

УДК 502:51:504.5

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2024.4\(497\).32](https://doi.org/10.15589/znп2024.4(497).32)

GLOBAL ENVIRONMENTAL PROBLEM OF MARINE VESSEL BIOFOULING

ГЛОБАЛЬНА ЕКОЛОГІЧНА ПРОБЛЕМА БІООБРОСТАННЯ
МОРСЬКИХ СУДЕН

Valentyna V. Kirsanova

kirsanova@dinuoma.com.ua

ORCID: 0000-0002-5857-1426

В. В. Кірсанова,

канд. біол. наук, доцент

*Danube Institute of the National University “Odesa Maritime Academy”, Izmail**Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл*

Abstract. The article analyzes the ecological problem of ship biofouling. The purpose of the study is to study the biofouling of ships as a mechanism for the introduction of alien species into the World Ocean. Analysis of ways to combat biofouling of ships today. As well as an analysis of the results of research aimed at improving the fight against biofouling of ships in the future. A large number of natural non-toxic compounds have been extracted and identified that can be used in the fight against bioremediation. Of greatest interest is the group of gram-positive bacteria Actinomycetales, which interact with individuals of marine inhabitants of various species. The main problem in the synthesis of such biocides is their low extraction yield. To determine the factors affecting the rate of formation of biomass of organisms, which include biocides. Research is underway in the field of genetic engineering, which can not only accelerate the synthesis of biomass, but also improve the quality of extracted biocides. It is necessary to organize cooperation between laboratories synthesizing natural biocides in different ecosystems of the World Ocean. This will make it possible to study the effect of specific natural biocides on the fouling organisms of various ecosystems, which will provide protection against shipwrecks during their transition from one ecosystem to another. The value of nanomaterials obtained in order to improve compounds intended to improve antifouling coatings from silicones with low surface energy is indicated. Research is being carried out, in the process of which the technology of ultraviolet radiation in the fight against biofouling is being developed. The technology used combines UV-C light-emitting diodes (LEDs) into a coating scheme that emits just enough light to ensure complete prevention of biofouling build-up on the surface being protected. In-water cleaning and capture systems designed for the removal and collection of macrofouling organisms and associated antifouling coating particles have been developed. Cleaning systems must be improved and adapted for periodic cleaning of ultraviolet lamps designed to disinfect the wetted surface of the housing from biofouling that may occur during their operation. In order to successfully solve the current and complex problem of biofouling, it is necessary to develop a unified method of analysis and evaluation of the proposed methods of protection against biofouling.

Key words: biofouling of marine vessels; invasive species of living organisms; biocides; nanomaterials; natural anti-inflammatory substances; ultraviolet radiation.

Анотація. У статті аналізується екологічна проблема біообростання суден. Мета дослідження є вивчення біообростання суден як механізм інтродукції чужорідних видів у Світовому океані. Аналіз способів боротьби з біообростанням суден сьогодні. А також аналіз результатів досліджень, спрямованих на вдосконалення боротьби з біообростанням суден у майбутньому. Екстраговано та ідентифіковано величезну кількість природних нетоксичних сполук, яких можна використовувати у боротьбі з біообростанням. Найбільший інтерес представляє загін грампозитивних бактерій Actinomycetales, які взаємодіють з особами морських мешканців різних видів. Головна проблема при синтезі таких біоцидів, їхній малий вихід при екстракції. Визначені фактори, що впливають на швидкість утворення біомаси організмів, до складу яких входять біоциди. Ведуться дослідження в галузі генної інженерії, які можуть не лише прискорити синтез біомаси, а й покращити якість екстрагованих біоцидів. Необхідно організувати співпрацю між лабораторіями, що синтезують природні біоциди в різних екосистемах Світового океану. Це дозволить вивчити дію конкретних природних біоцидів на обростаючих організмів різних екосистем, що забезпечить захист від обростання суден при переході їх з однієї в іншу екосистему. Вказується на значення наноматеріалів, отриманих з метою вдосконалення сполук, призначених для поліпшення покриттів, що протиобрастають, із силіконів з низькою поверхневою енергією. Здійснюються дослідження, у процесі яких розробляється технологія ультрафіолетового випромінювання у боротьбі з біообростанням. Використову-

вана технологія поєднує світлодіоди UV-C (LED) у схему покриття, яка випромінює рівно стільки світла, щоб забезпечити повне запобігання накопиченню біологічного обростання на поверхні, що захищається. Розроблені суднові системи очищення та уловлювання у воді, призначені для видалення та збору макрообрастальних організмів та пов'язаних з ними частинок протизворотних покриттів. Системи очищення необхідно вдосконалювати і пристосувати їх для періодичного очищення ультрафіолетових ламп, призначених для знезараження змочуваної поверхні корпусу від біообростання, яке може виникнути в процесі їх експлуатації.

Для успішного вирішення актуальної та складної проблеми біообростання необхідно розробити єдину методику аналізу та оцінки запропонованих методів захисту від біообростання.

Ключові слова: біообростання морських суден; інвазивні види живих організмів; наноматеріали; біоциди; природні протизапальні речовини; ультрафіолетове випромінювання.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У процесі експлуатації суден, на поверхні корпусу прикріплюються різноманітні водні мікро- та макроорганізми [1]. Таке біологічне обростання (біообростання) суден є давньою проблемою для власників та операторів морських суден. Але за останні 50 років інтенсивність використання нами Світового океану зросла у геометричній прогресії. Це стосується не тільки кораблів і яхт, але й аквакультури, великих енергетичних структур океану, рибальства та різних додатків, що використовують одні й ті ж води та одні й ті самі портові простори.

Біологічне обростання корпусів суден збільшує шореткість поверхні корпусу, у результаті збільшується тертя, витрата палива, загальні викиди парникових газів та вартість експлуатації суден [2].

Органічне (біологічне) обростання суден є основним вектором інтродукції чужорідних морських видів у екосистеми Світового океану. Це призводить до порушення стійкості екосистем Світового океану, а також виникають проблеми при вирощуванні аквакультур [3].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Біологічне обростання корпусів морських суден є важливою темою у морській галузі через його екологічні та фінансові наслідки. Сьогодні в активному стані перебувають близько вісімсот тисяч суден. Навіть невелика кількість біообростань можуть стати причиною інвазій чужорідних видів. Проводяться дослідження різних екосистем Світового океану. У Середземному морі виявлено 573 чужорідні види багатоклітинних організмів. Більшість особин чужорідних видів – теплолюбні водорості або безхребетні, що походять з Індо-Тихоокеанського або Індійського океанів, що потрапили до Середземного моря через Суецький канал [4].

У Чорному морі виявлено близько 247 чужорідних видів, з них 217 видів тварин та 25 видів рослин [5]. Проведено дослідження, які підтвердили здатність окремих видів адаптуватися до низьких температур під час їх транспортування з теплих кліматичних зон до холодних регіонів. Небезпека проникнення інвазивних видів присутня навіть для Арктики [6].

На Галапагоських островах Еквадору, де мешкають унікальні ендемічні види диких тварин у світі, в 2023 році пройшов міжнародний семінар, організований GloFouling Partnerships, з управління біообростанням для запобігання поширенню інвазивних водних видів в морських зонах, що охороняються особливо. Проект партнерства ГЕФ-ПРООН-ІМО щодо GloFouling – це глобальна ініціатива, що поєднує ключових партнерів для дослідження глобальної екологічної проблеми, інтродукції інвазивних видів у результаті біообростання. Одним із ключових аспектів заходу стала демонстрація використання підводних дронів для перевірки біообростання, а також стандартизовані методи моніторингу та відбору проб прикріплених до корпусу судна організмів [7; 8].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Проблема перенесення інвазивних водних видів через біообростання суден вперше була офіційно доведена до відома ІМО у 2006 році, і наступного року МЕРС зобов'язався розробити відповідні рекомендації. У 2011 році була підготовлена та прийнята Резолюція МЕРС.207(62) щодо контролю біообростання суден та управління ним для мінімізації перенесення інвазивних водних видів. Цілі цього Посібника полягають у наданні практичних рекомендацій щодо мінімізації ризику перенесення інвазивних водних видів внаслідок біообростання суден. Відповідно до вимог Резолюції МЕРС.207(62) заходи з управління біообростанням, що вживаються на судні, викладені в плані управління біообростанням, та записи про практику управління біообростанням реєструються в журнал перевірок біообростання. План управління біообростанням має бути конкретним для кожного судна та включатись до судової робочої документації. На етапі будівництва судна використовуються системи запобігання обростанню судна. Для запобігання скупченню обростаючих організмів у внутрішніх системах охолодження забортною водою та кінгстонних коробках, може включати використання анодів, струменевих систем та електролізу. До систем протиобростання також відносяться покриття, що складаються із стійких до біообростання матеріалів.

Вибір протиобростання системи складає етапі будівництва судна. У процесі експлуатації суден

можлива перевстановлення або ремонт системи, що протиоберігає. Правила цих ремонтних робіт також передбачені рекомендаціями МЕРС.207(62).Заходи даної резолюції значно зменшили кількість обростань при експлуатації морського транспорту. Проте повністю звільнити судна від обростань не вдалося.

Навіть невелика кількість біообростань можуть стати причиною інвазій чужорідних видів. Інвазивні водні види визнані однією з основних загроз екосистем Світового океану. Зокрема, Конвенцією про біологічну різноманітність, декількома ЮНЕП Конвенцій з регіональних морів, форумом Азіатсько-Тихоокеанського економічного співробітництва та Секретаріатом Екологічної програми Тихоокеанського регіону.

Мета дослідження – вивчення біообростання суден як механізм інтродукції чужорідних видів у Світовому океані. Аналіз способів боротьби з біообростанням суден сьогодні. А також аналіз результатів досліджень, спрямованих на вдосконалення боротьби з обростанням суден.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Огляд опублікованих результатів досліджень, присвячених боротьбі з біообробленням суден. Аналіз та визначення переваги та недоліків запропонованих методів боротьби з біооблаштуванням та визначення можливих перспективних способів боротьби з біообробленням суден.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

На занурених у воду поверхонь корпусів кораблів наносяться протиобертальні фарби, що містять біоцидні речовини, щоб запобігти прилипанню морських мешканців [9]. Були запропоновані різні протиобертальні протиобростаючі фарби. Серед них самополіруючі системи, абляційні фарби та розчинні матричні фарби, зазвичай відомі як звичайні фарби, до складу яких входить купрум. Ці фарби є джерелом потрапляння купруму до морського середовища. Згідно з результатами досліджень загальне річне надходження купруму до лагуни Індіан-Рівер склало від 1,7 тонн на рік (вітрили) до 2,1 тонн на рік (моторні човни) з човнів у 14 маринах. Надходження міді до порту Канаверал становило близько 1,4 тонн на рік із семи круїзних суден. Ці фарби є джерелом надлишкового потрапляння купруму в морське середовище [10].

На заміну фарбам до складу яких входить купрум, були запропоновані фарби Трибутилолово (ТБТ), отримані з сополімеру, що самополірується (СПС). Необростаючі фарби на основі оловоорганічних сполук високоефективні проти більшості організмів, що викликають обростання, і їх застосування призводить до значної економії засобів у судноплавній галузі. Однак трибутилолово є біокумулятивною токсичною та мутагенною речовиною, яка накопичується у всіх живих організмах морського середовища. Сополімерні

фарби трибутилолова, що самополіруються, негативно впливають на навколишнє середовище [11].

У 2001 році було прийнято Конвенцію про контроль за використанням шкідливих протиобростаючих систем на суднах (Конвенція AFS), яка забороняє використання шкідливих оловоорганічних сполук у протиобростаючих фарбах, що використовуються на суднах. Незважаючи на низку обмежень на використання ТБТ для маломірних суден по всьому світу, продовжувалося застосування ТБТ на судах, що призвело до повсюдної присутності ТБТ у відкладеннях, флорі та фауні Світового океану та залишається проблемою для морських екосистем. У результаті в 2008 році використання протиобертальних фарб ТБТ було глобально заборонено Міжнародною морською організацією.

Нині використовують інші біоциди проти обростання; до них відносяться іргарол 1051 (триазиний гербіцид), пірітійон цинку (фунгіцид) та Sea-Nine 211 (ізотіазолон). В основному вони використовуються разом з міддю як кобіоциди, особливо для підвищення ефективності проти водоростей [11]. Однак повідомляється про токсичність цих протизворотних покриттів [12]. Необхідні екологічно безпечні протизворотні агенти.

Запропоновано протиобростаючі покриття із силіконів із низькою поверхневою енергією. Найбільш часто використовуваними органосилоксановими продуктами є полідиметилсилоксанові (ПДМС) еластomers, які мають низьку поверхневу енергію і низький модуль пружності і мають низьку шорсткість поверхні і, як правило, мають кращу здатність віділяти забруднення в порівнянні з жорсткими фторполімерами. Грунтуючись на цих чудових властивостях, ПДМС останніми роками став найбільш затребуваним матеріалом технології видалення забруднень. Однак немодифікований ПДМС характеризується низькою механічною міцністю та недостатньою адгезійною здатністю, які обмежують його застосування в області морського протиобростання [13; 14; 15].

Продовжуються дослідження еластомірних протизворотних покриттів ПДМС з модифікації чистих ПДМС шляхом виготовлення кополімерів на основі ПДМС, композитів та включення добавок спрямованих на поліпшення механічної міцності та міцності зчеплення з підкладки. Розроблено серію потрібних нанокмполімерів із еластомірного силікону/гібридного листового покриття GO-Al₂O₃ NR. NR γ -Al₂O₃ довжиною 150 нм і діаметром 20 нм. Які були закріплені між нанолістами та конформно покриті шарами силікону. Виготовлена модель була піддана випробуванням у природній морській воді протягом 3 місяців. Добре дисперговані листові гібриди GO- γ -Al₂O₃ NR до 1 мас.% збільшували кут змочування (151°), зменшували ЕДУ (13,25) і забезпечували мікронашорсткість. Таким чином,

було схвалено багатообіцяюче вогнестійке наноконкомпозитне покриття, що має супергідрофобність, високу термостабільність і економічність для застосування в морських покриттях.

Цікавим є супергідрофобне покриття Ni 3 S 2, яке було нанесене на нержавіючу сталь 304. Завдяки поєднанню наностержнів Ni 3 S 2 і низької поверхневої енергії на цьому покритті сформувався стабільний стан, що гарантує відсутність закріплення краплі води. Крім того, супергідрофобне покриття продемонструвало чудову стабільність. Випробування протиобростаючого покриття показало, що не забруднюється сталеві поверхні завдяки ефективному бар'єру, утвореному супергідрофобним покриттям. Очікується, що розроблений матеріал буде застосовуватись для захисту морських суден від біообростання. Так як дане вогнестійке наноконкомпозитне покриття є супергідрофобною, термостабільною та економічною для застосування в морських покриттях [16; 17; 18; 19; 20].

У природі сульфатвідновлюючі бактерії (SRB) є найбільш шкідливими бактеріями, що викликає корозію. Для захисту від корозії SRB використовувалося розроблене аморфне покриття Fe Fe. візуалізація живих/мертвих клітин підтвердила хорошу антибактеріальну ефективність аморфного покриття на основі заліза. При використанні аморфного покриття на основі заліза спостерігалось утруднене перенесення електронів та антибактеріальний ефект покриття до SRB-корозії, стійкість до білка на 83,9%, стійкість до водоростей на 99%, високу стійкість до бактерій та прилипання мідій. Високі протиобростаючі властивості спостерігалися при практичних морських випробуваннях. протиобростаючі і властивості аморфного покриття на основі заліза обумовлені його подвійною здатністю знищувати та чинити опір прикріпленню організмів на різних рівнях довжини. У цьому дослідженні представлений інноваційний підхід до розробки морських покриттів з протикорозійними та антикорозійними властивостями [21].

Численні дослідження присвячені пошуку оптимальних покриттів, які є біоцидними для істот, що обростають, але безпечні і нетоксичні для водних організмів. Знайдено протиобростаючі сполуки, яких екстрагували з особин різних морських організмів [23]. Природні біоциди вибірково щодо видів обростання та характеризуються меншою токсичністю. Ефективний захист від обростання без тривалого негативного впливу на навколишнє середовище є важливою характеристикою природного протиобростаючого з'єднання, які відносяться до різних хімічних класів. Серед них терпеноїди, стероїди, жирні кислоти, алкалоїди, бензеноїди, білки чи інгібітори кворуму. Кожна з перерахованих сполук, характеризується специфікою на біообростання [23; 24].

З червоної водорості *Laurencia rigida*, витягнути Терпеноїди (терпени), які перешкоджають утворенню

поселень личинок *Amphibalanus amphitrite* (також відомого як *Balanus Amphitrite*) та *Bugula neretina* [24; 25]. У екстракту бурі водорості *B. bifurcate* виявили антибактеріальний вплив на біоплівкоутворюючі бактерії *Cobetia marina* і *Pseudoalteromonas haloplanktis*. окій рівень активності був зареєстрований у зразках, зібраних у період із квітня по вересень [26]. Доластан, секо-доластан та екстракт ізолінеаролу бурих водоростей *Canistrocarpus cervicornis* перешкоджають прикріпленню мідій *Perna perna* [27].

Морські мікроорганізми є важливими промисловими джерелами вторинних метаболітів, які включають широкий спектр протимікробних, антибактеріальних та протиобростаючих агентів. Вивчено загін грамполозитивних бактерій *Actinomycetales*, які мають спектр відмітних особливостей, таких як місце існування, ідеальний pH, теплолюбність і вологостійкість. Вони взаємодіють з особинами морських мешканців різних видів [28; 29]. Ці особливості бактерій *Actinomycetales* можуть впливати на еволюцію вторинних метаболічних шляхів. Більшість штамів були ідентифіковані з відкладень, проте морські актиноміцети можуть співіснувати з іншими видами і жити як у планктонічному, так і в біоплівковому середовищі [30]. Актиноміцети виділяють різні безпечні противоротні сполуки. Ці метаболіти відносяться до різних хімічних класів, включаючи пептиди, полікетиди, ізопреноїди, стерини та феназини. Відомо, що *Streptomyces* sp. продукує терпеноїди та стероїди, жирні кислоти та інгібітори кворуму, що протиобростають сполуки [29].

Streptomyces sp. KIB-1714 є потенційними антимакрообростаючими агентами, оскільки містять характерний компонент хіназолін-4-он. Вони також відомі своєю летальністю на нормальних клітинних лініях (клітинах Vero) із показником IC50 3,30 мкг/мл [31]. З *Streptomyces* sp. CHQ-64, екстрагований Гераніліпірол А. Ця сполука смертельно небезпечна для різних клітинних ліній [32].

Екстраговано та ідентифіковано величезну кількість природних нешкідливих сполук, яких можна використовувати у боротьбі з біообробленням. Перешкодою для перетворення морських природних сполук на комерційні товари з боротьби з біообростанням є відсутність технології їх виробництва. Дослідження з хімічного синтезу повинні бути розширені, щоб удосконалити виробництво природних засобів протиобростання у великих масштабах. Наприклад, отримані в лабораторії гібридні молекули монотерпена і фурану гераніолу пригнічували личинки корокових черепашок *Balanus Amphitrite* ефективніше ніж природний батьківський [33]. Дивергентний метод пізньої стадії використовується для синтезу гібридних сполук гераніолу та бутеноліду. Отримані гібриди мають активність проти макрообростання щодо личинок циприду *Balanus Amphitrite*. Цей результат має значення для

розробки методики успішної гібридизації структурних мотивів гераніолу та бутеноліду, які характеризуються високою активністю проти макрообростання [34].

Біологічно протестовано дев'ять гібридних сполук проти обростання шляхом об'єднання каркасу з дигідростильбену з оксимною групою. Отримані гібриди характеризуються алігидною активністю, яка перешкоджає біообростання мікрободоростей [35]. Аналогічним чином отримано двадцять два синтетичних гібриди дигідростильбенів з різними схемами заміщення, а їх протиобрастаючі властивості були вивчені щодо 16 видів, що беруть участь у біообладнанні в морському середовищі. Синтетичні гібриди, що використовують каркас з дигідростильбену, продемонстрували ефективність проти мікро-і макрообростання [36].

Streptomyces sp. KIB-1714 є потенційними антимакрообертальними агентами, оскільки містять характерний компонент хіназолін-4-он. Вони також відомі своєю летальністю на нормальних клітинних лініях (клітинах Vero) із показником IC₅₀ 3,30 мкг/мл [31] *Streptomyces* sp. CHQ-64, екстрагований Гераніліпірол А. Ця сполука смертельно небезпечна для різних клітинних ліній [32].

Біологічно протестовано дев'ять гібридних сполук проти накопичення біологічного обростання на поверхні, що захищається. Успішні початкові випробування вже відбулися. Для подальших досліджень до участі в проєкті запрошена компанія Damen Shipyards, яка додасть досвід у таких галузях, як інтеграція суден, що доповнює ноу-хау AkzoNobel у галузі захисту поверхні та адгезії, а також планується співпраця з компанією Philips, з метою використання їх можливості сфери застосування світлодіодів UV-C та електроніки. Технологія UV-C Philips знайшла застосування в цьому інноваційному рішенні проти обростання, яке принесе користь судноплавній галузі і в той же час позитивно вплине на навколишнє середовище.

Технологія, що розробляється, має можливість змінити традиційне уявлення галузі про протизворотні системи. У 2014 році Philips вперше почала експериментувати з технологією світлодіодів UV-C, відомою завдяки її використанню в системах очищення та стерилізації води, але дана технологія ніколи не використовувалася у відкритому морському середовищі. З моменту об'єднання зусиль з AkzoNobel було досягнуто багатообіцяючого прогресу, аж до проведення випробувань на комерційних торгових судах. Ключовим наступним кроком консорціуму є вдосконалення технології та інтеграція суден для створення комерційно життєздатного рішення в найближчому майбутньому, яке може повністю зробити революцію в галузі контролю біообростання [41].

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Бородаба з біообростанням суден є багатограним завданням, оскільки збільшує опір судна, витрата

палива та викиди вихлопних газів. Біообростання суден також є провідним вектором глобального переміщення та інтродукції морських інвазивних видів. В умовах глобального потепління спостерігається підвищення температури води у Світовому океані. В результаті окремі інвазивні види характерні для екосистем з високою температурою води легко пристосовуються та виживають у регіонах Світового океану з помірнішим кліматом. Проблема впровадження інвазивних видів у Світовому океані загострюється та потребують швидкого вирішення. Для протидії проблемі використовуються плани керування біообростанням з використанням протоколів очищення та захисних покриттів, які запобігають прикріпленню та росту морських організмів на поверхнях. Захисні покриття використовуються з давніх-давен. Спочатку використовувалися мідні пластини.

У середині минулого століття було запропоновано органічні сполуки свинцю, які виявилися ефективними. Однак свинець є токсичним, мутагенним та біокумулятивним. Він накопичується в живих організмах і мігрує у ланцюгах живлення екосистем Світового океану. Сьогодні заборонено використовувати протиобертальні фарби органічні сполуки свинцю, що містять. Запропоновано альтернативні В даний час запропоновано інші біоциди проти обростання; до них відносяться іргарол 1051 (триазиновий гербіцид), пірітійон цинку (фунгіцид) та Sea-Nine 211 (ізотіазолон). В основному вони використовуються разом з міддю як кобіоциди, особливо для підвищення ефективності проти водоростей [11]. Однак повідомляється про токсичність цих протизворотних покриттів [12]. Необхідні екологічно безпечні протизворотні сполуки.

Запропоновано протиутворюючі покриття із силіконів із низькою поверхневою енергією. Найбільш часто використовуваними органосилоксановими продуктами є полідиметилсилоксанові (ПДМС), який останніми роками став більш затребуваним матеріалом для технології видалення забруднень. Однак немодифікований ПДМС характеризується низькою механічною міцністю та недостатньою адгезійною здатністю, які обмежують його застосування в області морського протиобростання [13; 14; 15]. Ведуться дослідження, присвячені отриманню нових наноматеріалів на основі ПДМС, здатні усунути недоліки даного полімеру. Отримано наноматеріали з наночастинками оксидів різних металів, у тому числі з використанням оксидів графену. Продовжуються їх випробування при їх використанні у морському середовищі.

Однак найбільша надія покладається на синтез природних біоцидів, яких планується екстрагувати з природних матеріалів. Такі біоциди не є токсичними і це має дуже важливе значення для боротьби з біоплівками різного походження та різної локації.

Головна проблема при синтезі таких біоцидів, їхній малий вихід при екстракції. Визначено фактори, що впливають на швидкість утворення біомаси організмів, склад яких входять біоциди. Ведуться дослідження в галузі генної інженерії, які можуть не тільки прискорити синтез біомаси, але і поліпшити якість екстрагованих біоцидів. Однак різноманітність морських видів, здатних прикріплюватися, ускладнює процес синтезу універсального природного біоциду. Ведуться дослідження для ідентифікації, екстракції та розробки технології виробництва біоцидів у боротьбі з біоплівками мікроорганізмів та для боротьби з макроорганізмами. Різноманітність особин різних видів Світового океану ускладнює процес досліджень. Доцільно організувати співпрацю між дослідницькими лабораторіями, щоб подолати географічні обмеження. Для успішних результатів досліджень також необхідно розробити методику оцінки нових біоцидів з конкретними критеріями оцінки у лабораторних умовах та в умовах довкілля.

Ведуться дослідження, у процесі яких розробляється технологія ультрафіолетового випромінювання у боротьбі з біобростанням. Використовувана технологія поєднує світлодіоди UV-C (LED) у схемі покриття, яка випромінює рівно стільки світла, щоб забезпечити повне запобігання накопиченню біологічного обростання на поверхні, що захищається. Успішні початкові випробування вже відбулися. Надалі планується вдосконалення технології та інтеграція суден для створення комерційно життєздатного рішення в найближчому майбутньому, яке може повністю зробити революцію в галузі контролю біобростання. Однак ультрафіолетові лампи вже використовуються для знезараження ізолювального баласту на судні і при цьому спостерігаються проблеми, пов'язані зі зниженням інтенсивності ультрафіолетового освітлення при зниженні прозорості води. Забортна вода не завжди прозора. При установці аналогічних ламп зовні корпусу судна можливе виникнення додаткових перешкод, пов'язаних зі зниженням інтенсивності освітлення не тільки при зниженні забортної прозорості. Розроблено суднові системи очищення та уловлювання у воді (ССОУВ), призначені для видалення та збору макрообертальних організмів та пов'язаних з ними складів протиутворюючих покриттів. Очищення суден від біобростання у воді у поєднанні з уловлюванням сміття та пов'язаних з ним біоцидів спрямоване на задоволення значних потреб ринку (підвищення експлуатаційних характеристик та зниження витрат палива), а також

на безпосереднє вирішення найважливіших глобальних екологічних проблем, пов'язаних із зменшенням забруднення повітря та води та ризиків. Інтродукція морських немісцевих видів Дана технологія є перспективною в першу чергу для малогабаритних суден. Однак процес очищення утруднений при екстремальних умовах і вимагає додаткових витрат. В останні роки розроблено робототехніку, яка може спростити, але не здешевити процес очищення.

ВИСНОВКИ

У цьому огляді аналізуються негативні наслідки біобростання та реалізовані стратегії захисту суден від біобростання. Вказується на недоліки та токсичність діючих систем п протиутворюючих.

Аналізуються результати досліджень, спрямованих на отримання природних нетоксичних біоцидів. Зазначено, що ідентифіковані та екстраговані природні біоциди. Продовжуються дослідження, спрямовані на вдосконалення технології їх синтезу з метою розробки технології виробництва природних біоцидів у лабораторних умовах.

Вказується на значення наноматеріалів, отриманих з метою вдосконалення сполук, призначених для поліпшення покриттів, що протиоброstaють, із силіконів з низькою поверхневою енергією.

Ведуться дослідження, у процесі яких розробляється технологія ультрафіолетового випромінювання у боротьбі з біобростанням. Використовувана технологія поєднує світлодіоди UV-C (LED) у схемі покриття, яка випромінює рівно стільки світла, щоб забезпечити повне запобігання накопиченню біологічного обростання на поверхні, що захищається.

Розроблено суднові системи очищення та уловлювання у воді (ССОУВ), призначені для видалення та збору макрообертальних організмів та пов'язаних з ними складів протиутворюючих покриттів.

Для успішного вирішення актуальної та складної проблеми біобростання необхідно розробити єдину методику аналізу та оцінки запропонованих методів захисту від біобростання.

Також необхідно організувати співпрацю між лабораторіями, що синтезують природні біоциди в різних екосистемах Світового океану. Це дозволить вивчити дію конкретних природних біоцидів на обростаючих організмів різних екосистем, що забезпечить захист від обростання суден при переході їх з однієї в іншу екосистему.

Системи очищення необхідно вдосконалювати і пристосувати їх для періодичного очищення ультрафіолетових ламп, призначених для знезараження змочуваної поверхні корпусу від біобростання.

REFERENCES

- [1] Flemming, H.C. (2002). Biofouling in water systems – cases, causes and countermeasures. *Appl Microbiol Biotechnol* no.59, pp629–640 <https://doi.org/10.1007/s00253-002-1066-9>
- [2] Flemming, H. C. (2020). Biofouling and me: My Stockholm syndrome with biofilms. *Water Res.* Apr no.15;(173): no. 115576. doi: 10.1016/j.watres.2020.115576. Epub 2020 Feb 2. PMID: 32044598.

- [3] Davidson, I. C., Scianni, C., Minton, M. S., & Ruiz, G. M. (2018). A history of ship specialization and consequences for marine invasions, management and policy. *Journal of Applied Ecology*, no.55(4), pp. 1799-1811
- [4] Flemming HC. *Water Sci* (2003). Role and levels of real-time monitoring for successful anti-fouling strategies--an overview. *Technol.* no.47(5): pp. 1-8. PMID: 12701899
- [5] Flemming, HC. (2020). Biofouling and me: My Stockholm syndrome with biofilms. *Water Res.* 2020 Apr 15; № 173:115576. doi: 10.1016/j.watres. 115576. Epub 2020 Feb 2. PMID: 32044598.
- [6] Davidson, I. C., Scianni, C., Minton, M. S., & Ruiz, G. M. (2018). A history of ship specialization and consequences for marine invasions, management and policy. *Journal of Applied Ecology*, no 55(4), pp. 1799–1811.
- [7] GloFouling Partnerships Project Retrieved from: <https://www.imo.org/en/OurWork/PartnershipsProjects/Pages/GloFouling-Project.aspx>
- [8] Galapagos Islands host international workshop on biofouling management in marine protected. Retrieved from: [areashttps://www.glofouling.imo.org/post/galapagos-islands-host-international-workshop-on-biofouling-management-in-marine-protected-areas](https://www.glofouling.imo.org/post/galapagos-islands-host-international-workshop-on-biofouling-management-in-marine-protected-areas)
- [9] Srinivasan, M., & Swain, G.W. (2007). Managing the Use of Copper-Based Antifouling Paints. *Environmental Management* no 39 , pp. 423–441. <https://doi.org/10.1007/s00267-005-0030-8>
- [10] Yebra, D. M., Kiil, S., & Dam-Johansen, K. (2004). Antifouling technology—past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings. *Progress in organic coatings*, no 50(2), pp.75-104. doi:10.1016/j.porgcoat.2003.06.001
- [11] Brady, R. F. (2005). Fouling-release coatings for warships. *Defence Science Journal*, no 55(1), pp.75. doi: <https://doi.org/10.14429/dsj.55.1971> .
- [12] Sankar, G. G., Sathya, S., Murthy, P. S., Das, A., Pandiyan, R., Venugopalan, V. P., & Doble, M. (2015). Polydimethyl siloxane nanocomposites: their antifouling efficacy in vitro and in marine conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation*, no 104, pp. 307-314.
- [13] Lejars, M., Margaillan, A., & Bressy, C. (2012). Fouling release coatings: a nontoxic alternative to biocidal antifouling coatings. *Chemical reviews*, 112(8), pp.4347-4390.
- [14] Liu, C., Xie, Q., Ma, C., & Zhang, G. (2016). Fouling release property of polydimethylsiloxane-based polyurea with improved adhesion to substrate. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(23), pp. 6671-6676.
- [15] Brady, R. F., & Aronson, C. L. (2003). Elastomeric fluorinated polyurethane coatings for nontoxic fouling control.
- [16] Petronis, Š., Berntsson, K., Gold, J., & Gatenholm, P. (2000). Design and microstructuring of PDMS surfaces for improved marine biofouling resistance. *Journal of biomaterials science, polymer edition*, no 11(10), pp.1051-1072.
- [17] Zhang, Z. P., Song, X. F., Cui, L. Y., & Qi, Y. H. (2018). Synthesis of polydimethylsiloxane-modified polyurethane and the structure and properties of its antifouling coatings. *Coatings*, no 8(5), pp. 157.
- [18] Galhenage, T.P., Webster, D.C., Moreira, A.M.S., Burgett, R.J., Stafslie, S.J., Vanderwal, L., Finlay, J.A. (2017). Poly(ethylene) glycol-modified, amphiphilic, siloxane–polyurethane coatings and their performance as fouling-release surfaces. *J. Coat. Technol. Res* no 14, pp. 307–322.
- [19] Qiu, H., Hölken, I., Gapeeva, A., Filiz, V., Adelung, R., & Baum, M. (2018). Development and characterization of mechanically durable silicone-polythiourethane composites modified with tetrapodal shaped ZnO particles for the potential application as fouling-release coating in the marine sector. *Materials*, no 11(12), pp. 2413.
- [20] Sánchez-Lozano I, Hernández-Guerrero CJ, Muñoz-Ochoa M, Hellio C. (2019). Biomimetic Approaches for the Development of New Antifouling Solutions: Study of Incorporation of Macroalgae and Sponge Extracts for the Development of New Environmentally-Friendly Coatings. *Int J Mol Sci.* Sep 30; no 20(19). 4863. doi: 10.3390/ijms20194863. PMID: 31574976; PMCID: PMC6801554.
- [21] Zhang L.M. , Yan M.C. e alt Significantly enhanced resistance to SRB corrosion via Fe-based amorphous coating designed with high dose corrosion-resistant and antibacterial elements *Corrosion Science* V 164, 2020 <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108305>
- [22] Fusetani, N. (2011). Antifouling marine natural products. *Natural Product Reports*, no28(2), pp. 400-410. <https://doi.org/10.1039/C0NP00034E>
- [23] Jonathan C., Morris Andrew J., Phillips (2011). Marine natural products: Synthetic aspects *Natural Product Reports*, no 28(2), pp 269-289
- [24] Almeida, J. R., & Vasconcelos, V. (2015). Natural antifouling compounds: Effectiveness in preventing invertebrate settlement and adhesion. *Biotechnology advances*, no 33(3-4), pp. 343-357. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.01.013>
- [25] De Nys, R., Loya, T., Maximilien, R., Afsar, A., Nair, P. S. R., & Steinberg, P. D. (1996). The need for standardised broad scale bioassay testing: a case study using the red alga *Laurencia rigida*. *Biofouling*, no10(1-3), pp. 213-224. <https://doi.org/10.1080/08927019609386281>
- [26] Maréchal, J. P., Culioli, G., Hellio, C., Thomas-Guyon, H., Callow, M. E., Clare, A. S., & Ortalo-Magné, A. (2004). Seasonal variation in antifouling activity of crude extracts of the brown alga *Bifurcaria bifurcata* (Cystoseiraceae) against cyprids of *Balanus amphitrite* and the marine bacteria *Cobetia marina* and *Pseudoalteromonas haloplanktis*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, no 313(1), pp. 47-62. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2004.07.016>
- [27] Bianco, É. M., Rogers, R., Teixeira, V. L., & Pereira, R. C. (2009). Antifoulant diterpenes produced by the brown seaweed *Canistrocarpus cervicornis*. *Journal of applied phycology*, 21 no, pp.341-346. <https://doi.org/10.1007/s10811-008-9374-9>

- [28] Wu, Z., Xie, L., Xia, G., Zhang, J., Nie, Y., Hu, J., ... & Zhang, R. (2005). A new tetrodotoxin-producing actinomycete, *Nocardopsis dassonvillei*, isolated from the ovaries of puffer fish *Fugu rubripes*. *Toxicon*, no 45(7), pp. 851-859. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2005.02.005>
- [29] ELnahas, M., Elkhateeb, W., & Daba, G. (2021). Marine actinomycetes the past, the present and the future. *Pharm. Res*, no 5(2), 000241. doi. 10.23880/oajpr-1600024
- [30] Qian, P. Y., Li, Z., Xu, Y., Li, Y., & Fusetani, N. (2015). Mini-review: Marine natural products and their synthetic analogs as antifouling compounds: 2009–2014. *Biofouling*, no 31(1), pp. 101-122.
- [31] Kornsakulkarn, J., Saepua, S., Srijomthong, K., Rachtaewee, P., & Thongpanchang, C. (2015). Quinazolinone alkaloids from actinomycete *Streptomyces* sp. BCC 21795. *Phytochemistry letters*, no 12, pp. 6-8.
- [32] Han, X., Liu, Z., Zhang, Z., Zhang, X., Zhu, T., Gu, Q., ... & Li, D. (2017). Geranylpyrrol A and piericidin F from *Streptomyces* sp. CHQ-64 Δ rdmF. *Journal of Natural Products*, no 80(5), pp. 1684-1687.
- [33] Takamura, H., Kinoshita, Y., Yorisue, T., & Kadota, I. (2023). Chemical synthesis and antifouling activity of monoterpene–furan hybrid molecules. *Organic & Biomolecular Chemistry*, no 21(3), pp. 632-638. <https://doi.org/10.1039/D2OB02203F>
- [34] Takamura, H., Ohashi, T., Kikuchi, T., Endo, N., Fukuda, Y., & Kadota, I. (2017). Late-stage divergent synthesis and antifouling activity of geraniol–butenolide hybrid molecules. *Organic & Biomolecular Chemistry*, no 15(26), pp. 5549-5555. <https://doi.org/10.1039/C7OB01160A>.
- [35] Moodie, L. W., Cervin, G., Trepos, R., Labriere, C., Hellio, C., Pavia, H., & Svenson, J. (2018). Design and biological evaluation of antifouling dihydrostilbene oxime hybrids. *Marine Biotechnology*, no 20, pp. 257-267. <https://doi.org/10.1007/s10126-018-9802-z>.
- [36] Moodie, L. W., Trepos, R., Cervin, G., Brathen, K. A., Lindgard, B., Reiersen, R., ... & Svenson, J. (2017). Prevention of marine biofouling using the natural allelopathic compound batatasin-III and synthetic analogues. *Journal of natural products*, no 80(7), pp. 2001-2011. <https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.7b00129>.
- [37] Qian, P. Y., Xu, Y., & Fusetani, N. (2009). Natural products as antifouling compounds: recent progress and future perspectives. *Biofouling*, no 26(2), pp. 223-234. <https://doi.org/10.1080/08927010903470815>.
- [38] Zhou, C., Zou, H., Sun, C., & Li, Y. (2021). Recent advances in biosensors for antibiotic detection: Selectivity and signal amplification with nanomaterials. *Food chemistry*, no 361, 130109. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130109>.
- [39] The pros and cons of ultrasonic antifouling systems Apr 12, 2023. Antifouling Tips. Retrieved from: <https://www.electronic-fouling-control.com/the-pros-and-cons-of-ultrasonic-antifouling-systems>.
- [40] Tamburri MN, Davidson IC, First MR, Scianni C, Newcomer K, Inglis GJ, Georgiades ET, Barnes JM and Ruiz GM (2020) In-Water Cleaning and Capture to Remove Ship Biofouling: An Initial Evaluation of Efficacy and Environmental Safety. *Front. Mar. Sci.* no.7:437. doi: 10.3389/fmars.2020.00437
- [41] AkzoNobel and Philips welcome Damen Shipyards to pioneering antifouling partnership 19 May 2023. Retrieved from: <https://www.polymerspainscolourjournal.com/akzonobel-and-philips-welcome-damen-shipyards-to-pioneering-antifouling-partnership>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Flemming, HC. (2002). Biofouling in water systems – cases, causes and countermeasures. *Appl Microbiol Biotechnol* no.59, pp. 629–640 <https://doi.org/10.1007/s00253-002-1066-9>
- [2] Flemming HC. (2020). Biofouling and me: My Stockholm syndrome with biofilms. *Water Res.* Apr no. 15;(173): no. 115576. doi: 10.1016/j.watres.2020.115576. Epub 2020 Feb 2. PMID: 32044598.
- [3] Davidson, I. C., Scianni, C., Minton, M. S., & Ruiz, G. M. (2018). A history of ship specialization and consequences for marine invasions, management and policy. *Journal of Applied Ecology*, no. 55(4), pp. 1799-1811
- [4] Flemming HC. *Water Sci*(2003) Role and levels of real-time monitoring for successful anti-fouling strategies--an overview. *Technol.* no.47(5): pp.1-8. PMID: 12701899
- [5] Flemming HC. Biofouling and me: My Stockholm syndrome with biofilms. *Water Res.* 2020 Apr 15; № 173:115576. doi: 10.1016/j.watres.2020.115576. Epub 2020 Feb 2. PMID: 32044598.
- [6] Davidson, I. C., Scianni, C., Minton, M. S., & Ruiz, G. M. (2018). A history of ship specialization and consequences for marine invasions, management and policy. *Journal of Applied Ecology*, no 55(4), pp. 1799-1811
- [7] GloFouling Partnerships Project <https://www.imo.org/en/OurWork/PartnershipsProjects/Pages/GloFouling-Project.aspx>
- [8] Galapagos Islands host international workshop on biofouling management in marine protected. URL: <https://www.glofouling.imo.org/post/galapagos-islands-host-international-workshop-on-biofouling-management-in-marine-protected-areas>
- [9] Srinivasan, M., Swain, G.W. (2007). Managing the Use of Copper-Based Antifouling Paints. *Environmental Management* no 39, pp. 423–441 (2007). <https://doi.org/10.1007/s00267-005-0030-8>
- [10] Yebra, D. M., Kiil, S., & Dam-Johansen, K. (2004). Antifouling technology—past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings. *Progress in organic coatings*, no 50(2), pp.75-104. doi: 10.1016/j.porgcoat.2003.06.001
- [11] Brady, R. F. (2005). Fouling-release coatings for warships. *Defence Science Journal*, no 55(1), pp. 75. doi: <https://doi.org/10.14429/dsj.55.1971>.

- [12] Sankar, G. G., Sathya, S., Murthy, P. S., Das, A., Pandiyan, R., Venugopalan, V. P., & Doble, M. (2015). Polydimethyl siloxane nanocomposites: their antifouling efficacy in vitro and in marine conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation*, no 104, pp.307-314.
- [13] Lejars, M., Margaillan, A., & Bressy, C. (2012). Fouling release coatings: a nontoxic alternative to biocidal antifouling coatings. *Chemical reviews*, no 112(8), pp. 4347-4390.
- [14] Liu, C., Xie, Q., Ma, C., & Zhang, G. (2016). Fouling release property of polydimethylsiloxane-based polyurea with improved adhesion to substrate. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, no 55(23), pp. 6671-6676.
- [15] Brady, R. F., & Aronson, C. L. (2003). Elastomeric fluorinated polyurethane coatings for nontoxic fouling control.
- [16] Petronis, Š., Berntsson, K., Gold, J., & Gatenholm, P. (2000). Design and microstructuring of PDMS surfaces for improved marine biofouling resistance. *Journal of biomaterials science, polymer edition*, no 11(10), pp. 1051-1072.
- [17] Zhang, Z. P., Song, X. F., Cui, L. Y., & Qi, Y. H. (2018). Synthesis of polydimethylsiloxane-modified polyurethane and the structure and properties of its antifouling coatings. *Coatings*, no 8(5), pp. 157.
- [18] Galhenage, T.P.; Webster, D.C.; Moreira, A.M.S.; Burgett, R.J.; Stafslie, S.J.; Vanderwal, L.; Finlay, J.A.; (2017) Poly(ethylene) glycol-modified, amphiphilic, siloxane-polyurethane coatings and their performance as fouling-release surfaces. *J. Coat. Technol. Res* no 14, pp.307-322.
- [19] Qiu, H., Hölken, I., Gapeeva, A., Filiz, V., Adelung, R., & Baum, M. (2018). Development and characterization of mechanically durable silicone-polythiourethane composites modified with tetrapodal shaped ZnO particles for the potential application as fouling-release coating in the marine sector. *Materials*, no 11(12), pp. 2413.
- [20] Sánchez-Lozano I, Hernández-Guerrero CJ, Muñoz-Ochoa M, Hellio C. Biomimetic Approaches for the Development of New Antifouling Solutions: Study of Incorporation of Macroalgae and Sponge Extracts for the Development of New Environmentally-Friendly Coatings. *Int J Mol Sci*. 2019 Sep 30; no 20(19):4863. doi: 10.3390/ijms20194863. PMID: 31574976; PMCID: PMC6801554.
- [21] L.M. Zhang , M.C. Yan e alt Significantly enhanced resistance to SRB corrosion via Fe-based amorphous coating designed with high dose corrosion-resistant and antibacterial elements *Corrosion Science* 164, 2020 <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108305>
- [22] Fusetani, N. (2011). Antifouling marine natural products. *Natural Product Reports*, no 28(2), pp. 400-410. <https://doi.org/10.1039/C0NP00034E>
- [23] Jonathan C. Morris Andrew J. Phillips (2011). Marine natural products: Synthetic aspects *Natural Product Reports*, no 28(2), pp. 269-289.
- [24] Almeida, J. R., & Vasconcelos, V. (2015). Natural antifouling compounds: Effectiveness in preventing invertebrate settlement and adhesion. *Biotechnology advances*, no 33(3-4), pp. 343-357. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.01.013>
- [25] De Nys, R., Leya, T., Maximilien, R., Afsar, A., Nair, P. S. R., & Steinberg, P. D. (1996). The need for standardised broad scale bioassay testing: a case study using the red alga *Laurencia rigida*. *Biofouling*, no 10(1-3), pp. 213-224. <https://doi.org/10.1080/08927019609386281>
- [26] Maréchal, J. P., Culioli, G., Hellio, C., Thomas-Guyon, H., Callow, M. E., Clare, A. S., & Ortalo-Magné, A. (2004). Seasonal variation in antifouling activity of crude extracts of the brown alga *Bifurcaria bifurcata* (Cystoseiraceae) against cyprids of *Balanus amphitrite* and the marine bacteria *Cobetia marina* and *Pseudoalteromonas haloplanktis*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, no 313(1), pp. 47-62. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2004.07.016>
- [27] Bianco, É. M., Rogers, R., Teixeira, V. L., & Pereira, R. C. (2009). Antifoulant diterpenes produced by the brown seaweed *Canistrocarpus cervicornis*. *Journal of applied phycology*, 21 no, pp. 341-346. <https://doi.org/10.1007/s10811-008-9374-9>
- [28] Wu, Z., Xie, L., Xia, G., Zhang, J., Nie, Y., Hu, J., ... & Zhang, R. (2005). A new tetrodotoxin-producing actinomycete, *Nocardopsis dassonvillei*, isolated from the ovaries of puffer fish *Fugu rubripes*. *Toxicon*, no 45(7), pp. 851-859. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2005.02.005>
- [29] ELnahas, M., Elkhateeb, W., & Daba, G. (2021). Marine actinomycetes the past, the present and the future. *Pharm. Res*, no 5(2), 000241.a. doi. 10.23880/oajpr-1600024
- [30] Qian, P. Y., Li, Z., Xu, Y., Li, Y., & Fusetani, N. (2015). Mini-review: Marine natural products and their synthetic analogs as antifouling compounds: 2009–2014. *Biofouling*, no 31(1), pp. 101-122.
- [31] Kornsakulkarn, J., Saepua, S., Sriomthong, K., Rachtawee, P., & Thongpanchang, C. (2015). Quinazolinone alkaloids from actinomycete *Streptomyces* sp. BCC 21795. *Phytochemistry letters*, no 12, pp. 6-8.
- [32] Han, X., Liu, Z., Zhang, Z., Zhang, X., Zhu, T., Gu, Q., ... & Li, D. (2017). Geranylpyrrol A and piericidin F from *Streptomyces* sp. CHQ-64 Δ rdmF. *Journal of Natural Products*, no 80(5), pp. 1684-1687.
- [33] Takamura, H., Kinoshita, Y., Yorisue, T., & Kadota, I. (2023). Chemical synthesis and antifouling activity of monoterpene-furan hybrid molecules. *Organic & Biomolecular Chemistry*, no 21(3), pp. 632-638. <https://doi.org/10.1039/D2OB02203F>
- [34] Takamura, H., Ohashi, T., Kikuchi, T., Endo, N., Fukuda, Y., & Kadota, I. (2017). Late-stage divergent synthesis and antifouling activity of geraniol-butenolide hybrid molecules. *Organic & Biomolecular Chemistry*, no 15(26), pp. 5549-5555 <https://doi.org/10.1039/C7OB01160A>
- [35] Moodie, L. W., Cervin, G., Trepos, R., Labriere, C., Hellio, C., Pavia, H., & Svenson, J. (2018). Design and biological evaluation of antifouling dihydrostilbene oxime hybrids. *Marine Biotechnology*, no 20, pp. 257-267. <https://doi.org/10.1007/s10126-018-9802-z>

- [36] Moodie, L. W., Trepos, R., Cervin, G., Brathen, K. A., Lindgard, B., Reiersen, R., ... & Svenson, J. (2017). Prevention of marine biofouling using the natural allelopathic compound batatasin-III and synthetic analogues. *Journal of natural products*, no 80(7), pp. 2001-2011. [https:// doi: 10.1021/acs.jnatprod.7b00129](https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.7b00129).
- [37] Qian, P. Y., Xu, Y., & Fusetani, N. (2009). Natural products as antifouling compounds: recent progress and future perspectives. *Biofouling*, no 26(2), pp. 223-234. [https:// doi: 10.1080/08927010903470815](https://doi.org/10.1080/08927010903470815).
- [38] Zhou, C., Zou, H., Sun, C., & Li, Y. (2021). Recent advances in biosensors for antibiotic detection: Selectivity and signal amplification with nanomaterials. *Food chemistry*, no 361, 130109. [https:// doi: 10.1016/j.foodchem.2021.130109](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130109).
- [39] The pros and cons of ultrasonic antifouling systems Apr 12, 2023. Antifouling Tips. URL: <https://www.electronic-fouling-control.com/the-pros-and-cons-of-ultrasonic-antifouling-systems>.
- [40] Tamburri MN, Davidson IC, First MR, Scianni C, Newcomer K, Inglis GJ, Georgiades ET, Barnes JM and Ruiz GM (2020) In-Water Cleaning and Capture to Remove Ship Biofouling: An Initial Evaluation of Efficacy and Environmental Safety. *Front. Mar. Sci.* no. 7:437. doi: 10.3389/fmars.2020.00437
- [41] AkzoNobel and Philips welcome Damen Shipyards to pioneering antifouling partnership 19 May 2023 URL: <https://www.polymerspaintyournal.com/akzonobel-and-philips-welcome-damen-shipyards-to-pioneering-antifouling-partnership>

© Кірсанова В. В.

Дата надходження статті до редакції: 21.11.2024

Дата затвердження статті до друку: 09.12.2024