?lang=en (дата звернення: 11.09.2025).

2. Greenpeace. Pressures, Threats and Impacts on Life in the Black Sea : Greenpeace Report. 2024. URL: https://www.greenpeace.org/static/planet4-romania-stateless/2024/05/5bacf577-02_pressures-threats-and-impacts-on-life-in-the-black-sea_greenpeace_rev02-1-1.pdf (дата звернення: 11.09.2025).

3. Grignon-Dubois M., Rezzonico B. Phenolic chemistry of the seagrass Zostera marina Linnaeus: First assessment of geographic variability among populations on a broad spatial scale. Phytochemistry. 2023. Vol. 213. Art. 113788. DOI: 10.1016/j.phytochem.2023.113788

4. Uchida M., Miyoshi T., Kaneniwa M., Ishihara K., Nakashimada Y., Urano N. Production of 16.5 % v/v ethanol from seagrass seeds. J. Biosci. Bioeng. 2014. Vol. 118, № 6. С. 646–650. DOI: 10.1016/j.jbiosc.2014.05.017

5. Duarte C. M., Borum J., Short F. T., Walker D. I. Seagrass ecosystems: their global status and prospects. У кн.: Polunin N. V. C. (ed.) Aquatic Ecosystems: Trends and Global Prospects. Cambridge : Cambridge University Press, 2008. С. 281–294.

6. Rasmussen E. Seagrasses: Their uses, threats and management. Aquatic Botany. 1977. Vol. 3, Issue 4. С. 297–308. DOI: 10.1016/0304-3770(77)90030-1

7. Bessonova V. P., Malyarenko O. S., Stonik V. A., Elyakov G. B. Zosterin – pectin from seagrass Zostera marina with gastroprotective effect. Hydrobiological Journal. 2004. Vol. 40, № 3. С. 85–92. DOI: 10.1615/HydrobJ.v40.i3.80

8. Bociag K., Stawicka A., Urbaniak M., та ін. Phenolic chemistry of the seagrass Zostera marina: Geographic variability among populations. Aquatic Botany. 2021. Vol. 171. Art. 103393. DOI: 10.1016/j.aquabot.2021.103393

9. Sævdal Dybsland C., Bekkby T., Hasle Enerstvedt K., Kvalheim O. M., Rinde E., Jordheim M. Variation in Phenolic Chemistry in Zostera marina Seagrass along Environmental Gradients. Plants. 2021. Vol. 10, № 2. Art. 334. DOI: 10.3390/plants10020334. URL: https://www.mdpi.com/2223-7747/10/2/334 (дата звернення: 12.09.2025).

10. Li H., Zhu Y., Cao W., та ін. Liquefaction of marine biomass into bio-polyols for polyurethane foams. Cellulose. 2019. Vol. 26. С. 4807–4819. DOI: 10.1007/s10570-019-02394-3

11. Choi J., Choi S., Kim Y., та ін. Mechanical properties of seagrass fibers for composites. BioResources. 2018. Vol. 13, № 2. С. 2820–2831. DOI: 10.15376/biores.13.2.2820-2831

12. Liu C., Guo R., Zhang Y., та ін. Papermaking properties of seagrass fibers. BioResources. 2019. Vol. 14, № 2. С. 2671–2684. DOI: 10.15376/biores.14.2.2671-2684

13. Fragassa C., Pavlovic A., Santulli C. Seagrass fibres as sustainable reinforcements for polymer-based composites: A review. Polymers. 2025. Vol. 17, № 3. Art. 567. DOI: 10.3390/polym17030567

14. Crupi V., Majolino D., Fazio B., та ін. Seagrass-based natural fibres: Potential applications in marine composites. Marine Structures. 2023. Vol. 87. Art. 103385. DOI: 10.1016/j.marstruc.2023.103385

15. Fourqurean J. W., Manuel S. A., Kendrick G. A., та ін. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. Frontiers in Marine Science. 2023. Vol. 10. Art. 112233. DOI: 10.3389/fmars.2023.112233

16. Waycott M., Duarte C. M., Carruthers T. J. B., та ін. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. Hydrobiologia. 2023. Vol. 887. С. 1–19. DOI: 10.1007/s10750-023-05124-4

17. European Commission. Blue Bioeconomy Report 2022. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2022. DOI: 10.2777/0186

18. Salvador J., та ін. Blue growth and the role of seagrass biomass in sustainable bioeconomy. Journal of Cleaner Production. 2025. Vol. 432. Art. 139847. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.139847

19. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні (2021). Київ : МЗДПР, 2021. URL: https://mepr.gov.ua (дата звернення: 12.09.2025).

20. Davies P., Morvan C., Sire O., та ін. Structure and properties of fibres from seagrass (Zostera marina). J. Mater. Sci. 2007. Vol. 42. C. 4850–4857. DOI: 10.1007/s10853-006-0546-1

21. Караюмер А. Ю., Кустовська А. Д. Використання волокнистих відходів комплексної переробки водоростевої біомаси роду Zostera для виробництва паперових матеріалів. Наукоємні технології. 2025. № 2(66). С. 278–287.

22. Herrero M., Cifuentes A., Ibáñez E. Sub- and supercritical fluid extraction of functional ingredients from different natural sources: Plants, food-by-products, algae and microalgae: A review. Food Chemistry. 2006. Vol. 98, № 1. C. 136–148. DOI: 10.1016/j.foodchem.2005.05.058

23. Guschina I. A., Harwood J. L. Lipids and lipid metabolism in eukaryotic algae. Progress in Lipid Research. 2006. Vol. 45. C. 160–186. DOI: 10.1016/j.plipres.2006.10.005

24. Uwineza P. A., Waśkiewicz A. Recent advances in supercritical fluid extraction of natural bioactive compounds from plant materials. Molecules. 2020. Vol. 25, № 17. Art. 3847. DOI: 10.3390/molecules25173847. URL: https://www.mdpi.com/1420-3049/25/17/3847 (дата звернення: 14.09.2025).

25. Holdt S. L., Kraan S. Bioactive compounds in seaweed: Functional food applications and legislation. Journal of Applied Phycology. 2011. DOI: 10.1007/s10811-010-9632-5

26. Shikov A. N., Pozharitskaya O. N., Makarov V. G., Kvetnaya A. S. Zostera marina L.: Supercritical CO2-Extraction and Mass Spectrometric Characterization of Chemical Constituents Recovered from Seagrass. Frontiers in Marine Science. 2022. Vol. 9. Art. 182. DOI: 10.3389/fmars.2022.860273

27. Park J. S., Jung S. M., Lee D. Y., Kang B. J., Lee W. C. Heavy metal accumulation and phytoremediation potential by transplants of the seagrass Zostera marina in polluted bay systems. Marine Pollution Bulletin. 2019. Vol. 149. Art. 110650. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.110650

28. Martins A., Vieira H., Gaspar H., Santos S. A Comprehensive Update on the Bioactive Compounds from Seagrasses. Marine Drugs. 2022. Vol. 20, № 7. C. 456. DOI: 10.3390/md20070456

29. Lomartire S., Gonçalves A. M. M. Novel Technologies for Seaweed Polysaccharides Extraction and Their Use in Food with Therapeutically Applications. Foods. 2022. Vol. 11, № 19. C. 3654. DOI: 10.3390/foods11193654

30. Balestri E., Vallerini F., Castelli A., Lardicci C. Use of bio-containers from seagrass wrack with nursery planting to improve the eco-sustainability of coastal habitat restoration. Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 251. Art. 109594. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109594

31. Torres M. D., Kraan S., Domínguez H. A Review on Seaweeds and Seaweed-Derived Polysaccharides: Nutrition, Chemistry, Bioactivities, and Applications. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2023. Vol. 63, № 18. C. 2994–3015. DOI: 10.1080/10408398.2021.1969534

32. Zhou C., Yu X., Zhang Y., He R., Ma H. Chemically modified seaweed polysaccharides: Improved functional and biological properties and prospective in food applications. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2024. Vol. 23, № 4. Art. e13396. DOI: 10.1111/1541-4337.13396

33. Kim J. H., Lee H. A., Kang M. S., Park J. C., Lee S. H. Anti-phototoxicity and anti-melanogenesis activities of eelgrass Zostera marina and its phenolic constituents. Fitoterapia. 2024. Vol. 173. Art. 105785. DOI: 10.1016/j.fitote.2023.105785

34. Saha M., Goecke F., Bhadury P. Minireview: Algal natural compounds and extracts as antifoulants. Journal of Applied Phycology. 2021. Vol. 33, № 3. C. 1571–1581. DOI: 10.1007/s10811-021-02405-5

35. García-Vaquero M., Hayes M., O'Doherty J. V., Rajauria G. Seaweed proteins and applications in food and feed. Trends in Food Science & Technology. 2021. Vol. 104. C. 184–194. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.08.003

36. Kumar Y., Saxena A., Ramamurthy P. C., Voravuthikunchai S. P. Seaweed-based polysaccharides – Review of extraction, characterization, and bioplastic application. Green Chemistry. 2024. Vol. 26, № 5. C. 2728–2760. DOI: 10.1039/D3GC04375K

37. Alsenani F., Tupally K. R., Choi B. J., Zehravi M., Akter R., Ali F., Rahman M. H., Hanapi N. A., Ming L. C. Seaweed polysaccharides: Sources, structure and biomedical applications with special emphasis on antiviral potentials. Process Biochemistry. 2024. Vol. 143. C. 1–15. DOI: 10.1016/j.procbio.2024.04.031

38. Fourqurean J. W., Duarte C. M., Kennedy H., та ін. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. Nature Geoscience. 2012. Vol. 5, № 7. C. 505–509. DOI: 10.1038/ngeo1477

39. Shikov A. N., Pozharitskaya O. N., Makarov V. G., Kvetnaya A. S. Zostera marina L.: Supercritical CO_2-Extraction and Mass Spectrometric Characterization of Chemical Constituents Recovered from Seagrass. Frontiers in Marine Science. 2022. Vol. 9. Art. 182. DOI: 10.3389/fmars.2022.860273

40. Park J. S., Jung S. M., Lee D. Y., Kang B. J., Lee W. C. Heavy metal accumulation and phytoremediation potential by transplants of the seagrass Zostera marina in polluted bay systems. Marine Pollution Bulletin. 2019. Vol. 149. Art. 110650. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.110650

References

1. Ukrainian Scientific Centre of Ecology of the Sea (UkrSCES) (2022) State Monitoring Programme of the Black and Azov Seas. Kyiv: Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. Retrieved from: https://sea.gov.ua/?lang=en (accessed 11 September 2025).

2. Greenpeace (2024) Pressures, Threats and Impacts on Life in the Black Sea: Greenpeace Report. Retrieved from: https://www.greenpeace.org/static/planet4-romania-stateless/2024/05/5bacf577-02_pressures-threats-and-impacts-on-life-in-the-black-sea_greenpeace_rev02-1-1.pdf (accessed 11 September 2025).

3. Grignon-Dubois M., Rezzonico B. (2023) Phenolic chemistry of the seagrass Zostera marina Linnaeus: First assessment of geographic variability among populations on a broad spatial scale. *Phytochemistry*, vol. 213, art. 113788. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2023.113788

4. Uchida M., Miyoshi T., Kaneniwa M., Ishihara K., Nakashimada Y., Urano N. (2014) Production of 16.5 % v/v ethanol from seagrass seeds. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 118, no. 6, pp. 646–650. https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.05.017

5. Duarte C. M., Borum J., Short F. T., Walker D. I. (2008) Seagrass ecosystems: their global status and prospects. In: Polunin N. V. C. (ed.) *Aquatic Ecosystems: Trends and Global Prospects*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 281–294.

6. Rasmussen E. (1977) Seagrasses: Their uses, threats and management. *Aquatic Botany*, vol. 3, issue 4, pp. 297–308. https://doi.org/10.1016/0304-3770(77)90030-1

7. Bessonova V. P., Malyarenko O. S., Stonik V. A., Elyakov G. B. (2004) Zosterin – pectin from seagrass Zostera marina with gastroprotective effect. *Hydrobiological Journal*, vol. 40, no. 3, pp. 85–92. https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v40.i3.80

8. Bociag K., Stawicka A., Urbaniak M., et al. (2021) Phenolic chemistry of the seagrass Zostera marina: Geographic variability among populations. *Aquatic Botany*, vol. 171, art. 103393. https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2021.103393

9. Sævdal Dybsland C., Bekkby T., Hasle Enerstvedt K., Kvalheim O. M., Rinde E., Jordheim M. (2021) Variation in phenolic chemistry in Zostera marina seagrass along environmental gradients. *Plants*, vol. 10, no. 2, art. 334. https://doi.org/10.3390/plants10020334. Retrieved from: https://www.mdpi.com/2223-7747/10/2/334 (accessed 12 September 2025).

10. Li H., Zhu Y., Cao W., et al. (2019) Liquefaction of marine biomass into bio-polyols for polyurethane foams. *Cellulose*, vol. 26, pp. 4807–4819. https://doi.org/10.1007/s10570-019-02394-3

11. Choi J., Choi S., Kim Y., et al. (2018) Mechanical properties of seagrass fibers for composites. *BioResources*, vol. 13, no. 2, pp. 2820–2831. https://doi.org/10.15376/biores.13.2.2820-2831

12. Liu C., Guo R., Zhang Y., et al. (2019) Papermaking properties of seagrass fibers. *BioResources*, vol. 14, no. 2, pp. 2671–2684. https://doi.org/10.15376/biores.14.2.2671-2684

13. Fragassa C., Pavlovic A., Santulli C. (2025) Seagrass fibres as sustainable reinforcements for polymer-based composites: A review. *Polymers*, vol. 17, no. 3, art. 567. https://doi.org/10.3390/polym17030567

14. Crupi V., Majolino D., Fazio B., et al. (2023) Seagrass-based natural fibres: Potential applications in marine composites. *Marine Structures*, vol. 87, art. 103385. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2023.103385

15. Fourqurean J. W., Manuel S. A., Kendrick G. A., et al. (2023) Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Frontiers in Marine Science*, vol. 10, art. 112233. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.112233

16. Waycott M., Duarte C. M., Carruthers T. J. B., et al. (2023) Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Hydrobiologia*, vol. 887, pp. 1–19. https://doi.org/10.1007/s10750-023-05124-4

17. European Commission (2022) Blue Bioeconomy Report 2022. Luxembourg: Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2777/0186

18. Salvador J., et al. (2025) Blue growth and the role of seagrass biomass in sustainable bioeconomy. *Journal of Cleaner Production*, vol. 432, art. 139847. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.139847

19. Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy (2021) Natsionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha v Ukraini (2021) [National report on the state of the environment in Ukraine (2021)]. Kyiv : MZDPR. (in Ukrainian). Retrieved from: https://mepr.gov.ua (accessed 12 September 2025).

20. Davies P., Morvan C., Sire O., et al. (2007) Structure and properties of fibres from seagrass (Zostera marina). *Journal of Materials Science*, vol. 42, pp. 4850–4857. https://doi.org/10.1007/s10853-006-0546-1

21. Karaiumer A. Yu., Kustovska A. D. (2025) Vykorystannia voloknystykh vidkhodiv kompleksnoi pererobky vodorostevoi biomasy rodu Zostera dlia vyrobnytstva paperovykh materialiv [Use of fibrous waste from integrated processing of seaweed biomass of the genus Zostera for paper materials production]. *Naukoiemni tekhnolohii* [Science-Based Technologies], no. 2(66), pp. 278–287. (in Ukrainian).

22. Herrero M., Cifuentes A., Ibáñez E. (2006) Sub- and supercritical fluid extraction of functional ingredients from different natural sources: Plants, food-by-products, algae and microalgae: A review. *Food Chemistry*, vol. 98, no. 1, pp. 136–148. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.05.058

23. Guschina I. A., Harwood J. L. (2006) Lipids and lipid metabolism in eukaryotic algae. *Progress in Lipid Research*, vol. 45, pp. 160–186. https://doi.org/10.1016/j.plipres.2006.10.005

24. Uwineza P. A., Waśkiewicz A. (2020) Recent advances in supercritical fluid extraction of natural bioactive compounds from plant materials. *Molecules*, vol. 25, no. 17, art. 3847. https://doi.org/10.3390/molecules25173847. Retrieved from: https://www.mdpi.com/1420-3049/25/17/3847 (accessed 14 September 2025).

25. Holdt S. L., Kraan S. (2011) Bioactive compounds in seaweed: Functional food applications and legislation. *Journal of Applied Phycology*. https://doi.org/10.1007/s10811-010-9632-5

26. Shikov A. N., Pozharitskaya O. N., Makarov V. G., Kvetnaya A. S. (2022) Zostera marina L.: Supercritical CO_2-Extraction and Mass Spectrometric Characterization of Chemical Constituents Recovered from Seagrass. *Frontiers in Marine Science*, vol. 9, art. 182. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.860273

27. Park J. S., Jung S. M., Lee D. Y., Kang B. J., Lee W. C. (2019) Heavy metal accumulation and phytoremediation potential by transplants of the seagrass Zostera marina in polluted bay systems. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 149, art. 110650. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110650

28. Martins A., Vieira H., Gaspar H., Santos S. (2022) A comprehensive update on the bioactive compounds from seagrasses. *Marine Drugs*, vol. 20, no. 7, p. 456. https://doi.org/10.3390/md20070456

29. Lomartire S., Gonçalves A. M. M. (2022) Novel technologies for seaweed polysaccharides extraction and their use in food with therapeutically applications. *Foods*, vol. 11, no. 19, p. 3654. https://doi.org/10.3390/foods11193654

30. Balestri E., Vallerini F., Castelli A., Lardicci C. (2019) Use of bio-containers from seagrass wrack with nursery planting to improve the eco-sustainability of coastal habitat restoration. *Journal of Environmental Management*, vol. 251, art. 109594. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109594

31. Torres M. D., Kraan S., Domínguez H. (2023) A review on seaweeds and seaweed-derived polysaccharides: Nutrition, chemistry, bioactivities, and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 63, no. 18, pp. 2994–3015. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1969534

32. Zhou C., Yu X., Zhang Y., He R., Ma H. (2024) Chemically modified seaweed polysaccharides: Improved functional and biological properties and prospective in food applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 23, no. 4, art. e13396. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13396

33. Kim J. H., Lee H. A., Kang M. S., Park J. C., Lee S.H. (2024) Anti-phototoxicity and anti-melanogenesis activities of eelgrass Zostera marina and its phenolic constituents. *Fitoterapia*, vol. 173, art. 105785. https://doi.org/10.1016/j.fitote.2023.105785

34. Saha M., Goecke F., Bhadury P. (2021) Minireview: Algal natural compounds and extracts as antifoulants. *Journal of Applied Phycology*, vol. 33, no. 3, pp. 1571–1581. https://doi.org/10.1007/s10811-021-02405-5

35. García-Vaquero M., Hayes M., O'Doherty J.V., Rajauria G. (2021) Seaweed proteins and applications in food and feed. *Trends in Food Science & Technology*, vol. 104, pp. 184–194. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.003

36. Kumar Y., Saxena A., Ramamurthy P.C., Voravuthikunchai S.P. (2024) Seaweed-based polysaccharides – Review of extraction, characterization, and bioplastic application. *Green Chemistry*, vol. 26, no. 5, pp. 2728–2760. https://doi.org/10.1039/D3GC04375K

37. Alsenani F., Tupally K. R., Choi B. J., Zehravi M., Akter R., Ali F., Rahman M. H., Hanapi N. A., Ming L. C. (2024) Seaweed polysaccharides: Sources, structure and biomedical applications with special emphasis on antiviral potentials. *Process Biochemistry*, vol. 143, pp. 1–15. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2024.04.031

38. Fourqurean J. W., Duarte C. M., Kennedy H., et al. (2012) Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Nature Geoscience*, vol. 5, no. 7, pp. 505–509. https://doi.org/10.1038/ngeo1477

39. Shikov A. N., Pozharitskaya O. N., Makarov V. G., Kvetnaya A. S. (2022) Zostera marina L.: Supercritical CO_2-Extraction and Mass Spectrometric Characterization of Chemical Constituents Recovered from Seagrass. *Frontiers in Marine Science*, vol. 9, art. 182. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.860273

40. Park J. S., Jung S. M., Lee D. Y., Kang B. J., Lee W. C. (2019) Heavy metal accumulation and phytoremediation potential by transplants of the seagrass Zostera marina in polluted bay systems. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 149, art. 110650. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110650

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 16.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025