

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Гідрометеорологічний
інститут

Кафедра Океанології та морського
природокористування

Кваліфікаційна робота магістра

на тему: "Екосистеми холодноводних коралів та вплив на них кліматичних
змін в океані"

Виконав студент групи МНЗ-220
спеціальності 103 «Науки про Землю»
Куліков Дмитро Євгенович

Керівник: ст. викладач Дерик Ольга
Володимирівна

Консультант д.геогр.н, проф.
Берлінський Микола Анатолійович

Рецензент к.геогр.н, доц _____
Катинська Ірина Вікторівна _____

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Гідрометеорологічний інститут
Кафедра Океанології та морського природокористування
Рівень вищої освіти магістр
Спеціальність 103 «Науки про Землю»
(шифр і назва)
Освітня програма Океанологія і гідрографія
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри океанології
та морського природокористування
Берлінський М.А.



“23” жовтня 2023_року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Куліков Дмитро Євгенович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: "Екосистеми холодноводних коралів та вплив на них
кліматичних змін в океані"

керівник роботи: ст.викладач Дерик Ольга Володимирівна
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ОДЕКУ від “16 ” жовтня 2023 р № 215 «С» П.П.-09

2. Строк подання студентом роботи 10.12.2023р

3. Вихідні дані до роботи

Дані про екологію холодноводних коралів, біогеографічні дані, дані
досліджень районів розташування рифів холодноводних коралів (фізико-
хімічні дані, фіксація часових змін у рифах холодноводних коралів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

- Історія відкриття та досліджень холодноводних коралів
- Які наукові дослідження вже проведені в області вивчення холодноводних коралів та їх взаємодії з кліматичними змінами?
- Які конкретні види холодноводних коралів домінують у різних регіонах світу, і чим вони відрізняються один від одного?
- Яка роль холодноводних коралів в морських екосистемах, і як вони взаємодіють з іншими морськими організмами?
- Які ключові фактори кліматичних змін (температура, рівень моря, кисень) найбільше впливають на холодноводні корали? Наслідки для інших екосистем.
- Запропонувати математичну модель, яка б дозволита оцінювати ризик руйнування холодноводних коралових рифів в залежності від змін параметрів навколишнього середовища, визначити фактори, які повинні враховуватися.
- Шляхи адаптації та збереження екосистем холодноводних коралів

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Рис.1 Мапа приблизного кількісного розподілу екосистем холодноводних коралів у світовому океані

Рис. 2 Приклад структури холодноводного коралового рифу

Рис. 3 Деякі рифоутворюючі або структуроутворюючі холодноводні корали

Рис.4 Формування 'деревних кілець' у структурі гілки коралу

Рис. 5 Глобальна насиченість арагоніту та розподіл холодноводних коралів

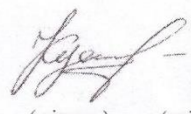
6. Консультанти розділів роботи

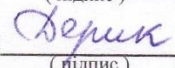
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
2	Берлінський М.А., д.геогр.н., проф.		

7. Дата видачі завдання: “16 ” жовтня 2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Оцінка виконання етапу	
			у %	за 4-х бальною шкалою
1	Огляд літератури з досліджень холодноводних коралів	23.10.23-31.10.23	95	відм
2	Розробка плану роботи	01.11.23	94	відм
3	Виконання основних завдань згідно плану, написання Анотації до роботи	02.11.23-25.11.23	94	відм
4	Написання Аналізу частини 3	26.11.23-30.11.23	93	відм
5	Написання Висновків до роботи	02.12.23	94	відм
6	Написання презентації магістерської роботи	04.12.23	95	відм
7	Рубіжна атестація	13.11.23 - 17.11.23	95	відм
8	Попередній захист магістерської роботи	11.12.23		
9	Перевірка на плагіат	10.12.23		
10	Рецензування	11.12.23		
	Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)		94	відм

Студент  Куліков Д.Є.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи  Дерик О.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

На магістерську роботу по темі «Екосистеми холодноводних коралів та вплив на них кліматичних змін в океані» магістра групи МНЗ-220 Кулікова Дмитра Євгеновича.

Актуальність обраної теми

Актуальність теми "Екосистеми холодноводних коралів та вплив на них кліматичних змін в океані" визначається необхідністю розуміння взаємодії природних та антропогенних факторів, які впливають на морські екосистеми. Зростання глобальних температур та зміни клімату в океані в останні десятиліття стають факторами, які можуть суттєво вплинути на екосистеми холодноводних коралів, важливі компоненти морської біорізноманітності.

Ця дослідницька робота спрямована на аналіз і вивчення взаємозв'язку між кліматичними змінами та станом холодноводних коралових екосистем, розкриваючи можливі наслідки для біорізноманіття та екологічної стабільності морських областей. Враховуючи роль цих коралів у підтримці рибних ресурсів та морської продуктивності, важливість дослідження полягає в розробці науково обґрунтованих стратегій управління та збереженням цих унікальних екосистем.

Проведення даного дослідження визначає конкретні впливи кліматичних змін на розподіл та стан холодноводних коралових рифів. Запропонована математична модель для оцінки загрози руйнування холодноводних коралових рифів може стати основою для побудування більш об'ємної системи оперативного моніторингу та оцінки стану екосистем океану на сонові отриманих даних про фізико-хімічні зміни у середовищаю, а також розробити рекомендації щодо збереження та відновлення цих вразливих морських екосистем. Результати даного дослідження можуть послужити основою для подальших наукових досліджень та розробки стратегій

природоохоронного управління, спрямованих на збереження біорізноманіття та екологічної рівноваги в океані.

Мета роботи

Метою даного дослідження є розуміння взаємодії між холодноводними коралами та кліматичними змінами в океані. Основні завдання включають:

1. Дослідження механізмів впливу підвищення температур на біохімічні та фізіологічні процеси в клітинах коралів.
2. Аналіз структурних та функціональних змін в екосистемах, викликаних кліматичними змінами.
3. Описати базову математичну модель для прогнозування ризику руйнування холодноводних коралових рифів.
4. Врахування отриманих результатів для розробки стратегій збереження та управління цими унікальними морськими екосистемами.

Об'єкт дослідження

Екосистеми холодноводних коралів

Предмет дослідження

Вплив змін фізико-хімічних параметрів океанського середовища на екосистеми холодноводних коралів

Методи дослідження

Для досягнення поставленої мети та вирішення завдань у магістерській роботі були використані: збір та аналіз вихідних даних, моделювання.

Результати, їх теоретичне та практичне значення

Дослідження екосистем холодноводних коралів та їх впливу на кліматичні зміни в океані відіграє важливу роль у розумінні природних процесів, які відбуваються у морських середовищах. По-перше, воно відкриває можливість детального аналізу взаємодії між холодноводними коралами та кліматичними факторами. Набуті знання про те, як ці організми реагують на зміни температури води, рівня моря та інших кліматичних параметрів, може

служувати основою для подальших теоретичних вивчень у галузі біологічної океанології

До того ж, робота розкриває потенційні взаємодії між холодноводними коралами та іншими складовими морських екосистем. Розуміння цих взаємодій сприяє поглибленню наукових знань про біорізноманіття та функціонування морських середовищ загалом.

Практичне значення дослідження проявляється у його внеску у розвиток стратегій управління та збереження морських екосистем. На основі отриманих результатів можна розробити рекомендації для органів природоохоронного контролю та управління, які сприятимуть збереженню екосистем океану у контексті змін клімату.

Практична значущість полягає також у визначенні можливих наслідків для рибних ресурсів та місцевих господарств. Зміни в екосистемах холодноводних коралів можуть вплинути на рибальство та активно використовувані прибережні ресурси, що вимагає ретельного аналізу та розробки стратегій сталого використання морських ресурсів.

Робота містить:

Сторінок – 52

Рисунків – 5

Літературних посилань – 12

Ключові слова: ХОЛОДНОВОДНІ КОРАЛИ, ЕКОСИСТЕМИ ГЛИБОКОГО МОРЯ, ЗАКИСЛЕННЯ ОКЕАНУ, АРАГОНІТ, КОНТИНЕНТАЛЬНИЙ СХИЛ, ЧАСТКОВО ОРГАНІЧНІ РЕЧОВИНИ, КАЛЬЦИФІКАЦІЯ, АПВЕЛЛІНГ

SUMMARY

This master's thesis explores "Ecosystems of Cold-Water Corals and their response to climate change in the Ocean" by Master's student of the MNZ-220 group, Dmytro Yevhenovych Kulikov.

Relevance of the chosen topic

The relevance of the topic "Cold-water coral ecosystems and the impact of climate change in the ocean" is determined by the need to understand the interaction of natural and anthropogenic factors affecting marine ecosystems. The increase in global temperatures and oceanic climate changes in recent decades are becoming factors that can significantly affect cold-water coral ecosystems, important components of marine biodiversity.

This research work is aimed at analyzing and studying the relationship between climate changes and the state of cold-water coral ecosystems, revealing possible consequences for biodiversity and ecological stability of marine areas. Considering the role of these corals in supporting fish resources and marine productivity, the importance of the study lies in the development of scientifically based management and conservation strategies for these unique ecosystems.

This study identifies specific impacts of climate change on the distribution and condition of cold-water coral reefs. The proposed mathematical model for assessing the threat of destruction of cold-water coral reefs can serve as the basis for building a more comprehensive system of operational monitoring and assessment of the state of ocean ecosystems based on the obtained data on physicochemical changes in the environment, and also develop recommendations for the conservation and restoration of these vulnerable marine ecosystems. The results of this study can serve as a basis for further scientific research and the development of environmental management strategies aimed at preserving biodiversity and ecological balance in the ocean.

Purpose of work

The aim of this study is to understand the interaction between cold-water corals and climate changes in the ocean. The main objectives include:

1. Investigating the mechanisms of how increased temperatures affect the biochemical and physiological processes in coral cells.
2. Analysing the structural and functional changes in ecosystems caused by climate changes.
3. Describing a basic mathematical model for predicting the risk of destruction of cold-water coral reefs.
4. Considering the obtained results for developing conservation and management strategies for these unique marine ecosystems.

Research Object:

Cold-water coral ecosystems

Subject of Research:

The impact of changes in the physicochemical parameters of the oceanic environment on the ecosystems of cold-water corals

Research Methods:

To achieve the set goal and solve the tasks in the master's thesis, the following were used: collection and analysis of primary data, modeling.

Results, Their Theoretical and Practical Significance

The study of cold-water coral ecosystems and their impact on climate change in the ocean plays an important role in understanding the natural processes occurring in marine environments. Firstly, it opens up the possibility for detailed analysis of the interaction between cold-water corals and climatic factors. Acquired knowledge about how these organisms respond to changes in water temperature, sea level, and other climatic parameters can serve as a basis for further theoretical studies in the field of ecology and marine biology.

Moreover, the work reveals potential interactions between cold-water corals and other components of marine ecosystems. Understanding these interactions contributes to deepening scientific knowledge about biodiversity and the functioning of marine environments in general.

The practical significance of the research is manifested in its contribution to the development of management and conservation strategies for marine ecosystems. Based on the obtained results, recommendations can be developed for environmental control and management bodies, which will promote the conservation of ocean ecosystems in the context of climate change.

The practical importance also lies in identifying potential consequences for fish resources and local economies. Changes in cold-water coral ecosystems can impact fisheries and actively used coastal resources, requiring careful analysis and development of strategies for sustainable use of marine resources.

The work contains:

Pages – 52

Illustrations –5

Literature references –12

Keywords: COLD-WATER CORALS, DEEP-SEA ECOSYSTEMS, OCEAN ACIDIFICATION, ARAGONITE, CONTINENTAL SLOPE, PARTICULATE ORGANIC MATTER, CALCIFICATION, UPWELLING

ЗМІСТ

ВСТУП.....	12
1 ХАРАКТЕРИСТИКА ХОЛОДНОВОДНИХ КОРАЛОВИХ ЕКОСИСТЕМ.....	14
1.1 Історія та розвиток досліджень екосистем холодноводних коралів	14
1.2 Опис видів та їхнього поширення.	23
1.3 Роль холодноводних коралів у морських екосистемах	26
2 ЕКОЛОГІЯ ХОЛОДНОВОДНИХ КОРАЛОВИХ РИФІВ.....	28
2.1 Природні умови в областях зростання холодноводних коралів	28
2.2 Визначення факторів, що впливають на стабільність екосистем	38
3 АНАЛІЗ ВПЛИВУ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА ЕКОСИСТЕМИ ХОЛОДНОВОДНИХ КОРАЛІВ.....	39
4 ОПИС МОЖЛИВОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ РИЗИКУ РУЙНУВАННЯ ХОЛОДНОВОДНИХ КОРАЛОВИХ РИФІВ.....	43
5 ШЛЯХИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОСИСТЕМ ХОЛОДНОВОДНИХ КОРАЛІВ.....	45
ВИСНОВКИ.....	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	51

ВСТУП

Коралові рифи зазвичай асоціюються з мілководними тропічними морями; однак нещодавні глибоководні дослідження океану з використанням передової акустики та підводних апаратів виявили несподівано широко поширені та різноманітні коралові екосистеми в глибоких водах на континентальних шельфах, схилах, підводних горах і хребтах по всьому світу. Кілька останніх досліджень висвітлили екологічну важливість середовищ існування холодноводних коралів, як точок біорізноманіття, оскільки вони розвивають складні локальні та регіональні ланцюги харчування, служачи важливими місцями нересту, розведення та годівлі для безлічі риб і безхребетних. Зокрема, вони підтримують видово різноманітні, високобіомасні екосистеми на водних глибинах, де інакше життя відносно рідкісне.

Проте, кількісні дослідження та процесно-орієнтований аналіз, який відноситься до структури холодноводних коралів, географічного розподілу та фізичних умов (наприклад, течії, глибина, температура, геологія та екологія), є рідкісними через їхню складну структуру та обмежений доступ. Багато досліджень проводяться ізольовано і не можуть бути порівнянні через використані методи або масштаб досліджуваної території. Таким чином, ми тільки починаємо розуміти конкретні екологічні толерантності цих екосистем. Очевидно, що існують великі прогалини у знаннях, які потребують подальшого картування та інтегрованих, міждисциплінарних та багатомасштабних досліджень, включаючи інтегроване моделювання розподілу, геології, біології, екології та оцінку впливу людини. Досягнення, розглянуті тут, включають використання коралів як палеокліматичних архівів та їх біогеологічне функціонування, біорізноманіття та біогеографію. Загрози для цих крихких, довгоіснуючих і багатих екосистем зростають: наслідки глибоководного тралення вже широко поширені, а наслідки

підкислення океану є потенційно руйнівними. Проте, екосистеми холодноводних коралів постійно зазначаються, як високопріоритетні середовища для збереження в декількох міжнародних ініціативах з охорони морського навколишнього середовища як типи глибоководних середовищ існування особливого інтересу.

За оцінками, менше 5% морського дна нанесено на карту з порівнянною роздільною здатністю до аналогічних досліджень на суші. Проте за останні кілька десятиліть з'явилися нові технології дозволили краще досліджувати морські глибини, відкриваючи нові екосистеми та середовища; від спільнот мікроорганізмів у перегрітих гідротермальних джерелах до складних, взаємопов'язаних пелагічних середовищ існування. Тим не менш, такі обмежені знання про глибоке море обмежує нашу здатність передбачати майбутню реакцію морських організмів на посилення антропогенного тиску та зміна умов навколишнього середовища. Рифові середовища холодноводних коралів є чудовим прикладом таких екосистем, що знаходяться на глибинах до понад 2 км. Хоча корали асоціюються з теплими тропічними водами, саме в холодних і темних водах глибокого океану холодноводні корали утворюють рифи, які конкурують зі своїми тропічними побратимами з точки зору видового багатства і різноманітності

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ХОЛОДНОВОДНИХ КОРАЛОВИХ ЕКОСИСТЕМ

1.1 Історія та розвиток досліджень екосистем холодноводних коралів

Дослідження холодноводних коралів стрімко розвивалися з середини 1990-х і далі з проведенням міжнародних симпозіумів у 2000 році. Спочатку це було викликано технологічним прогресом у поєднанні зі зростаючою потребою в розумінні екосистем на глибоких континентальних окраїнах і схилах, як морська розвідка вуглеводнів і глибинна водний промисел поширився на ці території. Величезні успіхи, досягнуті в акустичному картографуванні морського дна за допомогою багатопроменевих ехолотів, виявили раніше невідому щільність холодноводних коралових рифів і коралових карбонатних горбів. Обидва підтримують великі довгоіснуючі біогенні рифи, які через динамічні процеси росту та (біо) ерозії можуть накопичуватися на десятках метрів над навколишнім морським дном, локально змінювати осадові структури та створювати ніші для різноманітної спільноти. У північно-східній Атлантиці холодноводні структури коралового рифу, структуровані *Lophelia pertusa*, розвинулися під час міжльодовикових періодів, але були відсутні протягом періодів льодовикового клімату, що вказує на дуже тісний зв'язок із глобальним кліматом. Суттєві структури, утворені кораловими карбонатними курганами, утворені послідовностями міжльодовикових каркасів коралових рифів, перекритих льодовиковими відкладеннями. В інших регіонах дослідження холодноводних коралів стрімко розвиваються, прикладами яких є дослідження поодиноких склерактиній *Desmophyllum dianthus* у чилійських фіордах і колоніальних склерактиній у середземноморських каньйонах. Паралельно з роботою по картографуванню та опису холодноводних середовищ існування коралів зростало розуміння факторів навколишнього середовища, які контролюють їх поширення. Холодноводні корали часто асоціюються з певними температурами та солоністю, і є докази того, що *L. pertusa* в північно-східній Атлантиці зустрічається в особливому шарі щільності (сигма-тета 27,35–27,65 кг м⁻³), можливо, через те, що личинки розсіюються латерально вздовж цього горизонту. Однак у локальних масштабах поява холодноводних коралів тісно пов'язана з місцями, де свіжий нестабільний харчовий матеріал швидко транспортується з поверхні [2], часто в місцях, де рельєф морського дна та потік води взаємодіють, сприяючи збільшенню постачання їжі [3]. Однак без відповідної твердої поверхні для прикріплення личинок малоімовірно, що холодноводні корали зможуть осісти і процвітати.

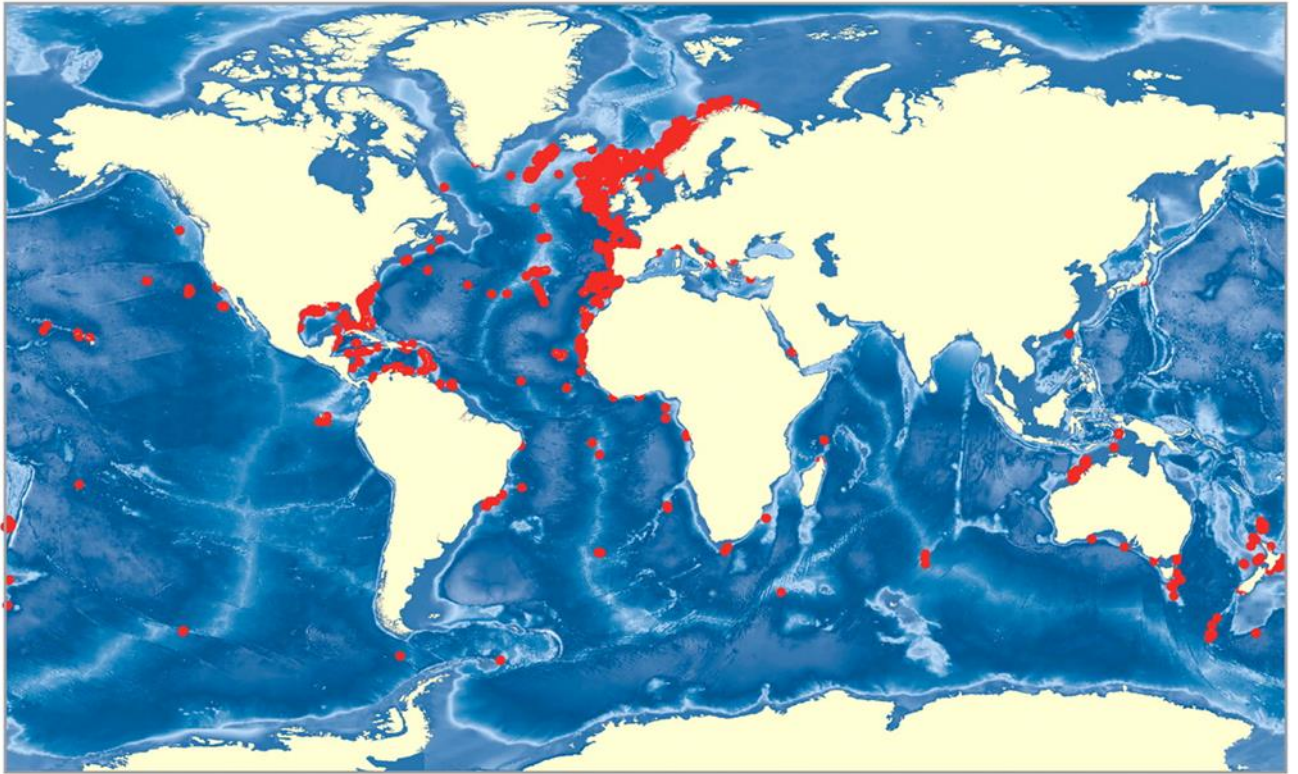


Рис.1 Мапа приблизного кількісного розподілу екосистем холодноводних коралів у світовому океані [1]

Екосистеми холодноводних коралів є справжніми оазами серед пустелі глибокого моря, маючи вище біорізноманіття, біомасу та швидкості обробки органічної речовини порівняно з м'яким осадовим дном моря поза рифами на аналогічній глибині.

Холодноводні корали - це довгоживучі та повільноростучі кнідарії, до складу яких входять кам'яні корали (наприклад, Scleractinia, серед яких *Desmophyllum pertusum*, нещодавно синонімізовані з *Lophelia pertusa* [6], *Madrepora oculata* та *Oculina* spp.), м'які корали (Octocorallia, включаючи "дорогоцінні" корали, морські віяла горгонії та бамбукові корали), чорні корали (*Antipatharia*) та гідрокорали (*Stylasteridae*). Загалом вони ростуть там, де взаємодія між топографічною нерівномірністю та динамікою водної маси (донні течії, внутрішні хвилі) створює помірну до сильної гідродинаміку, в поєднанні з наявністю твердих субстратів, високим потоком частково органічної речовини (ПОМ) та зниженим внеском теригенних відкладень [4]. Багато ХВК розвивають кальцієві карбонатні скелети, які пастять седименти,

що знаходяться у воді, та створюють структурні середовища існування, такі як коралові сади, рифи та пагорби [2].

Коли склерактинові холодноводні корали ростуть, вони створюють структурно складний каркас, що складається з мозаїки живих коралів, мертвих гілок коралів, асоційованих фаун і коралового уламку. Рамка рифу знижує швидкість течії і тим самим стимулює осідання дрібних частинок між гілками коралів. Коли ріст коралів і накопичення осаду всередині каркасу перевищують "амбієнтне" осідання дна моря поза рифами, формуються карбонатні пагорби заввишки від десятків до сотень метрів і завширшки кілька кілометрів на геологічних часових шкалах. Отже, формування коралових пагорбів тісно пов'язане з ростом коралів і наповненням осаду .



Рис. 2 Приклад структури холодноводного коралового рифу [9]

Найбільш поширеним є кам'яний корал *Lophelia pertusa*. Від Північної Норвегії смуга рифів тягнеться вздовж континентальних окраїн до Західної Африки, інша - між Новою Шотландією (Канада) і Мексиканською затокою. Вони можуть бути знайдені навіть у Середземному морі та в Карибському басейні.

Більшість рифів *Lophelia* розташовані на глибині від 200 до 400 метрів. Однак, також відомий риф всього на 39 метрів у внутрішньому Тронхеймському фіорді, а також місце у ланцюгу підводних гір Нової Англії на глибині більше ніж 3000 метрів. Денне світло не досягає цих глибин - і на

відміну від більшості тропічних коралів, холодноводні корали не живляться за допомогою фотосинтезуючих симбіонтів зооксантел. Вони фільтрують планктон з води і тому процвітають у регіонах, де сильні течії подають їм їжу. З температурами води від чотирьох до майже 14 градусів за Цельсієм, *Lophelia pertusa* толерує відносно широкий діапазон, але більшість з них можна знайти при температурах між шістьма та восьмома градусами.

Ще один важливий кам'яний корал, який населяє рифи, засновані *Lophelia pertusa*, - це *Madrepora oculata*. Він також є космополітичним і живе на глибинах від 55 до трохи менше ніж 2000 метрів. Але їх зигзагоподібні гілки занадто крихкі, щоб формувати великі підводні зарості.

Два види м'яких коралів часто зустрічаються разом з *Lophelia*: червоний, рожевий або кремовий *Paragorgia arborea*, також відомий як "жувальна гумка-корал" через їх набряклі гілки. Незліченні поліпи живуть у їх м'якій зовнішній оболонці. Коли вони висувають свої щупальця для годування, гілки виглядають так, ніби вони вкриті квітами. *Paragorgia* заввишки до трьох метрів навіть перевищується помаранчевим *Primnoa resedaeformis*. Він росте до шести метрів у висоту і знайдений на глибинах до 3200 метрів. Кошикові зірки часто лізуть на гілки *Primnoa*, щоб звідти ловити планктонну їжу.

Кам'яні корали, такі як *Lophelia pertusa*, будують свої скелети з арагоніту, особливо розчинної форми карбонату кальцію. Тому вчені припускали, що їх ріст буде порушений, якщо через збільшення океанського закислення та зниження рН морської води буде доступно менше карбонат-іонів.

Склерактинові коралові рифи, що процвітають у холодних та глибоких водах, є широко поширеними екосистемами уздовж континентальних окраїн, але наше розуміння основних процесів формування (та руйнування) рифів залишається фрагментарним. Серед видатних прикладів місць з глибоководними коралами:

- численні глибоководні шельфові рифи біля Норвегії з Рифом Сула як найвідомішим (Фрайвальд та ін. 1999),
- величезні пагорби в прогоні Роколл та Поркупайнській увагині, де участь глибоководних коралів є значною, але процеси формування пагорбів досі не зрозумілі через відсутність буріння (Геміет та ін. 1998),
- так звані Дарвінські Пагорби на Вайвілл-Томпсон-Ріджі, які можуть представляти початкові стадії формування пагорбів (Бетт 1999).

Однак наявні дані вказують, що існування найбільшої провінції коралових рифів не обмежується поверхневими водами субтропічного та тропічного кліматичного поясу, як це традиційно вказується в підручниках.

Натомість найбільша провінція коралових рифів процвітає на середніх глибинах від високих широт до низьких широт обох півкуль уздовж континентальних окраїн та підводних гір. Уздовж північно-східного атлантичного окраю, який є в центрі уваги цього огляду, домінуючими є коралові рифи, основою яких є склерактинові корали, що мають важливе значення у формуванні унікальних глибоководних біогеохімічних та екологічних систем.

Домінуючими рифоутворюючими склерактиновими коралами є каріофілід *Lophelia pertusa* та окулінід *Madrepora oculata* (Рис. 3А, В). Звичайним третім видом, який часто зустрічається або на мертвих колоніях *Lophelia*, або *Madrepora*, є *Desmophyllum cristagalli* (Рис. 3Е). До сьогодення в середовищах існування *Lophelia pertusa* в Північній Атлантиці було ідентифіковано 868 видів. Однак, набір даних має сильну упередженість внаслідок різних методів та технік зразкування в минулому. Нещодавно запуснені дослідницькі програми по глибоководним кораловим спільнотам в даний час змінюють наші традиційні погляди на біорізноманіття та динаміку екосистем глибоких вод.

На великому рівні оцінки, розподільний візерунок глибоководних коралових спільнот уздовж континентальних окраїн, здається, краще пояснюється з точки зору фізичної океанографії. Хоча *Lophelia pertusa* та *Madrepora oculata* були відомі вченим ще з до-лінеанських часів і, можливо, навіть раніше рибалкам, ми лише на межі розуміння їхньої біології, розселення, довговічності та екологічних вимог. Це було чітко продемонстровано нещодавнім неочікуваним відкриттям процвітаючих колоній *Lophelia* на якорях нафтової платформи Beryl Alpha у Північному морі. Проте, навіть без базового розуміння біології рифів *Lophelia*, вони були предметом складних теорій, які пояснюють їхнє поширення контролюванням:

- 1) збільшенням доступності їжі через підвищену первинну продуктивність або уловлювання поживних речовин з океанських течій;
- 2) підвищенням концентрації кисню на глибинах, де знаходяться коралові рифи;
- 3) зниженням конкуренції з іншими бентосними організмами.

Ці теорії пропонують пояснення для формування рифів *Lophelia*, але недостатньо розкривають динаміку їх росту та взаємодії з ширшими морськими екосистемами. Розуміння цих процесів важливе для збереження та управління холодноводними кораловими рифами, особливо в контексті зростаючих загроз від зміни клімату, діяльності глибоководного рибальства та розвідки морських ресурсів.

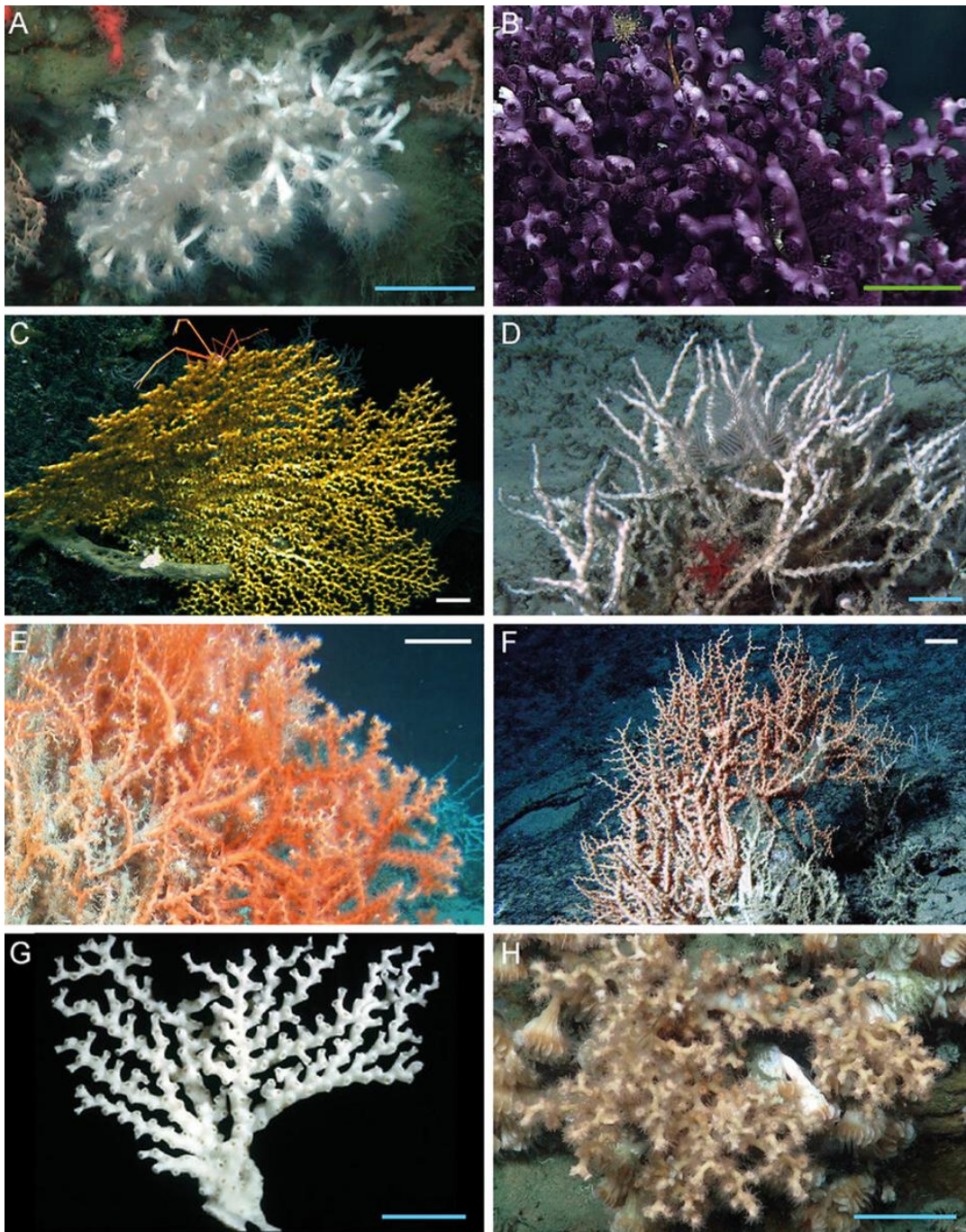


Рис. 3 Деякі рифоутворюючі або структуроутворюючі холодноводні корали (А) Колонія *Desmophyllum pertusum* на стіні каньйону Балтимор, Західна Атлантика (434 м). Авторство: Експедиція "Глибоководні каньйони 2012" NOAA-OER/BOEM/USGS. (В) *Enallopsammia* cf. *pusilla* з Гавайських підводних гір (800 м). Авторство: NOAA-OER, 2015 Нохопу Моана. (С) Колонія *Enallopsammia rostrata* на глибокій стіні Західного Флоридського Ескарпменту (1900 м). Авторство: Брук та ін. (2022), NOAA-OER/ROV Global Explorer. (D) *Enallopsammia profunda* з коралових пагорбів південно-східних США (770 м). Авторство: Брук та ін. (2005), NOAA-OE. (E) *Madrepora oculata* з коралових пагорбів біля мису Канаверал, Флорида (420

м). Авторство: Росс & Квадріні (2009); NOAA DSCRTP/CIOERT/USGS. (F) Колонія *Madrepora oculata* на виставлених скелястих місцевостях Флоридської протоки, США (400 м). Авторство: Брук та ін. (2005), NOAA-OE. (G) Колонія *Madrepora carolina*, зібрана з банку Розалінд, Нікарагуа (162 м). Авторство: Стівен Кернс, Інститут Природної Історії Смітсоніан, США. (H) *Solenosmilia variabilis* з окремими, більшими полінами *Desmophyllum dianthus* на стіні каньйону Норфолк, Західна Атлантика (1200 м). Авторство: Експедиція "Глибоководні каньйони 2013" NOAA-OER/BOEM/USGS. Масштабні лінійки, зелена: 1 см, синя: 5 см, біла: 10 см.[3]

Зі збільшенням наукових та комерційних зусиль у дослідженні глибоководних морських середовищ на континентальному шельфі, схилах та глибоководних умовах, ряд ключових відкриттів продемонстрував наші обмежені знання про фундаментальні процеси та ресурси "внутрішнього простору Землі". Серед них, спектакулярні гідротермальні джерела з їх хемосимбіотичними спільнотами уздовж зон розповсюдження морського дна, виявлення гідратів газу та метанових вентилів чи витоків уздовж континентальних окраїн, а також розкриття загадкових афотичних коралових рифів у Північній Атлантиці, про які йдеться тут, стали пріоритетними об'єктами у дослідженнях на шельфі. Однак не тільки глибоководне бентосне середовище пропонувало спектакулярні відкриття, гідрографія нижче бази штормових хвиль також виявилася набагато динамічнішою, ніж це вважалося раніше.

Такі явища, як внутрішні хвилі, бентосні шторми або топографічно-керовані течії у вигляді Тейлорівських колон, вихорів та вірів, бароклінні припливи та межові течії, розсіюють енергію на межі осаду-вода, що може:

- 1) генерувати індуковані течією, мобільні форми ложа на великих глибинах,
- та 2) концентрувати засвоюваний детритус для споживання гетеротрофними організмами.

Ці процеси часто передають імпульси частинками насичених вод на глибоководне дно, які, в свою чергу, стимулюють бентосні спільноти забезпечувати свої метаболічні потреби та контролювати варіації в просторовому розподілі та агрегації спільнот безхребетних. Існує все більше доказів того, що ці так звані бентосно-пелагічні процеси зв'язку є важливими для функціонування глибоководних екосистем.

Склерактинові корали в холодних та глибоких середовищах

У наступному контексті термін "глибоководний" не використовується для опису коралів, які живуть у глибоководних масах океану. Тут "глибоководний" використовується для визначення здатності коралів процвітати на великих глибинах у холодних та темних екологічних умовах, зазвичай нижче бази штормових хвиль. Поширення сучасних глибоководних коралових побудов керується:

- 1) прикріпленням до твердого субстрату,
- 2) асоціацією з постійними або епізодично сильними течіями, що перешкоджають осіданню дрібнозернистого детриту, що сприяє потокам частинок їжі та обміну водами та, можливо, личинками та гаметами.

Всі склерактинові корали, які існують у холодних, глибоких та - сезонно - евтрофікованих середовищах, не мають фотосимбіонтів у своїй м'якій тканині. Отже, ці корали входять до групи азооксантеллятних або незооксантеллятних. Азооксантеллятні корали в цілому зустрічаються у широкому батиметричному діапазоні, від 0 до 6200 м глибини води та при температурі від -1 до 29 градусів за Цельсієм. На відміну від зооксантеллятних коралів, група азооксантеллятних є космополітичною.

1.2 Опис видів та їхнього поширення

Сімдесят п'ять відсотків із 121 відомого виду азооксантеллятних коралів є одиночними, тоді як решта колоніальні - основна передумова для створення каркасу. Наявні дані про збереження глибоководних коралових побудов все ще обмежені, і пробурювання через ці структури рідко спробували. Серед колоніальних азооксантеллятних коралів лише декілька мають великий потенціал для виробництва каркасів порівняно з навколишнім донним середовищем. Більшість з них створюють низькі куцеобразні зарості, які генерують велику кількість коралового уламку, а не каркаси *in situ* після смерті. Грунти з коралового уламку можуть перетворитися на вакстон, пакстон або, швидше за все, на рудстон у геологічному записі, тоді як каркасні побудови *in situ* можуть зберігатися як фреймстони. Такі види, як *Madrepora oculata*, переважно утворюють анастомозуючі, куцевидні колонії з переважно зовнішнім ростом гілок за рахунок постійного розмноження поліпів (рис. 1б). Такий спосіб росту призводить до утворення 30 - 50 см високих, часто віялоподібних колоній. Однак потенціал для підйому або прогресування цього крихкого способу росту досить обмежений. Відомі лише чагарники та/або уламкові фації, а не каркаси з домінуванням *Madrepora*. Те саме обмеження потенціалу каркасу було відзначено Стетсоном для випадків *Dendrophyllia profunda* на Блейк Плато. Навпаки, більшість екотипів *Lophelia pertusa* також виробляють 30 - 100 см (іноді до 150 см) високі масивні, дендроїдні та куцевидні скелетні колонії, але сусідні гілки зазвичай ростуть разом, таким чином значно підвищуючи архітектурну стабільність каркасу. Варто пам'ятати, що, крім звичок росту колоній, є кілька інших факторів, включаючи різні типи заповнення осадами та діагенетичний режим, здійснюють сучасний і значний контроль над стилем збереження глибоководних коралових каркасів. У середовищах, які не підтримують швидке раннє діагенетичне цементування, потік затриманих детритних часток з навантаження на підвісі у воді, швидкість росту коралових каркасів

та біоерозійні процеси утворюють чутливий баланс між підтримуваним каркасом та/або уламковими частинами коралів або підтримуваними багном підвищеннями дна.

Каркаси глибоководних коралів

Екологічні вимоги для формування каркасів азооксантеллятних коралів, таких як *Laphelia pertusa*, досить добре відомі. Вони потребують твердого субстрату для осідання та метаморфози. Сильні донні течії перешкоджають відкладенню дрібнозернистих відкладень, тому *Laphelia* переважно зустрічається на різних видах топографічних підвищень, таких як затоплені моренні хребти, глиняні хребти, леве від брил льодовика, виступи, виступаючі скелі та штучні субстрати. З початку цього століття використовується все більше термінів для опису глибоководних коралових побудов: коралова ділянка, кораловий банк, кораловий риф, кораловий рифовий пагорб, кораловий пагорб, карбонатний пагорб та біогерм. Це широкий спектр термінів відображає прогрес у офшорних технологіях. Ранні дослідники, які отримали свої результати виключно на основі драгування та ехолокації, використовували термін банк або риф. Розмаїтість термінології виникла з підвищенням використання систем високої роздільної здатності акустики та камер, які працюють з буксируваних систем, дистанційно керованих транспортних засобів та підводних човнів. Глибоководні коралові побудови можуть формувати значні топографічні підйоми над навколишнім дном моря. Знову ж таки, через відсутність пробурювання, інформація про внутрішню частину цих коралових структур все ще маловідома.

Коралові ділянки

Коралові ділянки, або ділянки росту коралових колоній, є фундаментальним елементом біотопів, що знаходяться у великих глибинах океану. Термін "коралові ділянки" був вперше введений Вілсоном для опису

поселень *Laphelia pertusa* на Роколл Банку, але цей явище також спостерігається в інших регіонах і включає в себе різноманітні особливості.

Один із цікавих наукових фактів полягає в розподілі коралових ділянок за глибиною. Згадані раніше зрілі ділянки, що розташовані на Роколл Банку на глибині приблизно 100 м до 200 м, відрізняються від коралових ділянок, що ростуть на Поркупайнському Банку на глибині від 200 м до 500 м. Це свідчить про адаптацію цих організмів до різних умов середовища та глибини.

Ще одним науковим аспектом є спосіб формування коралових ділянок. Вони зазвичай розпочинаються з окремих колоній, які формуються внаслідок осідання личинки планули. Далі, в ідеальних умовах росту, навколо первинної колонії розвивається зовнішнє кільце молодших супутникових колоній, переважно за рахунок вегетативного розмноження. Цей процес відбувається на досліджуваних глибинах, і має велике наукове значення для розуміння росту та поширення коралових рифів у глибоких водах океану.

Крім того, максимальний розмір одиночної колонії *Laphelia pertusa* вражає. Він знаходиться у діапазоні до 1 м у висоту та до 1.5 - 2 м в поперечнику, при цьому вона має круглу форму. Ця особливість коралових ділянок досліджується для розуміння факторів, що впливають на їхній ріст і розвиток.

Узагальнюючи, коралові ділянки представляють собою цікавий об'єкт дослідження у глибоких водах океану, і їхні різноманітні аспекти вивчаються науковцями для кращого розуміння цього екосистемного явища.

1.3 Роль холодноводних коралів у морських екосистемах

Біотичні зв'язки відносяться до функціональних цінностей, пов'язаних з біорізноманіттям рифів ХК та роллю ХК як незамінного середовища існування риб у підтримці конкретних рибних промислів. Наприклад, коралові ґрунти, здається, служать середовищем існування для багатьох видів; включаючи рибу комерційної цінності [3-6]. Гілки коралів служать притулком для багатьох глибоководних видів. Безхребетні, такі як крихкі морські зірки, морські зірки та пухнасті кріноїди, живуть безпосередньо на колоніях коралів, а менші тварини закопуються в скелети [7].

Рифи ХК збігаються з районами, де можна цілеспрямовано ловити великі концентрації риб. Рибалки спостерігали, що в районах коралів риби більше, ніж у сусідніх районах [2]. Морські окуні (*Sebastes*) зустрічаються у великій кількості в районах рифів Лофелії [26]. Також у середовищі ХК знаходять зграї помаранчевого недоцвільового риби [7]. Демерсальні види, такі як тріска та палтус, здаються більш поширеними навколо коралів, ніж на оточуючому морському дні [4, 6]. Корал "слонова кістка", *Oculina varicosa*, розташований біля узбережжя Флориди, був пов'язаний з луфарем, снпером і амберджеком [8] колоній *Oculina*. Рифи *Oculina* біля Флориди були визнані незамінним середовищем існування риб для видів, що керуються федеральними органами, як і горгоніанові домінувані глибоководні коралові спільноти біля Аляски.

Дослідження показали, що в районах коралів була більша різноманітність видів, ніж у не-коралових районах. Існують можливості, що коралові ґрунти служать місцями нересту та розведення молодих риб; однак ці дані неоднозначні [4, 5].

Останнім часом багато уваги приділяється тому, що було названо незамінним середовищем існування риб (EFH).

ЕФН визначається як "те водне середовище та субстрат, які необхідні риbam для нересту, розмноження, годування або зростання до зрілості". Хоча остаточні результати ще недоступні, дослідження показують, що види риб проявляють факультативне використання середовища існування ХК [3]. Факультативне використання середовища визначається як використання середовища для багатьох важливих життєвих процесів, але відсутність цих середовищ не призводить до вимирання даного виду. Отже, ХКК можуть не бути незамінними середовищами існування, але є ознаки, що це може бути бажаним середовищем для багатьох життєвих процесів риб. Це означає, що знищення такого бажаного середовища може призвести до втрат, пов'язаних із необхідністю риби задовольнятися другорядним, що призводить до нижчого зростання або розмноження, знижуючи потенційну економічну цінність.

2 ЕКОЛОГІЯ ХОЛОДНОВОДНИХ КОРАЛОВИХ РИФІВ

2.1 Природні умови в областях зростання холодноводних коралів

ДІАПАЗОН ГЛИБИН. Холодноводні корали часто називають "глибоководними" коралами, оскільки більшість знахідок та спостережень цих організмів походять з глибоких вод. Однак термін "глибоководні корали" може бути оманливим, оскільки *Lophelia* була знайдена у норвезьких фіордах на мілководді, як глибокому, як 39 метрів, та інші групи холодноводних коралів спостерігалися в водах менше ніж 200 метрів глибиною. Це вказує на те, що гідрографічні умови та геоморфологія морського дна, поєднані з екологічними параметрами, такими як температура, солоність та постачання поживних речовин (див. нижче), є більш важливими факторами, що визначають та обмежують розподіл та ріст холодноводних коралів, ніж глибина (тобто гідростатичний тиск). У високих широтах ці фізичні та екологічні фактори, а також холодноводні корали, можуть зустрічатися в порівняно мілководних районах, тоді як у тропіках та субтропіках ці фактори зустрічаються на більш великих глибинах під теплими водними масами.

ТЕМПЕРАТУРНІ ТА СОЛОНІСТЬ. Знання про температурні та солонісні межі для холодноводних коралів є неповними. Історично, на місцях коралів було зроблено мало відповідних вимірювань, або вони залишилися невиданими, і наразі ефекти змін температури та солоності на коралові екосистеми погано зрозумілі. *Lophelia pertusa* толерує температури між 4 і 13°C. Дослідження з Фарерсько-Шетландського каналу, північно-східної Атлантики, свідчать про те, що цей вид може терпіти більш низькі температури – навіть досягаючи піднульових значень на короткий період часу. Однак, коли записи *L. pertusa* пов'язують з глибиною у Фарерсько-Шетландському каналі, очевидно, що цей вид відсутній у глибших водах,

походженням з Арктики. На іншому кінці спектра, живі *L. pertusa* та *Madrepora oculata* з маундів біля Санта Марія ді Леука, Іонічне море, процвітають при температурах 13.8°C на глибинах від 550 до 1 100 м.

Середземне море є унікальним прикладом природної лабораторії глобальних змін. З кінця останнього льодовикового періоду води глибоководних басейнів Середземного моря значно потепліли. Під час холодніших кліматичних періодів холодноводні корали широко поширювалися на континентальних окраях та підводних горах Середземного моря. З тих пір різноманітність холодноводних коралів та асоційованої фауни зменшилася, оскільки тепліші води менш сприятливі для їхнього росту. Поширення *Lophelia* на північ у північно-східній Атлантиці під час потепління, що послідувало за останнім льодовиковим періодом, можна відновити за допомогою радіовуглецевого датування викопних коралів. Під час останнього льодовикового максимуму, 18 000 років тому, *Lophelia* зустрічалася в центральній північно-східній Атлантиці на підводних горах біля Гібралтару та поблизу північно-західної Африки, між 33 і 35° північної широти. Близько 12 000 до 10 000 років тому корал почав реколонізувати карбонатні пагорби, знайдені в Поркупайнській Увагині та Роколлському Жолобі на 51 до 55° північної широти. Найстаріші віки радіовуглецевого датування, отримані від *Lophelia* у норвезьких водах (від 60 до 64° північної широти), зосереджуються навколо 8 600 років тому. Цей післяльодовиковий рух на північ *Lophelia* з центральної північно-східної Атлантики до середньої норвезької шельфу відбувся протягом 10 000 років і представляв зміну на північ на 3 500 км. Протягом того ж періоду коралові екосистеми Середземного моря знаходилися в стані спаду через потепління моря.

Lophelia pertusa толерує значення солоності від 32‰ у скандинавських фіордах до щонайменше 38.78‰ в Іонічному морі. Географічні регіони, де коралові екосистеми можуть бути вразливими як до збільшення, так і до зниження солоності, - це Середземне море та скандинавські фіорди. У

останньому випадку, як у шведському Костерфьорді, *Lophelia* живе лише за кілька метрів нижче постійного бракічного поверхневого водного шару (Вішак та ін., в процесі публікації). Аналогічно, там, де *Lophelia* колонізувала нафтові установки в Північному морі, вона знаходиться лише на глибинах, де цілий рік відчувається вплив атлантичних водних мас, що відображає переважну асоціацію цього виду з солоностями 35‰ та температурами 7 до 8°C.

Температурні та солонісні межі *L. pertusa* вказують на те, що райони зі стабільними екологічними умовами є бажаними місцями для росту коралів. Зміни цих фундаментальних факторів можуть викликати місцеве вимирання видів. Тому визначення екологічних межових умов для коралів є важливим для:

- 1) оцінки місць проживання коралів, розташованих на біогеографічних кордонах;
- 2) проведення досліджень імовірності потенційних коралових місць проживання в ще не досліджених регіонах океанів (наприклад, віддалені підводні гори та океанічні банки).

ХАРЧУВАННЯ ТА ДЖЕРЕЛА ЇЖИ Доступно мало інформації про харчування та джерела їжі холодноводних коралів. Найімовірніше, що корали живляться живим планктоном та суспендованими органічними частками, які вловлюються тентакулями поліпів. Візуальні спостереження, проведені за допомогою бороскопічних камер, встановлених на маніпуляторі (роботизованому руці) населеного субмарини поруч з живою колонією, і в акваріумах показали, що корали активно вловлюють і споживають планктон. Експерименти показали, що поліпи *L. pertusa* полюють на зоопланктон розміром до 2 см. Було висунуто припущення, що корал може отримувати поживні речовини від бактерій, асоційованих з витоками вуглеводнів. Однак попереднє біохімічне дослідження м'яких тканин *L. pertusa* та *M. oculata* не

надало підтвердження цьому припущенню. Ми також маємо мало або жодної інформації про те, які види поживи використовують різні види коралів, або наскільки значним може бути внесок ресуспендованого матеріалу.

На відміну від тропічних коралових рифів, де майже всі поживні речовини та їжа генеруються та в подальшому використовуються в системі через фотосимбіоз, холодноводні середовища залежать від пелагічного виробництва. Якість та доступність поживних речовин та часток їжі визначають придатність місць проживання коралів. Для покращення розуміння функції та тривалості життя місць проживання коралів, оціночні дослідження повинні вивчати трофічні відносини, включаючи пелагічне виробництво.

ТЕМПИ ЗРОСТАННЯ ТА ТРИВАЛІСТЬ ЖИТТЯ. Річні темпи росту скелету у формуючих середовище холодноводних кам'янистих коралів були оцінені різними дослідниками для *L. pertusa* та *Oculina varicosa* як 4 до 25 мм та 11 до 16 мм відповідно. Такі темпи росту є на порядок нижчими, ніж у гіллястих тропічних симбіотичних коралів, які ростуть зі швидкістю 100 до 200 мм на рік, але приблизно такі ж, як у більшості масивних тропічних коралів. Тривалість життя колоній *Lophelia* поки що невідома.

Зрілі колонії *Lophelia* можна розділити на верхню живу зону та нижню зону мертвого коралового каркасу. Підрахунки кількості поколінь поліпів у живій зоні з різних локацій *Lophelia* в північно-східній Атлантиці показують послідовну кількість, яка рідко перевищує 20 поліпів у послідовно зростаючих гілках колонії. Після кожного утворення нового дочірнього поліпа темпи росту батьківського поліпа значно знижуються, тоді як новоутворений дочірній поліп продовжує рости з високою швидкістю. Здається, що кожне нове покоління поліпів збігається з формуванням нового приросту кальційового шару, який відкладається навколо скелету старих поліпів, що належать лише до живої зони. На поперечних розрізах ці приростові шари нагадують формування 'деревних кілець' (Рисунок 4А,В).



Рис.4 Формування 'деревних кілець' у структурі гілки коралу [3]

Припускаючи, що в ідеальних умовах один поліп утворюється на рік, тривалість життя живої зони колоній *L. pertusa* не перевищує 20 років. Залежно від різних екологічних факторів, 20 живих поколінь поліпів можуть досягти висоти колонії до 35 см на середньонорвезькому рифі Сула, але лише 20 см або менше на карбонатних горбах біля західного Ірландії. Очевидно, що види, такі як *L. pertusa*, вельми різноманітні за своєю загальною морфологією, і ця різноманітність, ймовірно, відображає різні екологічні, екологічні та конкурентні умови.

Більше відомо про темпи зростання та тривалість життя деяких горгоніанових коралів, таких як *Paragorgia* sp., *Primnoa resedaeformis*, *Keratoisis* spp. та *Corallium* spp. Усі дослідження вказують на тривалість життя зрілих колоній від 100 до 200 років. Низькі темпи зростання та тривале життя чітко підкреслюють вразливість холодноводних коралів. Одного разу, коли коралові ґрунти були порушені, наприклад, тралінням, і припускаючи,

що реколонізація відбудеться, минуть багато десятиліть або навіть століття, перш ніж колишня складність середовища зрілих рифів або гігантських горгоніанових дерев буде відновлена.

РЕПРОДУКТИВНА ТА МОЛЕКУЛЯРНА ЕКОЛОГІЯ. Знання про сезонність розмноження, якість гамет, плідючість та постачання личинок формуючих середовище видів, доповнені молекулярно-генетичними методологіями, є важливими для розуміння функцій екосистеми та потенціалу відновлення після руйнівної події, а також для розробки рекомендацій щодо охорони та управління.

Однак, мало відомо про базову репродуктивну біологію формуючих середовище холодноводних коралів. Попередня інформація про репродуктивну біологію доступна для *L. pertusa*, *M. oculata*, *O. varicosa*, *Enallopsammia rostrata*, *Solenosmilia variabilis* та *Goniocorella dumosa*. В той час як більшість тепловодних кам'янистих коралів є гермафродитами, вивчені формуючі середовище холодноводні корали мають окремі статі та відкладають свої гамети у водний стовп для зовнішнього запліднення.

Гаметогенез відбувається безперервно у *E.*, тоді як у інших видів він контролюється сезонно. Відсутність світла та нижче постійного термокліну, глибокі припливні течії та щорічні зміни фізичних властивостей водних мас, наприклад, зимові каскадні події води з континентального шельфу до континентального схилу, можуть бути факторами у синхронізації репродуктивних процесів.

Вільноплаваючі личинкові стадії відомі лише для *O. varicosa*, але вони мають відбуватися і в інших видах. Личинки *Oculina* малі (160 мкм), мають війки та спостерігалися за активним плаванням в акваріумі від одного до двох тижнів перед початком поведінки бентичного осідання.

Дослідження генетичної структури виду в місцевості визначить, чи складається популяція з однієї або кількох менших місцевих популяцій. У

другому випадку ступінь генетичного потоку висвітлює, наскільки ізольовані ці місцеві популяції одна від одної. Коли вид генетично однорідний, втрата місцевої популяції теоретично може бути компенсована з часом, оскільки генофонд не постраждав, і генетичний потік зрештою дозволить природну реколонізацію. Навпаки, втрати від генетично різноманітних видів матимуть набагато серйозніші наслідки.

У північно-східній Атлантиці *L. pertusa* не утворює одну панміктичну популяцію. Натомість, існує висока генетична диференціація між субпопуляціями у фіордах та на континентальному шельфі. Уздовж континентального шельфу генетична диференціація може бути вважена помірною, що свідчить про випадковий, але не постійний, генетичний потік через розсіювання личинок протягом тривалого часу. В кількох місцях було виявлено значні ступені інбридингу, що свідчить про значну частку самозалучення в межах цих субпопуляцій. Наприклад, субпопуляція Дарвінських Пагорбів на глибині 950 м у північному Рокольському Жолобі виявила велику кількість клонів та низьку генетичну різноманітність. Це спостереження підтримує гістологічні дані Валлера та Тайлера (у процесі публікації), які не могли виявити жодного репродуктивного коралу в цій області. Район Дарвінських Пагорбів був інтенсивно тралений, і було задокументовано пошкодження коралів. Подальше тралення матиме серйозний вплив на виживання цієї субпопуляції. На щастя, район Дарвінських Пагорбів нещодавно був захищений за допомогою Європейського рибальського регламенту, що забороняє використання донного тралу, і стане особливою зоною охорони за Європейською директивою про місця існування (92/43/ЕЕС).

Порівняльне молекулярно-генетичне дослідження було проведено на поширеному дорогоцінному коралі *Corallium lauense* в Гавайському архіпелазі, Тихий океан (Бако та Шенк, у процесі публікації). Була проаналізована генетична структура широко розповсюджених популяцій

всередині та між восьмома Гавайськими підводними горами. Між популяціями підводних гір та островів було виявлено незначну диференціацію популяцій, але було виявлено значні рівні інбридингу, що свідчить про те, що популяції *S. lauuense* переважно самозалучаються.

ХИЖАЦТВО ТА ПАРАЗИТИЗМ НА КОРАЛАХ. Масові випадки хижих видів, які поїдають тканину та скелет коралів, відіграють важливу роль у функціонуванні екосистеми. В екосистемах мілковод'я такі події включають спалахи морської зірки «корона тернів». Хоча всі групи їжакоподібних присутні майже у всіх холодноводних коралових екосистемах, чітке хижацьке відношення їжакоподібних-коралів було задокументовано лише для октокоралів островів Алеут, де морська зірка *Hippasteria heathi*, схоже, вибірково поїдала *Primnoa resedaeformis*. У плямах *L. pertusa* та *M. oculata* на карбонатних горбах у Поркупайнській Увагині та Рокольському Жолобі, морська зірка *Rogania* sp. часто зустрічається у зоні живих поліпів. Незважаючи на велику кількість видів риб, які агрегують у різних холодноводних коралових рифах та плямах рифів, не було спостережено жодної риби, яка б поїдала корали, такої як папужкова риба. Хоча деякі гастроподи та ракоподібні відомі як поїдачі тканин коралів та слизу, вони майже не становлять загрози ані кам'янистим коралам, ані октокоралам.

Поява паразитів може знизити придатність господарського організму. Документація про паразитичні організми у холодноводних коралах є численною. Кам'янисті корали, октокорали та корали стилостериди паразитують на декількох групах організмів, таких як ракоподібні аскофорациди, ракоподібні копеподи та форамініфери *Nyctokin sarcophaga*. Однак не існує досліджень про вплив паразитів на придатність господарських коралів.

РІСТ КАРКАСУ РИФІВ ТА БІОЕРОЗІЯ КОРАЛІВ. Ріст каркасу рифів залежить від багатьох чинників і не може бути екстрапольований із темпів росту коралів. Фактори, які потрібно враховувати, включають місцеві

температурні режими та течії, нахил морського дна, частоту та ступінь фізичних порушень, таких як шторми, а також частоту та ступінь біологічних порушень. Усі ці фактори сильно впливають на потенціал вертикального зростання. Відомо, що тропічні коралові рифи ростуть вертикально менше ніж на 1 см на рік. Біоерозія є природним деструктивним процесом, що впливає на ріст кам'янистих коралових рифів як у теплих, так і в холодних водах, пов'язаним з біологічним розкладом кальцієвого каркасу, відомим як "біоерозія".

Біоерозія призводить до розпаду кальцієвих скелетів через активність організмів. Це може бути викликано механічним видаленням карбонатів скелета (біоабразія), або хімічним розчиненням (біокорозія), або поєднанням обох. Різні процеси біоерозії призводять до перетворення кальцієвих скелетів на дрібніші зерна і до обвалення каркасів рифів.

У холодноводних рифах біоерозія є одним із ключових факторів, що послаблює стабільність і, отже, тривалість життя старих коралових колоній. На відміну від тропічних коралових рифів, світлозалежні організми, які викликають руйнування, такі як ціанобактерії та водорості, відсутні в холодноводних рифах. Тут спільноту біоеродуючих організмів складають гриби, губки, форамініфери, моховинки та форонідні черви. Найбільш вразлива зона з найінтенсивнішим зараженням та різноманітністю біоеродерів у скелетах коралів - це мертвий кораловий каркас прямо під зоною живих поліпів. Склад та кількість спільноти біоеродерів, здається, різняться в різних локаціях *Lophelia* з обох боків Північної Атлантики, так само як стабільність каркасу та структурна складність коралових місць проживання.

Темп біоерозії та таксономічний склад спільноти біоеродерів у холодноводних рифах ще належить вивчати та корелювати з місцевими екологічними факторами. Попередні дані вже вказують на потенціал

використання "впливу біоерозії" на холодноводні корали як засобу розшифровки біологічної придатності.

2.2 Визначення факторів, що впливають на стабільність екосистем

Деякі перспективні початкові дослідження пролили світло на кілька важливих екологічних факторів та впливів на навколишнє середовище, що впливають на холодноводні корали. Це також виявило прогалини в наших знаннях та вказує на необхідність подальших досліджень для кращого інформування про розвиток стратегій охорони та управління.

Екосистеми холодноводних коралів, які розташовані на значних глибинах у холодних морських водах, представляють собою важливий біологічний та екологічний компонент морського середовища. Визначення факторів, які впливають на стабільність цих екосистем, є ключовою задачею для їх збереження та управління. Наукові дослідження показують, що стабільність екосистем холодноводних коралів залежить від численних факторів, які можуть бути розділені на кілька категорій.

1. Фізичні фактори:

- **Температура води:** Холодноводні корали існують в умовах низьких температур, і будь-які зміни у температурі можуть впливати на їхню стабільність. Підвищення температури може призвести до стресу та вибуху коралів, в результаті чого може зменшитися їхнє виживання
- **Гідродинаміка:** Сила течій і хвиль може мати важливий вплив на стабільність коралових рифів. Механічні пошкодження коралів, спричинені сильними течіями або штормами, можуть погіршити їх стан
- **Глибина:** Глибина місця розташування коралів може визначати рівень доступу до світла та харчових ресурсів. Зміни в глибині можуть впливати на здатність коралів до фотосинтезу та росту

2. Хімічні фактори:

- Океанське закислення: Збільшення концентрації вуглекислого газу в атмосфері призводить до океанського закислення, що може погіршити стан холодноводних коралів. Зменшення рН води може впливати на кальцифікацію, процес, важливий для коралів
- Забруднення та викиди: Викиди забруднюючих речовин у море можуть негативно впливати на стан коралів, зокрема на якість води та доступність харчових ресурсів

3. Біологічні фактори:

- Конкуренція з іншими видами: Конкуренція за ресурси з іншими видами, такими як губки або інші організми, може впливати на стан холодноводних коралів
- Хижаки і паразити: Присутність хижаків та паразитів може зменшити виживання коралів та впливати на їхній ріст

4. Антропогенні фактори:

- Лов та знищення: Антропогенний вплив, такий як лов та знищення коралів, може бути серйозною загрозою для стабільності коралових рифів.
- Туризм та рекреація: Збільшена активність туризму може призвести до пошкодження коралових рифів та порушення їхньої стабільності.
- Зміни використання землі: Забруднення та зміни використання землі на узбережжі можуть мати вплив на якість води та доставку забруднюючих речовин до моря.

Визначення та розуміння цих факторів є важливим завданням для збереження і ефективного управління екосистемами холодноводних коралів. Дослідження цих факторів допомагає розробити стратегії збереження та відновлення цих унікальних морських екосистем у змінюючому середовищі.

3 АНАЛІЗ ВПЛИВУ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА ЕКОСИСТЕМИ ХОЛОДНОВОДНИХ КОРАЛІВ

Промисловий розвиток призвів до зростання концентрацій вуглекислого газу в атмосфері, які, як очікується, перевищать 500 частин на мільйон (ppm) до 2050-2100 років; це сприяє океанському закисненню та глобальному потеплінню. Дослідження льодовика Восток у східній Антарктиді Сігенталером та колегами (2005) показали, що протягом останніх 650 000 років сьогоднішні CO₂ у атмосфері досягли найвищих значень. Сьогодні температура води вища (+0,7°C), а концентрації карбон-іонів (~210 μmol kg⁻¹) та рН (-0,1 одиниць) нижчі ніж протягом останніх 420 000 років, що спричинено вражаючою величиною сьогоднішніх CO₂. Прогнозується, що майбутні значення рН знизяться ще на 0,2 – 0,4 одиниці на поверхні води до кінця століття, що, ймовірно, не було задокументовано за останні 20 мільйонів років.

Близько 25% антропогенного CO₂ поглинається океаном, утворюючи вугільну кислоту у реакції з водою.

Вугільна кислота (H₂CO₃) дисоціюється на бікарбонат (HCO₃⁻) та протони (H⁺), при цьому протони реагують з карбонат-іонами (CO₃²⁻), утворюючи більше бікарбонатних іонів і таким чином знижуючи доступність карбонату для формування кальцієвого карбонату (CaCO₃). Арагоніт (ортогональна кристалічна форма CaCO₃) є основним елементом, з якого формуються коралові скелети.

Стан насичення арагонітом (ΩAr), нижчий за 0.1, вказує на недостатнє насичення, що є небажаним для організмів для побудови своїх скелетів. Останнє називається "кальцифікацією". Значення понад 1.0

вказують на надмірне насичення, що є сприятливим для організмів, які кальцифікуються. З підвищенням океанського закислення горизонт насичення арагонітом (межа між надмірним та недостатнім насиченням арагоніту) піднімається у більш мілководні води, оскільки CO₂ легше розчиняється при холодних температурах та під вищим тиском. Таким чином, глибші води стають неблагоприємними середовищами, наприклад, для процвітання холодноводних коралів, оскільки вони майже не отримують арагоніту для формування своїх. Тобто, є зв'язок між глобальним розподілом холодноводних коралів та горизонтом насиченості арагоніту (Aragonite Saturation Horizon-ASH). У Північній Атлантиці горизонт насиченості арагоніту (ASH) достатньо глибокий, і рифи великі; у порівнянні, в Тихому океані ASH є менш глибоким, і рифи розкидані.

Це показано на нижченаведеній карті. Бірюзове затінення вказує, де ASH зазвичай знаходиться на відносно великих глибинах (1,500-2,000 метрів), тоді як темно-синє позначає місця, де ASH зустрічається на відносно невеликих глибинах.

На карті круги, ромби та квадрати представляють місця розташування холодноводних коралових рифів, при цьому біле позначає рифи, які знаходяться на відносно невеликій глибині, а чорне показує рифи, що знаходяться на глибинах нижче 1,000 метрів.

Оскільки хімія океану є дуже складною через кілька взаємодіючих океанографічних процесів, стає важко оцінити, чи океанське закислення є основним фактором зміни навколишнього середовища та передбачуваного зниження чисельності видів. Океанське закислення супроводжується збільшенням температури океанської води, викликаною CO₂, при цьому підвищення температури морської води, здається, компенсує зниження кальцифікації від Ω_{Ar} . Розрахунки моделей [2] прогнозують мінімальні впливи на Ω_{Ar} для комбінованого сценарію океанського закислення та глобального потепління. Тепліші води біля екватора, де знаходяться тропічні

коралові рифи, призводять до зниження розчинності розчиненого CO_2 , тим самим збільшуючи Ω_{Ar} та посилюючи випадання CaCO_3 для формування коралових скелетів.

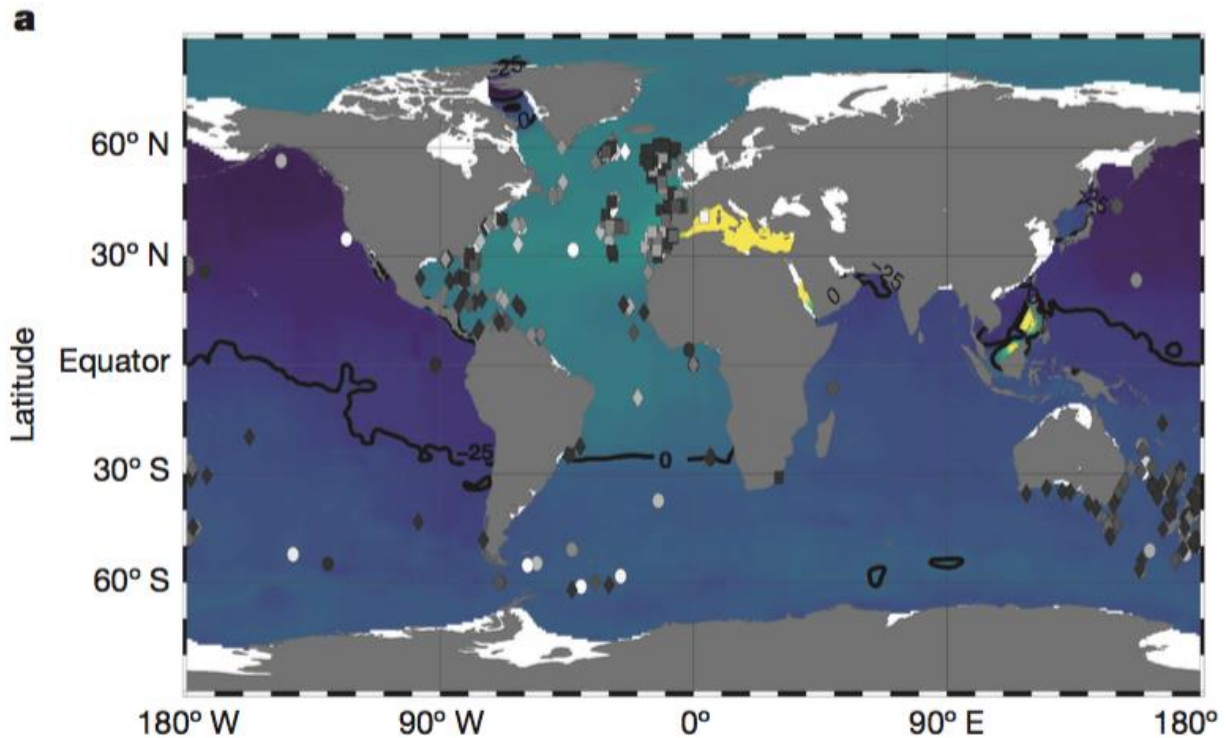


Рис. 5 Глобальна насиченість арагоніту та розподіл холодноводних коралів. Бірюзовий колір вказує на відносно глибокий кордон насиченості, тоді як темно-синій показує відносно мілкий кордон насиченості. Круги, ромби та квадрати представляють місця розташування холодноводних коралових рифів, при цьому білий колір показує рифи, що живуть на відносно неглибоких глибинах, а чорний - рифи, що живуть на глибинах нижче 1,000 м. [10]

Океанське закислення не тільки призводить до зниження розчиненого CaCO_3 у воді, але й веде до зменшення карбонатних цементів у скелетах коралів. Кілька польових та лабораторних досліджень [1] довели, що закислена морська вода, яка має низький Ω_{Ar} , знижує кальцифікацію та ріст коралів. Крім того, було показано позитивну кореляцію між кальцифікацією та Ω_{Ar} . Якщо Ω_{Ar} падає нижче 1.0 через контроль неорганічної хімії

(збільшення розчиненого CO_2), буде помітне розчинення CaCO_3 , вбудованого у скелети коралів. Значно, розчинення скелетів коралів при $\Omega_{\text{Ar}} \geq 1.0$ було задокументовано. Оскільки майбутні концентрації CO_2 , як прогнозується, зростатимуть, тим самим зменшуючи Ω_{Ar} у водах, очікується зниження коралових рифів.

Натомість HCO_3^- значно впливає на швидкості кальцифікації, а не рН, а отже й насичення арагонітом. Основною причиною чутливості коралів до океанського закислення все ще є предмет дискусії. Це може бути через знижену концентрацію іонів CO_3^{2-} разом зі збільшеною концентрацією іонів HCO_3^- або зниження (Ω_{Ar}). Наявні докази вказують на те, що на глобальному рівні рифи зазнають великих змін у відповідь на зміну клімату, а не зникнуть. Проте швидкість змін в хімії океану через вищу $[\text{CO}_2]_{\text{атм}}$ може спричинити нестабільність скелетів коралів і, отже, обмежити їхню здатність до регенерації (наприклад, після ураганних подій). Знижена здатність коралів рости та конкурувати може призвести до альтернативного стану, тобто з домінування коралів до домінування водоростей, виявляючи очевидні наслідки для екосистеми.

4 ОПИС МОЖЛИВОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ РИЗИКУ РУЙНУВАННЯ ХОЛОДНОВОДНИХ КОРАЛОВИХ РИФІВ.

Створення моделі лінійної регресії для прогнозування ризику руйнування холодноводних коралів на основі даних про рН води та температуру океанської води можна реалізувати в декілька етапів. Однак, варто пам'ятати, що лінійна регресія є досить простою моделлю і може не враховувати всі складнощі і нелінійні залежності в екологічних даних. Нижче представлений базовий підхід:

1. Визначення змінних

- **Залежна змінна (Y):** Індикатор ризику руйнування холодноводних коралів (наприклад, міра здоров'я коралів або показник руйнування рифів).
- **Незалежні змінні (X1, X2,...):** рН води, температура океанської води, та можливо інші екологічні показники.

2. Збір та підготовка даних (історичні та сучасні дані по рН води, зміни температури, кількісні дані площі рифів у районі, видове різноманіття)

3. Формулювання моделі лінійної регресії

Модель може мати вигляд: $Y = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \varepsilon$, (1) де:

Y - ризик руйнування холодноводних коралів,

X1 - рН води,

X2 - температура океанської води,

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ - коефіцієнти регресії, які потрібно визначити,

ε - випадкова похибка.

Подальший розвиток та удосконалення моделі дадуть змогу використовувати її, як частину більш глобальної системи для оцінки стану екосистем конкретно взятого регіону або усього океану та генерації стратегій зі збереження та використання ресурсів. Треба зазначити, що для розробки такої глобальної моделі потрібно провести наступне:

- уточнити розподіл океану на екорегіони та деталізувати параметри екосистем, які є у регіонах;
- вдосконалити розуміння впливу та залежності екосистем;
- підібрати ресурсну базу, яка могла б вирішити питання обробки великих масивів даних з урахуванням їх фізичного, хімічного, біологічного, геологічного походження.

Створення моделі лінійної регресії для прогнозування ризику руйнування холодноводних коралових рифів на основі даних про рН води та температуру океанської води є першим кроком у розробці інструменту для моніторингу та управління цією важливою морською екосистемою. Однак слід враховувати, що лінійна регресія, хоч і є простою моделлю, може не враховувати всі складнощі та нелінійні залежності в екологічних даних.

Для подальшого розвитку та удосконалення моделі необхідно враховувати ряд аспектів. Перше, потрібно уточнити розподіл океану на екорегіони та деталізувати параметри екосистем у різних регіонах. Далі, важливо вдосконалити розуміння впливу та залежностей між екосистемами, щоб точніше передбачати їхню реакцію на зміни у рН води та температурі океанської води. Для реалізації такого амбіційного завдання, потрібно враховувати великі обсяги даних різного походження. Розробка відповідної ресурсної бази, яка зможе обробляти та аналізувати ці дані, є важливою складовою процесу.

Отже, модель лінійної регресії для прогнозування руйнування холодноводних коралових рифів є лише першим кроком у розвитку більш

складних та глобальних систем для оцінки та збереження цих унікальних екосистем океану.

5 ШЛЯХИ ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕКОСИСТЕМ ХОЛОДНОВОДНИХ КОРАЛІВ

Щоб ініціювати або прискорити відновлення, надзвичайно бажано активно покращувати природне відновлення за допомогою дій з екологічного відновлення. Екологічне відновлення - це спроба повернути пошкоджену систему до екологічного стану, який знаходиться в межах певних прийнятних лімітів порівняно з менш порушеною системою, щоб відновити природний спектр структури та динаміки екосистем. Сьогодні практика екологічного відновлення отримує величезну увагу, оскільки вона пропонує надію на відновлення від значної частини екологічних пошкоджень, завданих неправильним використанням або неправильним управлінням природними ресурсами. Наразі у світі виконується лише кілька активних дій з відновлення, всі вони знаходяться в північній півкулі (13 наукових публікацій для 7 випадкових досліджень у 6 різних країнах): риф Секен в Швеції, гряда Сур в Каліфорнії, холодноводні коралові рифи в Мексиканській затоці та на південному сході Флориди, а також коралові сади в Західному Середземномор'ї та на Азорських островах. Навчаючись на досвіді відновлення мілководних коралів, найчастіше використовувані техніки для активного відновлення холодноводних коралів - це техніки трансплантації (52%) та використання штучних конструкцій (44%). Дослідження трансплантації були зосереджені на випробуванні методів прикріплення фрагментів коралів до природних або штучних субстратів.

Дослідження зі штучними конструкціями включали розгортання або демонтаж штучних конструкцій, таких як застарілі морські нафтогазові споруди та збірники, для рекрутменту личинок холодноводних коралів.

Мінеральна агрегація через електроліз (Biorock™), інша техніка відновлення, яка була спочатку розроблена для відновлення мілководних коралових рифів, була випробувана в лабораторних умовах з обнадійливими результатами як підходящий метод для коралів. Трансплантація фрагментів Перші спроби активного відновлення холодноводних коралів з'явилися на початку 21-го століття, орієнтовані на види, які формують холодноводні коралові рифи, *Oculina varicosa* та *L. pertusa*. Ці дії базувалися на трансплантації фрагментів коралів зі здорового донорського рифу на деградований, використовуючи ROV. Через труднощі, пов'язані з маніпуляціями з фрагментами коралів за допомогою ROV на місці, трансплантати прикріплювалися до штучних конструкцій (бетонних модулів або стійок) і потім встановлювалися на глибині 70-100 м у пошкоджених районах. Після більш ніж 2 років трансплантовані фрагменти коралів показали високе виживання (> 76%) і ріст, з повторним відновленням асоційованої фауни, але мало доказів нового поселення личинок або рекрутменту коралів. Трансплантація фрагментів коралів може бути не легко застосована до всіх видів холодноводних коралів. Обробка, збір, транспортування та підтримка деяких холодноводних коралів у акваріумних умовах перед поверненням їх у природне середовище може бути проблемою. Стрес, який переживають корали під час збору, такі як температурні зміни, і складність відтворення їх природного середовища в лабораторії, може поставити під загрозу виживання коралів в акваріумах. Штучні конструкції Слід зазначити, що потенційне використання демонтованих конструкцій як штучних конструкцій для спонукання формування холодноводних коралових рифів все ще є предметом суперечок. Існують сценарії, коли несподіване переколонізування штучних конструкцій може допомогти відновити екосистеми швидше, ніж це відбувалося б через природні події переколонізації, але водночас слід враховувати ряд факторів, включаючи здоров'я і безпеку, готовність технологій, соціальні фактори та поширення інвазивних видів.

У загальному, активне відновлення холодноводних коралових рифів є складним і багатоаспектним завданням, яке вимагає подальших досліджень та розвитку технологій. Важливо зберігати ці унікальні екосистеми та зробити все можливе для їхнього відновлення та збереження у майбутньому.

Мінеральна агрегація через електроліз

Мінеральне накопичення через техніку електролізу в останні роки стало активно вивченим та важливим методом для відновлення мілководних тропічних коралових рифів. Цей метод використовується з метою підвищення зростання трансплантованих коралів та сприяє формуванню структурних елементів коралових рифів.

Під час активної фази мінерального накопичення, коли катод отримує слабкий струм, відбувається накопичення арагоніту. Важливою особливістю цього процесу є те, що коралові трансплантати, які піддаються впливу мінеральної агрегації через електроліз, частіше утворюють бруньки та розгалужуються. Накопичений матеріал має той самий склад мінералів, що і сам кораловий скелет, що представляє собою карбонат кальцію у формі арагоніту.

Дослідження, проведені на холодноводних коралах *L. pertusa*, показали, що мінеральне накопичення через електроліз значно покращує ріст та розвиток цих коралів. Внаслідок цього процесу, спостерігається збільшення частоти утворення поліпів і темпів зростання коралів. Це свідчить про потенційну ефективність методу мінеральної агрегації через електроліз у відновленні холодноводних коралових рифів.

Однак, важливо зазначити, що оптимальний рівень густини струму під час електролізу значно нижчий, ніж рівні, що використовувалися у попередніх дослідженнях з мілководними видами коралів. Це підкреслює необхідність детального дослідження та визначення оптимальних параметрів,

таких як інтенсивність струму, для кожного виду коралів окремо. Залежно від умов місця росту і характеристик коралів, цей підхід може виявитися більш ефективним і допомогти відновити холодноводні корали, що внаслідок вимог до екологічних параметрів стають більш вразливими до змін у водних середовищах.

Мінеральна агрегація через електроліз є перспективним методом для відновлення холодноводних коралових рифів та підвищення їхнього росту і розвитку. Цей метод може бути використаний для активного відновлення морських екосистем, але вимагає подальших досліджень та оптимізації параметрів для кожного конкретного виду коралів та місця їхнього росту. Для досягнення успіху в відновленні холодноводних коралових рифів, необхідно продовжувати дослідження та розвиток цього методу.

ВИСНОВКИ

Дослідження підтверджує значний вплив кліматичних змін на екосистеми холодноводних коралів. Океанське закислення, викликане зростанням рівнів CO₂ в атмосфері, призводить до зниження насичення арагоніту, що ускладнює формування скелетів коралів. Підвищення температури океану також негативно впливає на ці екосистеми, знижуючи їхню стійкість та здатність відновлюватися після зовнішніх втручань.

Зниження біорізноманіття. Через негативний вплив зміни клімату спостерігається зниження біорізноманіття в екосистемах холодноводних коралів. Це стосується як самих коралів, так і асоційованих з ними видів, включаючи численні види риб, безхребетних та інших морських організмів.

Економічні наслідки. Екосистеми холодноводних коралів є важливими для рибальства та морської біорізноманітності, тому їх зниження може мати значні економічні наслідки. Зниження кількості та якості рибних запасів може вплинути на рибальство, що залежить від цих екосистем.

Необхідність дій щодо охорони та відновлення. Є нагальна потреба у розробці та впровадженні заходів щодо охорони та відновлення екосистем холодноводних коралів. Це включає створення морських заповідників, обмеження впливу рибальства та інших антропогенних втручань.

Розробка та удосконалення методів відновлення екосистем холодноводних коралів є важливою задачею з кількох причин:

- холодноводні корали є домівкою для багатьох видів і їх відновлення допоможе зберегти різноманіття багатьох видів морських тварин, включаючи риб, молюсків та інших безхребетних
- холодноводні корали відіграють роль у стабілізації донних екосистем, забезпечуючи структуру та захист для багатьох морських організмів.

- коралові рифи відображають багатолітні зміни у морському середовищі, включаючи температуру, солоність та кислотність води; їх відновлення може допомогти вивчати історію та наслідки кліматичних змін.

- відновлення екосистем коралів може служити освітньою платформою для вивчення морської біології та екології, а також для підвищення обізнаності про важливість охорони морського середовища.

З огляду на ці аспекти, розробка і удосконалення методів відновлення холодноводних коралів є ключовими для збереження глибоководних морських екосистем та підтримки їх стійкості у майбутньому.

Потреба у подальших дослідженнях. Для розуміння повного впливу кліматичних змін та розробки ефективних стратегій відновлення необхідні подальші дослідження. Це включає вивчення адаптаційних можливостей холодноводних коралів та розробку нових методів моніторингу та оцінки змін у глибоководних екосистемах.

Запропонована базова математична модель сприяє глибшому розумінню взаємодії між різними екологічними, кліматичними та антропогенними факторами, які впливають на холодноводні коралові рифи. Модель дозволить прогнозувати потенційні ризики та розробляти стратегії для мінімізації впливу антропогенних та природних змін на холодноводні коралові рифи. Також модель може бути адаптована або використана як основа для моделювання стану інших морських екосистем, забезпечуючи широкий спектр застосувань у морській екології та океанографії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. J. Murray Roberts (Author), Andrew Wheeler (Author), André Freiwald (Author), *Cold-Water Corals: The Biology and Geology of Deep-Sea Coral Habitats*, Cambridge University Press; Illustrated edition (May 25, 2009)
2. Portilho-Ramos, R. C., et al. (2022) Major environmental drivers determining life and death of cold-water corals through time. *PLOS Biology*. doi.org/10.1371/journal.pbio.3001628
3. A. Freiwald, J. H. Fosså, A. Grehan, T. Koslow, J. M. Roberts, *Cold-Water Coral Reefs (United Nations Environment Programme–World Conservation Monitoring Centre, Cambridge, 2004)*.
4. J. M. Roberts, C. J. Brown, D. Long, C. R. Bates, *Coral Reefs*, (2005).
5. Braga-Henriques, A., Porteiro, F. M., Ribeiro, P. A., de Matos, V., Sampaio, Í., Ocaña, O., and Santos, R. S.: Diversity, distribution and spatial structure of the cold-water coral fauna of the Azores (NE Atlantic), *Biogeosciences*, 10, 4009–4036, <https://doi.org/10.5194/bg-10-4009-2013>, 2013.
6. E. L. Jackson. "Future-proofing marine protected area networks for cold water coral reefs". oxfordjournals.org. Archived from the original
7. Hovland, Martin (2008). *Deep-water coral reefs: Unique Biodiversity hotspots*. Chichester, UK: Praxis Publishing (Springer). pp. 278. ISBN 9781402084614.
8. Kurman, M. D., Gomez, C. E., Georgian, S. E., Lunden, J. J., and Cordes, E. E. (2017). Intra-specific variation reveals potential for adaptation to ocean acidification in a cold-water coral from the Gulf of Mexico. *Front. Mar. Sci.* 4:111. doi: 10.3389/fmars.2017.00111

9. Ecological characterisation of a Mediterranean cold-water coral reef: Cabliers Coral Mound Province (Alboran Sea, western Mediterranean) / Progress in Oceanography Volume 175, July–August 2019, Pages 245-262 / URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0079661118303677>
10. CarbonBrief clear on climate/ Acidification could leave oceans ‘uninhabitable’ for cold-water corals/12.02.2018 / URL: <https://www.carbonbrief.org/acidification-could-leave-oceans-uninhabitable-cold-water-corals/>
11. Cold-water corals in a changing ocean / Current Opinion in Environmental Sustainability, Volume 7, April 2014, Pages 118-126 / URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1877343514000050>
12. DEEP SEARCH: Deep Sea Exploration To Advance Research On Coral/Canyon/ Cold-Seeep Habitats / URL: <https://dsbsoc.org/indeep/deep-search-deep-sea-exploration-to-advance-research-on-coralcanyon-cold-seep-habitats/>