

DOI: 10.18372/2310-5461.66.19918
УДК665.939.35:676 (045)

А. Ю. Караюмер,

Державний університет «Київський авіаційний інститут»,
orcid.org/0000-0002-7031-1096
e-mail: shipilova091198@gmail.com;

А. Д. Кустовська, канд. хім. наук, доц.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»,
orcid.org/0000-0002-6836-3305
e-mail: akust7@gmail.com

ВИКОРИСТАННЯ ВОЛОКНИСТИХ ВІДХОДІВ КОМПЛЕКСНОЇ ПЕРЕРОБКИ ВОДОРОСТЕВОЇ БІОМАСИ РОДУ *ZOSTERA* ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ПАПЕРОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Вступ

Морськими травами прийнято називати квіткові рослини, які утворюють великі підводні луки в прибережних морських водах по всьому світу. Здебільшого це субтропічний та помірний кліматичні пояси які є більш прийнятними для росту представників морських трав. Згідно досліджень А. Калугіної-Гутник [1], морські трави утворюють п'ять рослинних угруповань, які можуть складатись лише з одного виду або ж мати змішаний склад. До них прийнято відносити асоціації *Zostera marina*, *Zostera noltei*, *Stuckenia pectinata*, *Ruppia spiralis* та *Zannichellia palustris* - *Zostera noltei*. Причина утворення таких асоціатів зумовлена чутливістю морських трав до зміни солоності води та глибини морського дна, а також залежить від рівня забруднення води та евтрофікації [2–5].

Згідно даних «*The Catalogue of Life*» [2] географічне поширення морської трави родини *Zosteraceae* спостерігається на північному-заході Європи, північних частинах США та Канади, а також біля берегів Південної та Північної Кореї, Японії (рис.1). Вид *Zostera marina* є одним з представників макрофітів Чорноморського басейну (південні території України), що слугують прихистком для морських жителів, покращують якість води та захищають берегову лінію від ерозії. Водночас у період листопаду (серпень-жовтень) морські трави потрапляють на берегову лінію у вигляді штормових викидів, що співпадає з курортним сезоном і створює дискомфорт для відпочивальників. Історично відомо, що *Zostera*, через свою природну стійкість до гниття, використовувалася як теплоізоляційний матеріал у житлі, наповнювач для матраців і подушок, а також як покрівельний матеріал. Так ще у 1834 році під час будівництва будинку Ніколсона-

Ендрюса на острові Нантакет як ізолюючий матеріал для стін було використано морські трави родини *Zosteraceae*. У 1891 році Компанія *Samuel Cabot, Inc.* отримала патент на виробництво ковдри *Cabot's Quilt*, тепло- та звуко ізолятора, виготовленого з морської трави, спресованої між двома шарами крафт-паперу. Згодом у 1977 році було одержано патент на порошкоподібний препарат з *Zostera M.*, призначений для розпилювання на конструкції як вогнезахисний, звукоізоляційний та електроізоляційний засіб, однак на сьогодні цей продукт не має комерційного застосування [6].

Біомаса морських трав може слугувати сировиною для виробництва біогазу або біопалива, що є альтернативою викопним джерелам енергії. Вміст вуглеводів у насінні *Zostera marina* високий, порівняно з їх вмістом у традиційних зернових культурах, що робить цю сировину придатною для ферментації з метою отримання етанолу – альтернативного біопалива. Крім того, дослідження показують, що морські трави здатні поглинати атмосферний вуглець, що сприяє зменшенню антропогенного впливу на довкілля [7].

Постановка проблеми

Целюлозно-паперова промисловість у глобальному масштабі перебуває під тиском обмеженості ресурсної бази, що зумовлено як скороченням доступних лісових масивів, так і підвищеними вимогами до екологічної безпеки та переходу до принципів сталого розвитку. У цьому контексті особливої актуальності набуває необхідність впровадження альтернативних джерел волокнистої сировини, здатних забезпечити зменшення антропогенного навантаження на довкілля.

Одночасно з цим, у прибережних зонах Чорноморського регіону щорічно фіксуються значні обсяги штормових викидів морських трав, зокрема представників роду *Zostera*, які накопичуються на береговій лінії та спричиняють екологічний і санітарно-естетичний дискомфорт, особливо в періоди рекреаційної активності. Попри наявність потенційної цінності зазначеної біомаси, на сьогодні відсутній науково обґрунтований та технологічно відпрацьований підхід до її раціональної утилізації.

Зокрема, недостатньо досліджено можливості комплексної переробки водоростевої біомаси з вилученням цінних фракцій та подальшим використанням твердого залишку як сировини для виробництва паперових матеріалів. Це формує науково-прикладну проблему, яка потребує всебічного аналізу з урахуванням сезонної та географічної варіабельності сировини, а також оптимізації технологічного процесу для одержання продуктів з заданими функціональними характеристиками.



Рис. 1. Географічне поширення морської трави родини *Zosteraceae* [8]

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Комерційне використання *Zostera M.* розширилося в останні роки. Цінні продукти, отримані з цих морських трав – це харчові добавки, багаті мінералами та мікроелементами, а також біоактивні речовини для косметичних засобів [9–11]. Дослідження [11] показують, що екстракти зостери морської містять біологічно активні молекули, які мають антиоксидантні та протизапальні властивості, що робить їх перспективними компонентами для косметичної промисловості. Група вчених з Португалії досліджувала хімічний склад екстрактів *Zostera M.* та ідентифікували ряд ненасичених сполук похідних фенолу, серед яких розмаринава кислота, лютеолін, сагерінова кислота, умбеліферон, а також пектини, зокрема зостерин [12, 13]. Всі ці сполуки мають широкий спектр застосувань у медицині, фармацевтиці, косметології та харчовій промисловості. Наразі біомаса *Zostera M.* також знайшла застосування в сільськогосподарській галузі як органічне добриво.

Целюлозні компоненти, що вилучались з морських трав, досліджувались на предмет можливості їх використання як сировини для виготовлення волокон, альтернативних існуючим нату-

ральними та синтетичним волокнам. Для цього визначали їх будову, здатність до розтягування, та поведінку при обробці хімічними агентами [14, 15]. Волокнисті залишки, багаті на целюлозу та геміцелюлозу, є потенційним ресурсом для паперової та пакувальної промисловості (рис. 2).

На користь цього свідчить міцність волокон у вологому стані, природна стійкість до мікробного розкладання та унікальні текстурні властивості. Стратегія використання цих волокон узгоджується зі зростаючим попитом на пошук альтернативи деревинній сировині для виробництва паперу, що має важливе природоохоронне значення дає переваги для навколишнього середовища.

Згідно з встановленим Режимом рибальства в басейні Азовського та Чорного морів (2025 р) дозволено промислова заготівля зостери в акваторії моря та лиманів, на віддалені від берега до 10 м протягом усього року [16]. Це дозволяє проводити збір штормових викидів протягом року, заготовляти їх для подальшої переробки, що дає змогу забезпечити сировинний потенціал для їх комерційного використання.

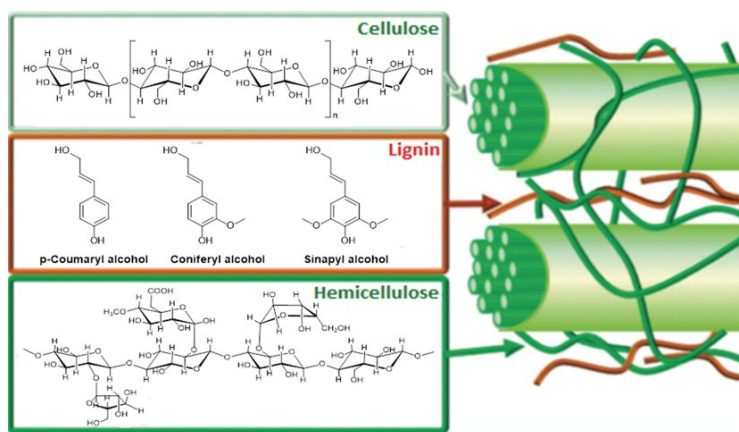


Рис. 2. Волокнисті компоненти рослинної стінки : лігнін, целюлоза та геміцелюлоза [15]

Аналіз досліджень складу і властивостей *Zostera M.* демонструє доцільність застосування їх комплексної переробки, яка дозволяє отримати максимальну кількість корисних речовин, мінімізуючи відходи та підвищуючи економічну ефективність. Це відповідає принципам сталого розвитку та «зеленої» економіки.

Метою даної роботи є експериментальне дослідження можливості використання волокнистих відходів, отриманих після комплексної переробки морських трав роду *Zostera marina*, як альтернативної сировини для виготовлення паперових матеріалів, а також аналіз впливу сезонного та географічного чинника на якість отриманого продукту.

Виклад основного матеріалу

Сировина

Морські трави родини *Zosteraceae* було зібрано вздовж берегової лінії курортних зон м. Лазурне Херсонської області південної України та Лонг Біч Кушадаси район провінції Айдин на Егейському узбережжі західної Туреччини. Всі зразки було зібрано у вигляді штормових викидів у пе-

ріоди червень-липень та вересень-жовтень протягом 2021–2024 року. Суху масу збирали у мішки, а вологі водорості поміщали у вакуумні пакети для транспортування до лабораторії для подальшої обробки.

З початком повномасштабного вторгнення Росії в Україну від 24 лютого 2022 року збір сировини та її перевезення до лабораторій став неможливим через обмежений доступ до берегових ліній Чорного моря у Херсонській області та біля берегової лінії м. Очаків Миколаївської області південної України. Пошук альтернативної сировини став актуальним з точки зору продовження наукових досліджень та дослідження впливу місця збору сировини на цільові продукти, виділені з неї. Тому нині дослідження ведуться з використанням сировини, зібраної з узбережжя Туреччини. Порівняння результатів отриманих з використанням сировини, зібраної в Україні і Туреччині у різні пори року (табл. 1) є корисним для коригування технології переробки водоростей в залежності від місця їх збору.

Таблиця 1

Дослідні зразки водоростевої сировини *Zostera M*

Зразок	Місце збору	Період збору	Акваторія
1	Кушадаси, Туреччина	жовтень	Егейське море
2	Кушадаси, Туреччина	червень	Егейське море
3	Очаків, Україна	жовтень	Чорне море

Підготовка до обробки та дослідження будови

Сухі водорості, забруднені сміттям, що потрапило у біомасу під час шторму, піддавали механічному очищенню. Водорості розподіляли шарами на металічній решітці та струшували. При цьому дрібні забруднення під дією сил тяжіння просипалися через отвори у решітці. Далі

біомаса піддавалась візуальному контролю і за наявності ниток від риболовних сіток, синтетичних волокон, або іншого сміття великого розміру, такі домішки видалялися вручну. Суха біомаса водоростей промивалась два рази проточною водою та рівномірно розподілялась для висушування природнім шляхом при температурі 18–25°C.

Підготовка зразків для дослідження їх будови включала подрібнення декількох очищених стебел рослини на шматки (2–3 см) та занурення їх у воду (20 ± 2 °C та 80 ± 2 °C) на 10 хв. Насичені водою зразки дещо підсушували до кімнатно-сухого стану, робили свіжий зріз скальпелем та досліджували за допомогою мікроскопу *Celestron Labs S10-60 Stereo Microscope* (20-кратне збільшення).

Екстрагування жиру

Наважку водоростей масою 20 г зважували з точністю 0,0001 г та поміщали у екстрактор Со-кслета. Як розчинник використовували гексан. Температура водяної бані 75 ± 3 °C. Жир екстрагували протягом 6-ти годин.

По завершенню екстракції водорості виймали і висушували за кімнатної температури (20 ± 2 °C), а розчинник відганяли. Колбу із жировою фракцією висушували в сушильній шафі при температурі 105 °C протягом 1 години і зважували. Потім продовжували процес сушіння і колбу зважували через кожні 0,5 години до встановлення постійної маси. Після охолодження колби у ексікаторі (30 ± 5 хв) її зважували з точністю до 0,0001 г та розраховували масу жиру.

Виділення пектину

Кислотний гідроліз водоростевої сировини проводили при температурі 70 ± 2 °C у присутності HCl (гідромодуль 1:10) протягом 3,5 год. Розчин-гідролізат відокремлювали від залишків клітинної стінки водорості фільтруванням, залишок морської трави промивали дистильованою водою та висушували при 55 ± 5 °C для подальшої обробки.

Для виділення пектину морські трави оброблялись 1 %-м розчином $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$ у термостаті при температурі 50 °C (гідромодуль 1:15) протягом 5 годин. Для забезпечення екстракції пектину розчини залишали на 10 годин. Осадження проводили HCl (10 % мас.) попередньо відділивши гідролізат від водоростевого залишку. Пектин осаджували у вигляді желеподібної фази, яку відокремлювали від розчину та висушували при кімнатній температурі.

Обробка результатів

Вихід продуктів переробки водоростей розраховували як співвідношення між масою отриманих продуктів після переробки водоростей та масою вихідної сировини взятої для переробки, у відсотках.

$$W = \frac{M_{\text{продукту}}}{M_{\text{сировини}}} \cdot 100 \%$$

де: W – вихід продукту, %; $M_{\text{(продукту)}}$ – маса отриманого продукту, г; $M_{\text{(сировини)}}$ – маса вихідної сировини (водоростей), г.

Для візуалізації отриманих результатів використовували програмне забезпечення *Wondershare Edraw Max* та *Microsoft Excel*.

Виробництво паперу

М'який залишок, отриманий після виділення жирової фракції і пектину, обробляли двома різними методами; (1) розбивали у апараті *YT-PFI* для розмелювання целюлози протягом 5 хвилин, (2) замочували у воді поки волокно не розм'якне, без розмолу.

Формування відливок целюлози проводили на листовідливному апараті *Sheet Former with white water circulation Rapid Köthen* (ISO 5269-2; DIN 54358) [17]. Середній розмір отриманих відливок 200 мм, маса однієї відливки складала в середньому 2–2,3 г.

Фізико-механічні показники паперу

Визначення міцності під час розтягування волокон у вироблених аркушах паперу досліджували на приладі РМБ – 10-2М. Сутність методу полягає у визначенні сили, що призводить до руйнування зразка і видовження зразка до моменту його розриву під час навантаження. Для проведення випробувань папір розрізали на 5 смужок (1×5 см). Товщину паперу (в мм) визначали за ISO 534 на товщиномірі ТНБ – 1–А, що призначений для визначення товщини паперу і картону до 1,0 мм.

Повітропроникність по методу Герлея визначали згідно методики ISO 5636-5 [18] згідно з якою вимірювали об'єм стисненого повітря, яке проходить через дослідний зразок, для цього був використаний прилад *L&W Micrometer Lorentzen & Wettre Paper Tester*. Ступінь полімеризації волокна визначали за методикою ІЕС 60450, що базується на розчиненні паперу в мідьетилендіаміновому комплексі (МЕД комплекс), визначенні в'язкості цього розчину та розрахунку величини показника середнього віскозиметричного ступеню полімеризації.

Результати та їх обговорення

Вид сировини та його склад

Рисунок 3 демонструє зовнішній вигляд морських трав зібраних у періоди червень-липень та вересень-жовтень протягом 2021–2024 років вздовж берегової лінії курортних зон м. Лазурне Херсонської області та м. Очаків Миколаївської області південної України та Лонг Біч Кушадаси район провінції Айдин на Егейському узбережжі західної Туреччини (рис. 3).

Морські трави зібрані в Туреччині у червні (зразок 2) мають дещо світліше забарвлення, вони більш пружні і стійкі до механічного руйнування у порівнянні з травами, що були зібрані у

жовтні (зразок 1). Трави, зібрані в Україні у жовтні (зразок 3) відрізняються від трав, зібраних у той же час в Туреччині за кольором та товщиною стебел.



Рис. 3. Зовнішній вигляд морських трав родини *Zosteraceae*:
а – зразок 1; б – зразок 2; в – зразок 3 відповідно таблиці 1

Зібрані морські трави були очищені від механічних домішок та піддані постадійній обробці з послідовним виділенням різних фракцій. При цьому була запропонована схема комплексної

переробки біомаси водоростей, яка включала екстракцію жирової фракції, кислотний гідроліз, екстрагування пектину та формування паперових напівфабрикатів (рис. 4).

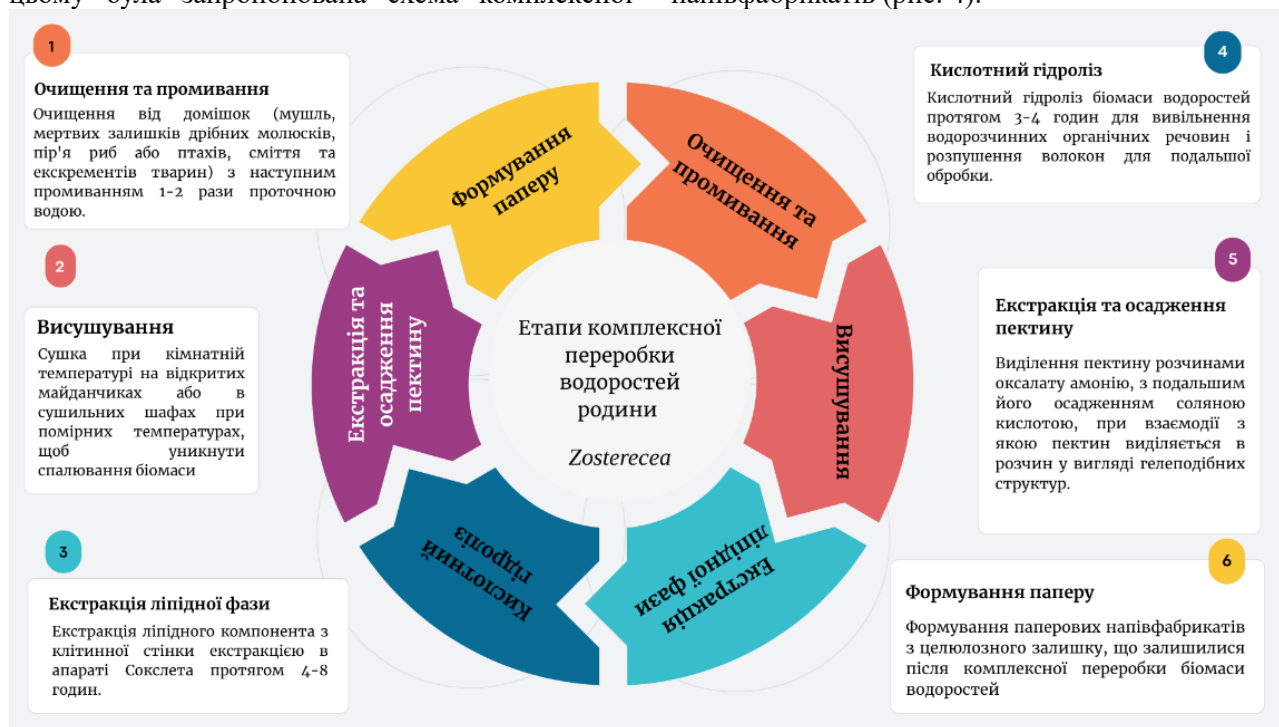


Рис. 4. Основні етапи схеми комплексної переробки морських водоростей роду *Zostera*

Було встановлено, що період збору штормових викидів впливає як на зовнішній вигляд, так і на вихід продуктів комплексної переробки (табл. 3). Так з біомаси, зібраної у червні (зразок 2) вдалося вилучити на 20 % більше жиру і на 44 % менше пектину ніж з сировини зібраної у жовтні (зразок 1). Співвідношення жир-пектин в сировині, зібраній влітку і восени знаходяться в межах 2,4 : 1 і 1:1, відповідно. Вихід твердого залишку, що головним чином представлений лігноцелюлозою, з трави літнього збору на 10 % ви-

щий, ніж осіннього, при цьому втрати біомаси з технологічними розчинами на 20 % менші.

Суттєвий вплив на вихід продуктів комплексної переробки чинить районування морської трави. Так переробка *Zostera M.*, зібраної у жовтні в акваторії Чорного (зразок 3) та Егейського (зразок 1) моря, дозволяє одержати жирову і пектинову фракції у співвідношенні 1:4,2 і 1:1, відповідно. Тобто сировина, зібрана в Україні, суттєво збагачена пектином. При цьому з неї одержано на 13 % більше твердого залишку, а втрати маси з

технологічними розчинами на 25 % менші у порівнянні з турецькою сировиною. Варто відміти-

ти, що для морських трав зібраних восени, вміст пектину вище.

Таблиця 3

Вихід продуктів комплексної переробки морських трав *Zostera M*

Зразок \ Вміст продуктів	Ліпідна фракція, %	Пектинова фракція, %	Твердий залишок, %	Втрата маси з технологічними розчинами, %
1	4,64	4,22	58,13	33,00
2	5,80	2,38	65,50	26,31
3	1,62	6,79	67,02	24,59

Зовнішній вигляд пектину, одержаного з дослідних зразків, також суттєво відрізняється. Пектин, виділений із зразка 2 утворює не структурований колоїдний розчин гелю, який не містить видимих желеподібних угруповань. Натомість пектин, виділений із зразків 1 та 3 після осадження утворює стійку желеподібну структуру. У водоростей зібраних восени не лише підвищується вміст пектину, а й покращується його якість.

Характеристики та механічні властивості паперу

Водоростевий твердий залишок піддавався механічному подрібненню для отримання целюлозного напівфабрикату. Зразки паперових листів (рис. 5), були сформовані за допомогою листо-відливної апарату без додавання зв'язуючих агентів. Було отримано 3 зразки паперових листів, фізико-механічні показники яких наведені у табл. 4.

Таблиця 4

Фізико-механічні показники відлинок

Відлидки	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>B</i>
Характеристики	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3
Сировина	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3
Маса квадратного метру, г/м ²	35	37	68
Повітропроникність, л/м ² *с	600	12800	4300
Розривність в сухому стані, Н	3,5	–	–
Товщина, мм	0,125	0,132	0,26

Показники «повітропроникність» та «розривність» є взаємопов'язаними: різке збільшення повітропроникності означає різке погіршення механіко-фізичних показників відлидки. Якість паперових листів вироблених з сировини, зібраної влітку (зразок 2, відлидка Б) суттєво нижче ніж відлинок з осінньої сировини. Так, для відлидки *B* значення повітропроникності у 20 разів вище у порівнянні із відлиркою *A*, і у 7 разів вище у порівнянні із відлиркою *B*. Розривність у сухому стані при такому значенні повітропрони-

кності визначити неможливо, що пояснюється слабким зв'язуванням волокон.

З метою підтвердження гіпотези, про можливість підвищення показників якості шляхом змішування сировини різного походження, було виготовлено дві відливки – *Г* та *Д*. Як сировину для них використовували суміш твердих залишків від комплексної переробки різної сировини. Склад сировини та фізико-механічні показники паперових відлинок наведені у табл. 5.

Таблиця 5

Фізико-механічні показники відлинок зі змішаної сировини

Відливки	<i>Г</i>	<i>Д</i>
Характеристики	Зразок 1 : Зразок 2 1:1	Зразок 1 : Зразок 2 : Зразок 3 1:1:1
Співвідношення сировини	Зразок 1 : Зразок 2 1:1	Зразок 1 : Зразок 2 : Зразок 3 1:1:1
Маса квадратного метру, г/м ²	70	68
Повітропроникність, л/м ² *с	1280	2140
Розривність в сухому стані, Н	1,0	0,3
Товщина, мм	0,25	0,26

Відливка *Г* була одержана компаундуванням сировини для відливок *А* та *Б* у співвідношенні 1:1. Повітропроникність відливки *Г* виявилась у двічі вищою ніж відливки *А* і в 10 разів нижчою ніж відливки *Б*. Для відливки *Д* (компаундування сировини для відливок *А*, *Б* та *В* у співвідношенні 1:1:1) повітропроникність у 3,5 разів вище ніж відливки *А* і нижче у порівнянні з відливками *Б*

і *В* у 6 і 2 рази, відповідно. Це демонструє відсутність адитивності при змішуванні різної сировини. При цьому вплив кожного компонента визначається його природою і надає потенційну можливість отримання відливки з задовільними показниками якості шляхом додавання до сировини низької якості сировини високої якості. Зовнішній вигляд відливок зображений на рис. 5.

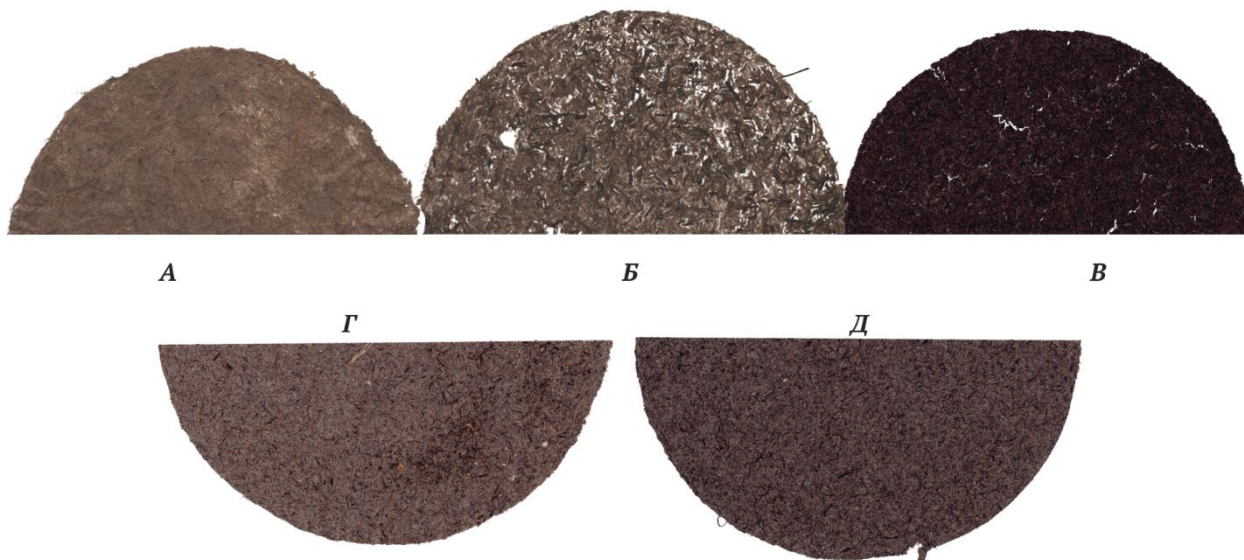


Рис. 5. Зовнішній вигляд паперових відливок відповідно до таблиць 4–5

Було показано, що якість обробки на всіх етапах комплексної переробки сировини впливає на якість формування. Зразки паперу було виготовлено з біомаси водоростей без попередньої обробки та після екстракції ліпідної фракції. Необроблені морські трави не піддаються формуванню у

паперову відливку через міцну клітинну стінку та відсутність зав'язків між волокнами. Тоді як сировина, що була оброблена розчинником та висушена після екстрагування жиру, формується у відливку. Зовнішній вигляд відливок з сировини після екстракції показаний на рис. 6.

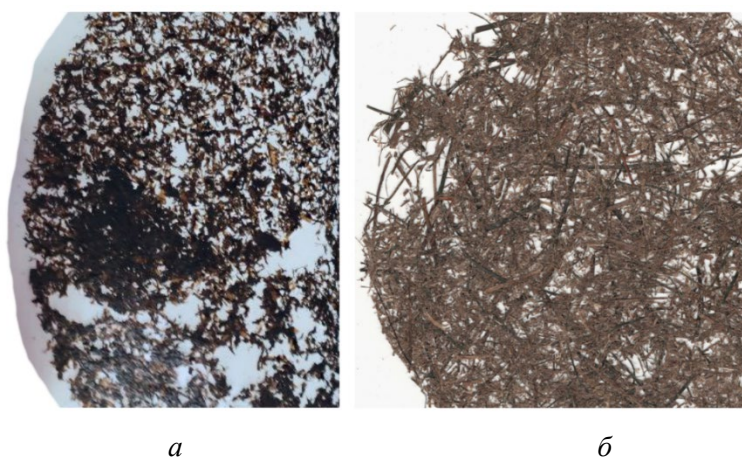


Рис. 6. Зовнішній вигляд паперових відливок *Zostera M* після екстрагування ліпідної фракції:
а – сировина – зразок 3; б – сировина – зразок 1

Подрібнення біомаси у сухому стані на початковому етапі обробки погіршує якість відливки, що призводить до зниження її міцності. Утворюється рихлий папір з високим показником повітропроникності. Він погано тримає форму та при висиханні стає надто крихким (рис. 6). Таким

чином, комплексна переробка сировини дозволяє отримати пектинові та ліпідні продукти, а також полегшити формування паперу.

Одержані результати показали принципову можливість використання біомаси водоростей, як сировини паперової для промисловості. Наразі

отримані відлиски паперу не відповідають вимогам чинних ДСТУ України, що застосовуються до пакувальних чи фільтрувальних матеріалів. Подальші дослідження мають на меті вдосконалення схеми комплексної переробки. Одним з напрямків покращення якості паперової продукції з біомаси водоростей може бути введення зв'язуючого. При цьому перевагу доцільно надавати зв'язуючим біологічного походження.

Висновки

Доведена принципова можливість використання волокнистих відходів комплексної переробки морських трав роду *Zostera marina* як альтернативної сировини для виробництва паперових матеріалів. Морські трави піддавали комплексній переробці, що включала екстракцію ліпідної фракції, кислотний гідроліз, екстракцію пектину та формування паперового напівфабрикату.

Вихід продуктів комплексної переробки суттєво залежить від сезону збору і районування водоростей. Біомаса, зібрана в Україні, збагачена пектином у порівнянні з турецькою біомасою. При цьому українська біомаса дає більше твердого залишку і менше втрат біомаси з технологічними розчинами. Біомаса зібрана влітку збагачена жиром, а восени – пектином.

З твердого залишку комплексної переробки були сформовані паперові відлиски без зв'язуючого. Відлиски кращої якості були отримані з біомаси, зібраної восени. Показано, що змішуванням різних видів сировини можна регулювати властивості отриманого паперу.

Глибина обробки сировини впливає на якість формування. Необроблені морські трави не піддаються формуванню у паперову відлиску через міцну клітинну стінку та відсутність зав'язків між волокнами. Тоді як сировина, що пройшла стадію екстрагування жиру задовільно формується у відлиску. Подрібнення морських трав на початковому етапі обробки погіршує якість формування паперу в подальшому.

Запропонований підхід переробки біомаси водоростей надає альтернативу традиційній сировині для виробництва паперових матеріалів і забезпечує економічне рішення для управління пляжними відходами. Таке рішення особливо актуальне для чорноморських країн, де під час туристичних сезонів морські трави накопичуються як берегове сміття.

В роботі доведена принципова можливість використання твердого залишку переробки водоростевої біомаси для одержання паперової продукції, однак отриманий в такий спосіб папір ще не відповідає вимогам чинних ДСТУ України, що застосовуються до пакувальних чи фільтруваль-

них матеріалів. Тому подальші дослідження мають на меті вдосконалення схеми переробки біомаси для максимального вилучення корисних компонентів, а також вдосконалення процесу формування паперу.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Калугина-Гутник А.А. 1975. Фитобентос Черного моря. Киев: Наук. думка. 248 с.
- [2] McRoy C. P., Helfferich C. Seagrass Ecosystem: A Scientific Perspective. New York: Marcel Dekker, 1977. 314 p. <http://dx.doi.org/10.1515/BOT.2009.058>
- [3] Bánki O., Roskov Y., Döring M., Ower G., Hernández Robles D. R., Plata Corredor C. A., Stjernegaard Jeppesen T., Örn A., Vandepitte L., Hobern D., Schalk P., DeWalt, R. E., Ma, K., Miller, J., Orrell T., Aalbu R., Abbott J., Adlard R., Aedo C., et al. (2024). Catalogue of Life Checklist (Version 2024-03-26). Catalogue of Life. <https://doi.org/10.48580/dfz8d>
- [4] Milchakova N, Phillips R (2003) Black Sea seagrasses. *Marine Pollution Bulletin*, 46 (6): 695-699. [https://doi.org/10.1016/s0025-326x\(02\)00361-2](https://doi.org/10.1016/s0025-326x(02)00361-2)
- [5] Milchakova NA, Alexandrov VV (2011) Seagrasses of the Crimean coastal zone, the Black Sea (1960–2009). 1.0. Sevastopol, IBSS NASU. Release date: 2021-12-11. URL:http://ipt.vliz.be/eurobis/resource?r=milchakova_seagrasses_ccz
- [6] Патент US4016084A URL: <https://patents.google.com/patent/US4016084>
- [7] 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 Dec;118(6):646-50. doi: 10.1016/j.jbiosc. 2014.05.017. Epub 2014 Jun 24. PMID: 24969514. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.05.017>
- [8] Кустовська А. Д., Шипілова А. Ю. Переробка штормових викидів морської трави родини *Zosteraceae* з подальшим використанням їх у різних галузях промисловості//VIII Міжнародній науково-практичній інтернет конференції «Хімія, біотехнологія, екологія та освіта» (м. Полтава), 2024 р.. 98–100 с.
- [9] Holmer, Marianne (1 November 2018). Underwater Meadows of Seagrass Could Be the Ideal Carbon Sinks". *Smithsonian Magazine*. Retrieved 11 August 2021.
- [10] Custódio L.; Laukaityte S.; Engelen A.H.; Rodrigues M.J.; Pereira H.; Vizetto-Duarte C.; Barreira L.; Rodríguez H.; Alberício F.; Varela J. A comparative evaluation of biological activities and bioactive compounds of the seagrasses *Zostera marina* and *Zostera noltei* from southern Portugal. *Nat. Prod. Res.* 2016, 30, 724–728. <https://doi.org/10.1080/14786419.2015.1040791>
- [11] Pirvu, L., Berquand, A., Rabenoelina, F., Couteau, C., Coiffard, L., & Hardouin, K. (2025). Phytochemical Characterization and Antioxidant Properties of *Zostera marina* Extracts for Poten-

- tial Cosmetic Applications. *Molecules*, 30(3), 485. <https://doi.org/10.3390/molecules30030485>
- [12] El-Beltagi HS, Mohamed AA, Mohamed HI, Ramadan KMA, Barqawi AA, Mansour AT. Phytochemical and Potential Properties of Seaweeds and Their Recent Applications: A Review. *Mar Drugs*. 2022 May 24;20(6):342. PMID: 35736145; PMCID: PMC9227187. <https://doi.org/10.3390/md20060342>
- [13] Cattò C., Dell'Orto S., Villa F., Villa S., Gelain A., Vitali A., Marzano V., Baroni S., Forlani F. & Cappitelli F. (2015). Unravelling the structural and molecular basis responsible for the anti-biofilm activity of zosteric acid. *PLOS ONE*, 10(7), e0131519. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131519>
- [14] Davies P., Morvan C., Sire O. *et al.* Structure and properties of fibres from sea-grass (*Zostera marina*). *J Mater Sci* **42**, 4850–4857 (2007). <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0546-1>
- [15] Kumaravel, Sangeetha & Thiruvengadam, Prabhakaran & . K, Karthick & Selvasundrasekar, Sam Sankar & Karmakar, Arun & Kundu, Subrata. (2020). Green and sustainable route for oxidative depolymerization of lignin: New platform for fine chemicals and fuels. *Biotechnology Progress*. 37. 10.1002/btpr.3111. <https://doi.org/10.1002/btpr.3111>
- [16] НАКАЗ від 12.12.2024 № 4295 Міністерство юстиції України 18 грудня 2024 року за № 1943/43288 Про затвердження Режиму промислу в басейні Чорного моря у 2025 році / <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1943-24#Text>
- [17] ISO 5269-2:2004 / Pulps – Preparation of laboratory sheets for physical testing. Part 2: Rapid-Köthen method URL: <https://www.iso.org/standard/39341.html>
- [18] ISO 5636-5:2013 / Paper and board – Determination of air permeance (medium range). Part 5: Gurley method URL: <https://www.iso.org/standard/53062.html>

Караюмер А. Ю., Кустовська А. Д.

ВИКОРИСТАННЯ ВОЛОКНИСТИХ ВІДХОДІВ КОМПЛЕКСНОЇ ПЕРЕРОБКИ ВОДОРОСТЕВОЇ БІОМАСИ РОДУ *ZOSTERA* ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ПАПЕРОВИХ МАТЕРІАЛІВ

У роботі доведена потенційна можливість використання біомаси морських трав родини *Zosteraceae* (зокрема *Zostera marina*) зі штормових викидів як альтернативи традиційній сировині для виробництва паперу. Дослідні зразки були зібрані у різні сезони на узбережжях Чорного моря (Україна) та Середземного моря (Туреччина), що дозволило провести порівняльний аналіз впливу регіональних та сезонних факторів на властивості сировини.

Встановлено, що вихід ліпідів, пектинових речовин та целюлозовмісного залишку суттєво варіюється залежно від місця та сезону збору біомаси. З твердого целюлозовмісного залишку виготовлено експериментальні зразки паперу без додавання зв'язуючих компонентів. Найкращі показники міцності, щільності мають зразки паперу, виготовлені з біомаси, зібраної у весняно-літній період, коли вміст целюлози в рослинах досягає максимуму. Папір, отриманий з української сировини, демонструє вищу міцність на розрив порівняно зі зразками з турецької сировини, що пояснюється відмінностями в екологічних умовах зростання рослин. Мікроскопічний аналіз підтвердив наявність довгих волокон у структурі паперу, що позитивно впливає на його фізико-механічні властивості.

Розроблена технологічна схема комплексної переробки біомаси *Zostera marina* дозволяє ефективно трансформувати штормові викиди морських трав у цінну сировину для паперової промисловості. Застосування цієї технології має значний екологічний ефект, сприяючи очищенню прибережних екосистем, зменшенню вирубки лісів та розвитку циркулярної економіки. Отримані результати підтверджують можливість виробництва паперових матеріалів задовільної якості з біомаси *Zostera*, що може стати важливим кроком у напрямку диверсифікації сировинної бази целюлозно-паперової промисловості. Подальші дослідження будуть спрямовані на оптимізацію технологічних параметрів переробки та покращення якісних характеристик паперової продукції з морських трав.

Ключові слова: паперова основа; відновлювані ресурси; водорості; біомаса; волокнисті матеріали.

Karaiumer A., Kustovska A.

USING OF FIBROUS WASTE FROM COMPREHENSIVE PROCESSING OF ALGAE BIOMASS OF THE GENUS *ZOSTERA* AS A RAW MATERIAL FOR THE PRODUCTION OF PAPER MATERIALS

The study demonstrates the potential of using the biomass of seagrasses from the *Zosteraceae* family (particularly *Zostera marina*) from storm deposits as an alternative to traditional raw materials for paper production. Research samples were collected during different seasons along the coasts of the Black Sea (Ukraine) and the Mediterranean Sea (Turkey), which enabled a comparative analysis of the influence of regional and seasonal factors on the properties of the raw material.

It was established that the yields of lipids, pectic substances, and cellulose-containing residue vary significantly depending on the location and season of biomass collection. Experimental paper samples were produced from the solid cellulose-containing residue without the addition of binding components. The best strength and density characteristics were observed in paper samples made from biomass collected during the spring-summer period, when the cellulose content in the plants reaches its peak.

Paper produced from Ukrainian raw material demonstrated higher tensile strength compared to samples made from Turkish biomass, which is attributed to differences in the ecological growth conditions of the plants. Microscopic analysis confirmed the presence of long fibers in the paper structure, which positively affects its physical and mechanical properties.

*The developed technological scheme for the comprehensive processing of *Zostera marina* biomass allows for the efficient transformation of storm-deposited seagrass into valuable raw material for the paper industry. The application of this technology has a significant environmental impact, contributing to the cleaning of coastal ecosystems, reducing deforestation, and promoting the development of the circular economy. The results obtained confirm the feasibility of producing satisfactory-quality paper materials from *Zostera* biomass, which could become an important step toward diversifying the raw material base of the pulp and paper industry. Further research will focus on optimizing processing parameters and improving the quality characteristics of paper products made from seagrass*

Keywords: paper base; renewable resources; algal; biomass; fibrous materials.

Стаття надійшла до редакції 28.04.2025 р.
Прийнято до друку 11.06.2025 р.