

Географія

УДК 574.5(261)(26.07):[57.045:551.583(292.2)](045)

DOI <https://doi.org/10.32782/NSER/2025-1.19>

КЛІМАТИЧНІ ЗМІНИ В АРКТИЦІ: ВПЛИВ НА ОКЕАНІЧНІ ТЕЧІЇ ТА ЕКОСИСТЕМИ АТЛАНТИЧНОГО ОКЕАНУ

Безлатня Любов Олександрівна

кандидат географічних наук, доцент,

доцент кафедри географії, геодезії та землеустрою

Уманського державного педагогічного університету імені Павла Тичини

ORCID ID: 0000-0002-6567-0983

Ситник Олексій Іванович

кандидат географічних наук, доцент,

доцент кафедри географії, геодезії та землеустрою

Уманського державного педагогічного університету імені Павла Тичини

ORCID ID: 0000-0002-8120-7032

У статті здійснено аналіз впливу кліматичних змін в Арктиці на океанічні течії, зокрема на Атлантичну меридіональну циркуляцію (АМОС), а також досліджено екологічні наслідки цих змін для Атлантичного океану. З'ясовано, що підвищення температури в Арктиці, яке супроводжується значним скороченням площі та товщини морського льоду, призводить до збільшення обсягів прісноводного стоку, що своєю чергою змінює структуру океанічної циркуляції. Оцінено, як накопичення прісної води впливає на ослаблення циркуляційних процесів, що має прямий ефект на кліматичну стабільність у регіонах Західної Європи та Північної Америки. Детально розглянуто процеси бореалізації, які проявляються у зміщенні ареалів північних помірних видів у бік Арктики, що спричиняє значні зміни в трофічних ланцюгах і функціонуванні морських екосистем. Доведено, що ці зміни пов'язані зі зменшенням солоності та підвищенням температури поверхневих вод, які залежать від інтенсивності танення льодовикового покриву в Арктиці. Особливий акцент зроблено на вивченні зв'язків між ослабленням Атлантичної меридіональної циркуляції та впливом цих процесів на зміну біогеографічних ареалів морських видів у Північній Атлантиці. Запропоновано інтегрований підхід до моделювання впливу кліматичних змін, який враховує не лише океанографічні процеси, але й екологічні аспекти, що дозволяє створити комплексне уявлення про динаміку змін. Сформовані наукові позиції щодо адаптації атлантичної екосистеми до кліматичних змін, до яких віднесено регулярність проведення моніторингу стану арктичних екосистем, подальший розвиток кліматичних моделей щодо прогнозування довгострокових наслідків від змін. Обґрунтовано доцільність нових досліджень, щодо розширення горизонтів оцінки впливу поточних кліматичних змін на обсяги, напрямки транспортування і руху океанічних вод Арктики.

Ключові слова: кліматичні зміни, Арктика, океанічні течії, атлантична меридіональна циркуляція (АМОС), екосистеми, бореалізація.

Bezlatnia L. O., Sytnyk O. I. Climate change in the Arctic: impact on ocean currents and ecosystems of the Atlantic Ocean

The article analyzes the impact of climate change in the Arctic on ocean currents, in particular on the Atlantic Meridional Circulation (AMOC), and also studies the ecological consequences of these changes for the Atlantic Ocean. It is found that the increase in temperature in the Arctic, which is accompanied by a significant reduction in the area and thickness of sea ice, leads to an increase in the volume of freshwater runoff, which in turn changes the structure of ocean circulation. It is assessed how the accumulation of freshwater affects the weakening of circulation processes, which has a direct effect on climatic stability in the regions of Western Europe and North America. The processes of borealization, which are manifested in the shift of the ranges of northern temperate species towards the Arctic, which causes significant changes in trophic chains and the functioning of marine ecosystems, are considered in detail. It is proven that these changes are associated with a decrease in salinity and an increase in surface water temperature, which

depend on the intensity of ice sheet melting in the Arctic. Special emphasis is placed on studying the connections between the weakening of the Atlantic meridional circulation and the impact of these processes on changes in the biogeographical ranges of marine species in the North Atlantic. An integrated approach to modeling the impact of climate change is proposed, which takes into account not only oceanographic processes, but also ecological aspects, which allows creating a more comprehensive picture of the dynamics of change. Scientific positions on the adaptation of the Atlantic ecosystem to climate change have been formed, which include regular monitoring of the state of Arctic ecosystems, further development of climate models to predict long-term consequences of changes. The feasibility of new research to expand the horizons of assessing the impact of current climate change on the volumes, directions of transportation and movement of Arctic ocean waters has been substantiated.

Key words: climate change, Arctic, ocean currents, Atlantic Meridional Circulation (AMOC), ecosystems, borealization.

Постановка проблеми. Арктика виділяється серед географічних регіонів світу, тим що вона найбільш чутливо реагує на глобальні кліматичні зміни, і ці реакції проявляються у таких процесах як: швидке танення льодовиків, підвищення температури, зміни хімічного складу морської води. Такі процеси впливають не лише на локальні екосистеми, але й на глобальну кліматичну систему, спричиняючи значні порушення, наявними стають зміни в динаміці океанічних течій, таких як Гольфстрім, які відіграють важливу роль у підтриманні кліматичної стабільності. Поточні зміни вже спричинили значний вплив на екосистеми Арктики, що виражається у міграції морських видів, деградації біорізноманіття, а також у відчутних збитках у промислових галузях. Основна проблема полягає у недостатньому розумінні довгострокових наслідків цих змін і відсутності ефективних стратегій адаптації та пом'якшення їх впливу.

Кліматичні зміни, що відбуваються в Арктиці, несуть глобальний масштаб і їхній вплив виходить далеко за межі полярного регіону. Океанічні течії є критичними елементами регулювання температурних режимів, транспортування поживних речовин і підтримання екологічного балансу в океанах. Зміни у їхній динаміці створюють загрозу для продовольчої безпеки, стабільності економіки прибережних регіонів і збереження морських екосистем. У цьому контексті вивчення впливу кліматичних змін на океанічні процеси та екосистеми стає актуальним для розробки адаптивних стратегій, спрямованих на збереження екосистем і пом'якшення негативних наслідків для людства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кліматичні зміни в Арктиці є об'єктом численних досліджень через їхній масштабний вплив на глобальну кліматичну систему та океанічні процеси. Ч. Грін та інші зазначають, що Арктика нагрівається у два-три рази швидше за інші регіони світу, що вже спричинило суттєве танення морського льоду та льодовиків, а також зростання прісноводного стоку в океани [5]. Танення льоду не лише змінює структуру поверхневих вод, але й впливає на Атлантичну меридіональну циркуля-

цію (AMOC), що є ключовим механізмом перенесення тепла між тропічними та полярними широтами [7].

Наукові дослідження Дж. Деб та С. Бейлі підтверджують, що скорочення площі морського льоду прискорює процеси бореалізації, коли північні помірні види замінюють місцеві арктичні види, змінюючи біогеографічні ареали морської фауни [3]. Водночас зменшення товщини льоду та зміна динаміки прісної води впливають на екосистеми Атлантичного океану, спричиняючи зміни у функціонуванні трофічних ланцюгів [4]. Згідно з дослідженнями А. Парлоу [14], збільшення експорту прісної води з Арктики в Атлантичний океан суттєво впливає на солоність води, що, своєю чергою, впливає на циркуляцію течій, змінюючи глобальний клімат. Ці процеси також корелюють із частішими екстремальними погодними явищами в північних регіонах, які описані у роботі Дж. Е. Волш та інших [21]. Крім того, К. Фрейзер [3] підкреслює, що зменшення морського льоду впливає на теплові потоки, які взаємодіють з атмосферними процесами, посилюючи зміни клімату, що надалі загострюватиме кризу біорізноманіття в регіоні. Ми констатуємо, що набір сучасних досліджень має компоненту оцінки впливу кліматичних змін на Арктичні території, і спрямовує на подальші поглиблені пошуки складних взаємодій між океанічними течіями та наявними екосистемами.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. У статті висвітлено нерозв'язані раніше аспекти ширшої проблеми, зокрема, серйозні виклики, які виникають у результаті кліматичних змін в Арктиці. Хоча було досягнуто значного прогресу в дослідженні змін у цьому регіоні, усе ж існує низка питань, які потребують глибшого аналізу. Особливо актуальним є вплив танення арктичних льодовиків на глобальні океанічні течії, включаючи Атлантичну меридіональну циркуляцію (AMOC), який має важливі наслідки для клімату Європи та Північної Америки. Також мало досліджені екологічні реакції на зміни в ареалах морських видів, включаючи

процеси бореалізації. Недостатність комплексних моделей, які враховують взаємодії між прісно-водними потоками, океанічними течіями та морською біотою, ускладнює прогнозування тривалих наслідків змін.

Мета статті – дослідження впливу кліматичних змін в Арктиці на океанічні течії, а також оцінка наслідків цих змін для екосистем Атлантичного океану.

Виклад основного матеріалу. Загострення кліматичних змін у регіоні Арктики спричиняє значні перебої у роботі глобальної океанічної системи, основу якої становить термохалінна циркуляція, відома також як "глобальний океанічний конвеєр". Згадана система відповідає за перенесення теплих і холодних водних мас між тропіками та полярними областями, що є критично важливим для підтримки кліматичної рівноваги на планеті. Проте, інтенсивне танення арктичних льодовиків через глобальне потепління призводить до порушень у цій циркуляційній системі. Зокрема, збільшення кількості прісної води, що потрапляє у Північну Атлантику, спричиняє зниження солоності океанських вод, що загрожує стабільності термохалінної циркуляції (табл. 1). Такі зміни можуть мати серйозні наслідки для регіонального та глобального клімату [4].

Один з виразних наслідків глобальних кліматичних змін – це ослаблення Гольфстріму, який

є потужною теплою течією, критично важливою для підтримки м'якого клімату в Європі та стабільності погодних умов на східному узбережжі Північної Америки. Гольфстрім переносить теплі води з Карибського моря до Північної Атлантики, де вони охолоджуються та спускаються в глибини океану, сприяючи циркуляції океанських вод. Однак, збільшення обсягу прісної води ускладнює цей процес, знижуючи його ефективність.

Науковці Б. Рудельс та Е. Кармак визначили, що колова течія, відома як колообіг Бофорта, реагує на накопичення значних обсягів холодної прісної води, що може радикально змінити течії в Атлантичному океані, потенційно призводячи до охолодження клімату Західної Європи [16]. Такого роду вплив може мати критичне значення для збереження екологічної рівноваги в полярних водах, адже ця течія зосереджує прісну воду біля поверхні океану.

Колообіг Бофорта обертається за годинниковою стрілкою під дією вітру навколо західної частини Північного Льодовитого океану, охоплюючи акваторії, розташовані на північ від Канади та Аляски. Він природним чином збирає прісну воду, яка утворюється внаслідок танення льодовиків, річкового стоку та опадів. Прісна вода має важливе значення для Арктики, оскільки вона утворює шар над більш теплою і солоною водою, захищаючи морський лід від швидкого танення.

Таблиця 1

**Кліматичні зміни в Арктиці та їхній вплив на океанічні течії й екосистеми
Атлантичного океану (сформовано авторами на основі [1, 3, 11])**

Показник	Значення	Період активних змін	Ступінь впливу на екологічний стан Арктики	Результати змін
Підвищення температури в Арктиці	+3 °C	1971–2019	Високий	Середнє підвищення температури в Арктиці за вказаний період
Зменшення площі морського льоду в Арктиці влітку	-13% за десятиліття	1979–2018	Високий	Середнє зменшення площі морського льоду влітку
Ослаблення Атлантичної меридіональної циркуляції (АМОС)	-15%	1950–2010	Середній	Зменшення інтенсивності АМОС, що впливає на клімат Атлантики
Підвищення рівня моря в Північній Атлантиці	+0,2 м	1900–2018	Середній	Середнє підвищення рівня моря вздовж узбережжя Північної Атлантики
Зміна біогеографічного ареалу морських видів	Північне зміщення на 50–100 км	2000–2015	Середній	Середнє зміщення ареалу проживання морських видів на північ через потепління вод
Зростання частоти морських теплових хвиль	Подвоєння частоти	1982–2016	Високий	Збільшення частоти теплових аномалій у морських екосистемах
Зменшення товщини морського льоду в Арктиці	-65%	1975–2012	Високий	Значне зменшення середньої товщини морського льоду в Арктиці

Це, своєю чергою, допомагає регулювати глобальний клімат, утримуючи стабільність морського середовища. Однак із 1990-х років кількість накопиченої прісної води у колообігу значно зросла, досягнувши об'єму 8000 км³, що майже вдвічі перевищує об'єм озера Мічиган. За даними останніх досліджень, основною причиною цього є поступове зменшення площі літнього морського льодового покриву в Арктиці, яке спостерігається протягом останніх десятиліть [20]. Втрата морського льоду зробила колообіг більш вразливим до впливу вітру, який посилює обертання течії та затримує більшу кількість прісної води у своїх межах.

Потік прісної води з Північного Льодовитого океану до Північної Атлантики може змінити щільність поверхневих вод, що має критичне значення для функціонування глобальної океанічної циркуляції. Зазвичай арктична вода втрачає тепло та вологу в атмосферу, після чого опускається на дно океану, діючи як механізм, що забезпечує перенесення води з північної частини Атлантики до тропіків (рис. 1).

Цей процес відіграє ключову роль у підтриманні кліматичного балансу, але надмірне надходження прісної води може порушити цей механізм, призводячи до серйозних змін у глобальній кліматичній системі. Механізм взаємозв'язку між таненням льодовиків та змінами океанічних течій базується на взаємодії декількох фізичних процесів, які впливають один на одного. Насамперед танення льодовикового покриву Гренландії спричиняє викид величезних об'ємів прісної води, яка розбавляє солону воду океану, що знижує її гус-

тину. Це уповільнює процеси занурення холодної води в полярних регіонах і, відповідно, ослаблює "конвеєрну" циркуляцію. Як наслідок, в Європі можуть виникнути більш холодні зими, тоді як Північна Америка стикатиметься з екстремальними погодними явищами, включаючи потужні урагани й підвищення рівня моря.

У процесі дослідження кліматичних змін в Арктиці значна увага приділяється перигляціальним зонам у Сибіру та Канаді, а також особливостям підводної вічної мерзлоти моря Лаптевих, яка є залишком багаторічної мерзлоти наземних районів, затоплених унаслідок підвищення рівня моря в період голоцену. Ця вічна мерзлота протягом тисячоліть утримувала в собі великі запаси органічного вуглецю, але сучасне підвищення температури створює загрозу їхнього вивільнення, зокрема вуглекислого газу та метану, що є потужними парниковими газами [12, с. 79]. Процеси танення мерзлоти не лише сприяють цьому вивільненню, але й ставлять під загрозу глобальний баланс вуглецевого циклу (рис. 2).

Значну роль у перетворенні вивільненого метану на менш шкідливий діоксид вуглецю відіграють мікробіологічні процеси, які діють як своєрідний біологічний фільтр. Зміни в екосистемах прибережних районів і розподіл органічної речовини, яка вивільняється з танучої мерзлоти, впливають на хімічний склад океанічних вод і їхню здатність підтримувати біологічні процеси.

Одним із ключових чинників впливу Арктики на океанічну систему є протока Фрама, що розташована між Шпіцбергенем і Гренландією та є єдиним глибоководним проходом, який пов'язує

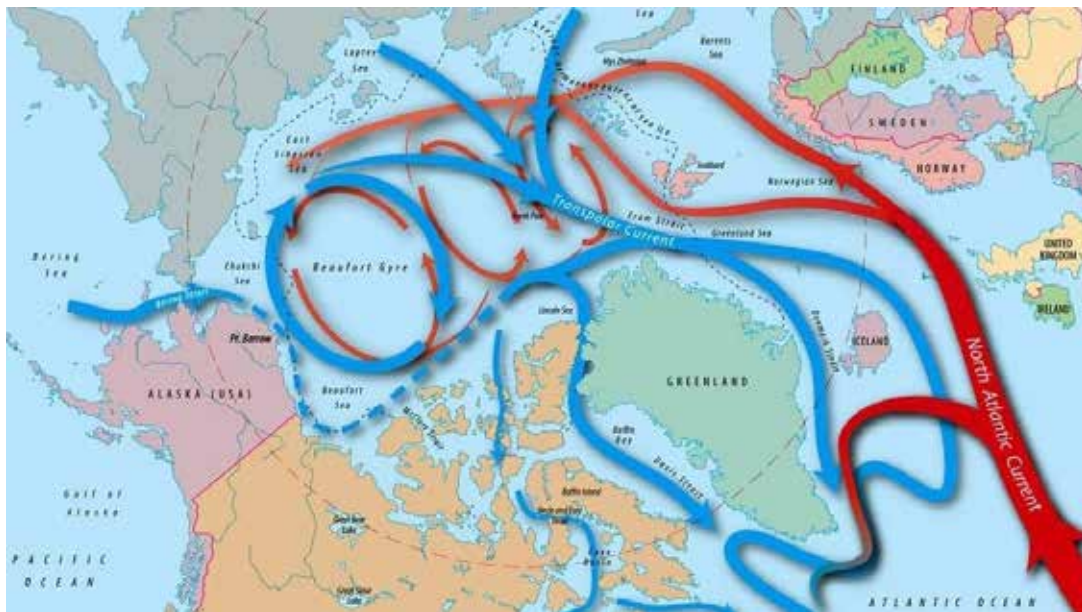


Рис. 1. Зміни циркуляції води в арктичній системі, включаючи різке зменшення морського льодового покриву та ослаблення системи циркуляції Бофорта [17]

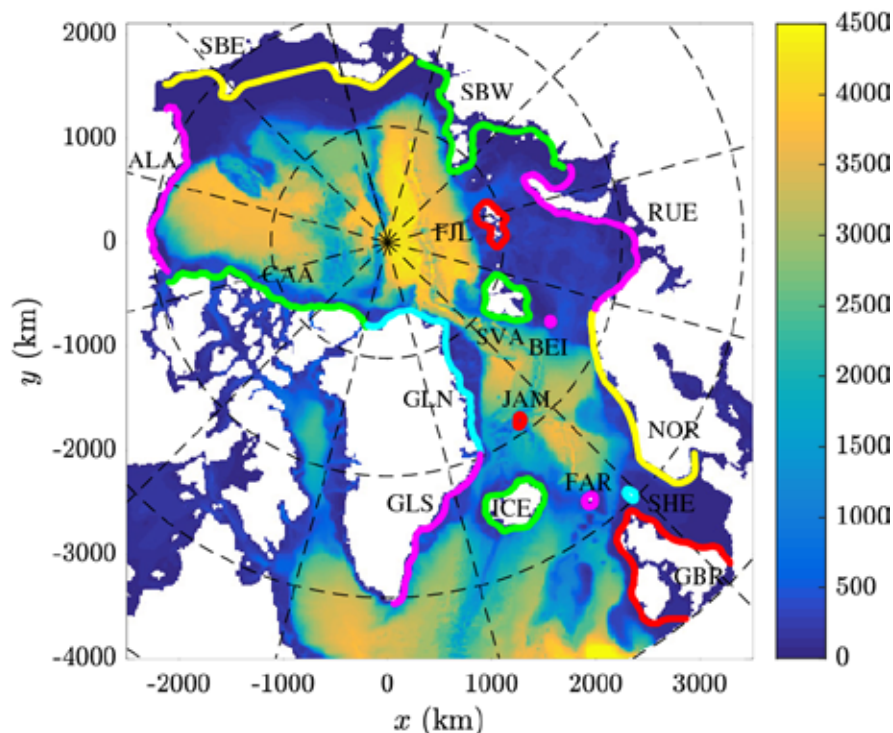


Рис. 2. Коливання товщини льодового покриву Арктики в результаті кліматичних змін [10]

Атлантичний і Північний Льодовитий океани. Ця протока є критично важливою для формування щільної глибинної води, яка підтримує термохалінну циркуляцію Світового океану і відіграє провідну роль у глобальному кліматичному балансі. Близько 80–90 % обміну водою між Атлантикою та Північним Льодовитим океаном відбувається через протоку Фрама, яка має ширину 460 км [9]. Теплі води з Атлантики, які протікають через східну частину протоки (так звана Західно-Шпіцбергенська течія), прямують у Північний Льодовитий океан. Водночас холодні арктичні води через західну частину протоки (Східно-Гренландська течія) повертаються назад до Атлантичного океану. Цей процес циркуляції водних мас відіграє важливу роль у розподілі тепла між полярними регіонами та тропіками, впливаючи на глобальний клімат та екосистеми Атлантичного океану.

Зміни у кількості льоду та температурі води в Арктиці суттєво порушують цей баланс, а також посилюють глобальне потепління та створюють додаткові виклики для збереження океанічних екосистем. На більшій частині території Арктики, за винятком Гренландії, спостерігається зростання кількості днів у році з позитивними температурами, що особливо помітно над морськими акваторіями цього регіону. У холодний період року такі дні часто супроводжуються відлигами, які можуть спричинити несприятливі метеорологічні та гідрологічні явища, такі як ожеледь, підтоплення та інші негативні наслідки для локаль-

них екосистем і людської діяльності. Найбільша частка аномалій за кількістю днів із температурами вище нуля ($t > 0^\circ\text{C}$) у період з жовтня по квітень спостерігається над Північною Атлантикою, Норвезьким, Баренцевим і Карським морями, а також над Скандинавією. При цьому в азійській частині Арктики, як на суходолі, так і в акваторіях, частка таких аномалій становить не менше 25–30% [7] (рис. 3).

Просторовий розподіл аномалій річних сум температур повітря ($t > 0^\circ\text{C}$, $t < 0^\circ\text{C}$, $t > 10^\circ\text{C}$) має найбільш виражений широтний характер у порівнянні з іншими кліматичними показниками. Аномалії температур є переважно позитивними, за винятком внутрішніх районів Гренландії, де їхні значення близькі до нуля. У напрямку до полюса величина цих аномалій поступово зменшується до 200 градусо-днів. Максимальні значення, що перевищують 1000 градусо-днів, спостерігаються в північно-західній частині Північної Атлантики, над Норвезьким і Баренцевим морями, а також у районі Чукотського моря та прилеглих територій [19].

Схожі регіональні особливості мають і аномалії мінімальної та максимальної середньої добової температури повітря. Усі ці показники демонструють позитивний знак аномалій у різних частинах Арктики. Найвищі значення мінімальної температури повітря спостерігаються у двох основних регіонах: Баренцевому і Карському морях, а також Чукотському морі та прилеглих до нього

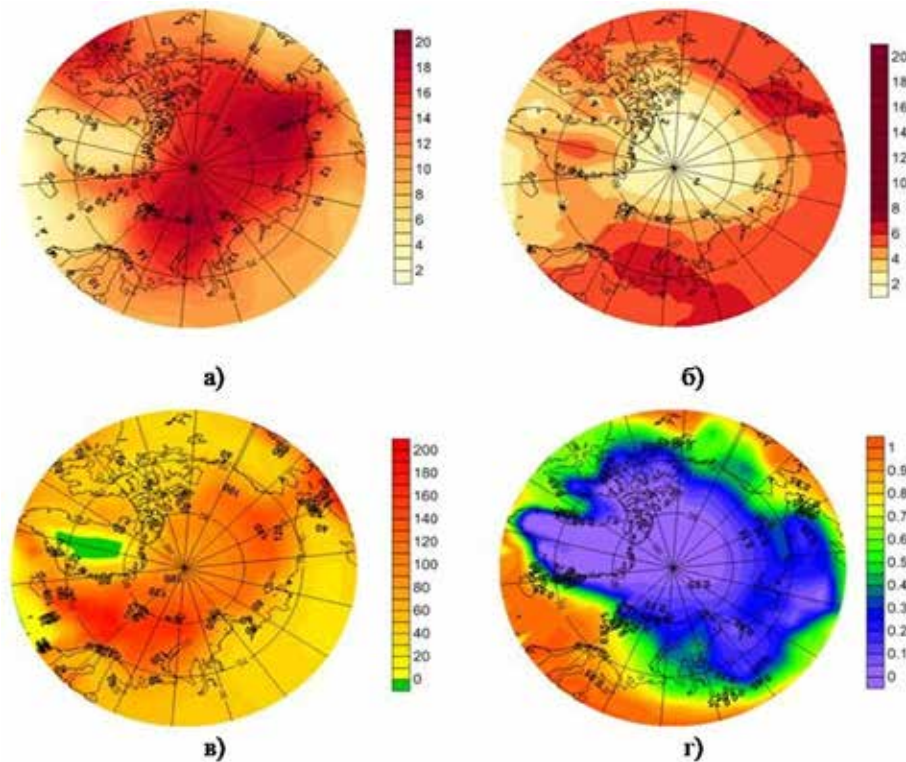


Рис. 3. Зміна термічних показників кліматичних ресурсів до кінця XXI ст. (2081–2100) в порівнянні з сучасним періодом (1990–2017 рр.): а) середня температура повітря, січень, °C; б) середня температура повітря, липень; в) число днів у році з $t > 0$ °C; г) відношення аномалії числа днів з $t > 0$ °C в період жовтень – квітень (включно) до аномалії числа таких днів за весь рік [13]

територіях, де зафіксоване зростання мінімальної середньодобової температури на 15–17 °C, а максимальної – на 7–8 °C. Найменші значення аномалій мінімальної температури відзначаються над Північною Атлантикою та Гренландією, а максимальні – в цих же районах, а також у зоні Північного полюса [8].

Зміни у температурних умовах Арктики мають безпосередній вплив на океанічні течії та екосистеми Атлантичного океану. Зокрема, зростання температур призводить до танення полярних льодовиків та зменшення солоності океанської води, що стає причиною порушень у процесах термохалінної циркуляції, коли наведені зміни несуть за собою глобальні кліматичні наслідки, впливаючи на всі океани світу [6].

Одним з помітних наслідків цих кліматичних змін є зміщення ареалів морських видів, що призводить до міграції риб і морських ссавців у пошуках більш сприятливих умов для життя. Так, тепліші води спонукають види, раніше притаманні помірним широтам, зміщуватися в напрямку до полюсів, де кліматичні умови краще відповідають їх фізіологічним потребам. Зокрема, види, важливі для рибальства, такі як тріска, скумбрія та оселедець, вже показують такі зміни у своїх аре-

алах, що викликає економічні складнощі для традиційних риболовецьких спільнот. Також морські ссавці, як кити та дельфіни, адаптують свої міграційні шляхи у відповідь на зміни в доступності їжі, що впливає на їх виживання і розмноження.

Прогнозування реакції біорізноманіття на кліматичні зміни та вплив цих змін на функціонування екосистем є важливими напрямками сучасних досліджень, але в контексті арктичної мегафауни ці аспекти поки що вивчені недостатньо. Аналіз наукових джерел засвідчив, що лише одне дослідження було присвячене оцінці впливу глобального потепління на біорізноманіття мегафауни Арктики [5]. У цьому дослідженні було зафіксовано позитивний вплив потепління на видове різноманіття риб у фіордах північної Норвегії, де збільшення температури води сприяло зростанню кількості тепловодних видів і, відповідно, підвищенню показників різноманітності. Інші дослідження вивчали видовий склад як індикатор багатства видів, що підтверджує процес бореалізації, коли бореальні (північно-помірні) види дедалі більше поширюються у водах Арктики, витісняючи місцеві арктичні види [11, 16]. Проте багатство видів охоплює лише одну з характеристик біорізноманіття, тому зміни у видовому

складі, хоч і важливі, не можуть повністю відобразити поточні трансформації в арктичній екосистемі.

Дослідження впливу кліматичних змін на функціонування арктичних морських екосистем також є недостатніми. Дж. Томсон і В. Е. Роджерс та інші провели моделювання, яке показало, що міграція атлантичних видів, таких як мойва, може сприяти стійкості екосистем морських фіордів за рахунок збереження структурної цілісності трофічного ланцюга. Інше дослідження, засноване на функціональній біогеографії риб, продемонструвало, що зміни в Баренцевому морі, зокрема поширення бореальних видів, мають вплив на функціонування екосистеми, оскільки великі бореальні види поступово витісняють менші арктичні, що впливає на рівень виробництва біомаси [18].

Подальші аналізи функціональної надлишковості та специфічних взаємодій між видами також підтвердили, що кліматичні зміни мають серйозний вплив на функціонування арктичних екосистем коли бореалізація призводить до заміщення видів і зміни взаємозв'язків у трофічних ланцюгах, що потенційно впливає на стійкість екосистем і біопродуктивність. Однак точні наслідки таких змін залишаються складними для прогнозування через недостатню кількість даних і складність процесів, що відбуваються. Ці дослідження підкреслюють, що кліматичні зміни продовжують трансформувати арктичні екосистеми, створюючи виклики для їхнього збереження та вимагаючи розширення наукових досліджень у цьому напрямку.

Зниження біорізноманіття в Атлантичному океані, яке веде до падіння продуктивності морських екосистем, становить значну проблему. Спад популяцій ключових морських організмів, включаючи планктон, риб та безхребетних, ініціює каскадні зміни, що вражають трофічні ланцюги і послаблюють здатність екосистем адаптуватися до зовнішніх викликів. Також погіршення умов у морському середовищі, зокрема зниження рівнів кисню в океанічних водах внаслідок їх нагрівання, сприяє формуванню так званих «мертвих зон», де умови стають непридатними для існування багатьох видів. Порядок подібних змін призводять до зменшення наданих океаном екосистемних послуг, таких як продовольча безпека, регулювання клімату та підтримка біорізноманіття.

Екологічні зміни, спричинені кліматичними трансформаціями в Арктиці, найімовірніше, спочатку проявляться в північно-східній Атлантиці, де зменшення перенесення тепла через ослаблення Гольфстріму почне врівноважувати наслідки глобального потепління. Передбачається, що ці зміни можуть суттєво обмежити виявлене останніми роками розширення біогеографічного ареалу суб-

тропічних і помірних видів на північ у цьому регіоні. Разом із тим, такі суттєві зміни в океанічній циркуляції неминуче спричинять різку реакцію екосистем північно-східної Атлантики, які вже демонстрували чутливість до подібних кліматичних зрушень у минулому [15, с. 291].

У північно-західній Атлантиці передбачити екологічні наслідки таких змін значно складніше. Очікується, що ослаблення Гольфстріму призведе до зменшення транспортування теплої, солоної атлантичної води в Північний Льодовитий океан через Баренцеве море та протоку Фрама. Однак наслідки цієї зміни для температури, солоності та циркуляції вод у Північному Льодовитому океані залишаються невідомими. Наразі неясно, як скорочення теплового потоку в Північний Льодовитий океан буде взаємодіяти з глобальним потеплінням і яким чином це вплине на кріосферу, включаючи льодовикові покриви? Якщо процес танення льоду в Арктиці продовжиться на поточному рівні, це, ймовірно, збереже високий рівень експорту прісної води з Північного Льодовитого океану в Північну Атлантику [22].

Масштаб, напрямок і інтенсивність експорту прісної води з Північного Льодовитого океану, а також маршрути її переміщення – чи то через Канадський архіпелаг, чи то через протоку Фрама – стануть вирішальними чинниками для визначення майбутніх біогеографічних та екосистемних реакцій у північно-західній Атлантиці і тоді вказані фактори визначатимуть, чи продовжуватимуться нинішні траєкторії змін у цьому регіоні, чи екосистеми почнуть розвиватися в абсолютно нових напрямках. Усе це підкреслює складність і багатогранність впливу кліматичних змін на океанічну динаміку та екосистеми Атлантичного океану.

Висновки. У ході дослідження визначено, що кліматичні зміни в Арктиці мають значний вплив на динаміку океанічних течій, особливо на АМОС, яка виконує важливу функцію в глобальній системі перенесення тепла. Встановлено, що підвищення температури в арктичному регіоні супроводжується суттєвим зменшенням площі та товщини морського льоду, що, своєю чергою, сприяє збільшенню обсягів прісноводного стоку коли зазначені процеси безпосередньо впливають на структуру та стійкість океанічних течій, зокрема на механізми теплообміну між тропічними та полярними широтами. Досліджено наслідки ослаблення АМОС для кліматичних умов Західної Європи та Північної Америки, зокрема можливість зниження температури в цих регіонах та порушення звичних кліматичних режимів. З'ясовано, що такі процеси суттєво змінюють екосистеми Атлантичного океану, провокуючи зміни в географічному поширенні морських видів і перебудову трофічних ланцюгів у відповідь на

бореалізацію, викликану підвищенням температури води та зменшенням її солоності.

Метод моделювання, що поєднує кліматичні зміни, океанографічні події та реакції екосистем – забезпечує можливість інтеграції кліматичних прогнозів з екологічними даними для точні-

шого визначення майбутніх змін. Запропоновано низку рекомендацій для адаптації морських екосистем до змін клімату, які включають постійний моніторинг арктичних вод та льодових мас, а також удосконалення існуючих моделей, що описують кліматичні та океанічні процеси.

Література:

1. Bosserelle C., Reddy S., Lal D. *WACOP wave climate reports*. Secretariat of the Pacific Community. 2015. URL: <https://wacop.gsd.spc.int/Atlas/Regional/Pdf/MA/Majuro.pdf> (дата звернення 08 грудня 2024).
2. Deb J. C., Bailey S. A. Arctic marine ecosystems face increasing climate stress. *Environmental Reviews*. 2023. 31(3). 403–451. <https://doi.org/10.1139/er-2022-0101>
3. Frazier K. A. *Arctic Climate Change and its Impact on Homeland Security*. 2024. URL: https://tedstevensarcticcenter.org/wp-content/uploads/2024/07/Frazier_Arctic_Climate_2024.pdf (дата звернення: 08 грудня 2024).
4. Frew R. C., Feltham D., Schroeder D., Bateson A. W. Toward a marginal Arctic sea ice cover: Changes to freezing, melting and dynamics. *The Cryosphere Discussions*. 2023. 1–18. <https://doi.org/10.5194/tc-2023-91>
5. Greene C., Pershing A., Cronin T., Ceci N. Arctic climate change and its impacts on the ecology of the North Atlantic. *Ecology*. 2008. 89. 24–38. <https://doi.org/10.1890/07-0550.1>
6. Hegde P. D. *Global warming: Effects and remedy*. KK Publications. 2021. 366 p.
7. Herman A., Węśławski J. M. Typical and anomalous pathways of surface-floating material in the Northern North Atlantic and Arctic Ocean. *Scientific Reports*. 2022. 12. 20521. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25008-5>
8. Igin M. Changing Deep Ocean Currents Due to Antarctic Melting Could Have Disastrous Impact on Climate. *Earth.org*. 2023. Retrieved from <https://earth.org/deep-ocean-currents-report/> (дата звернення: 10 грудня 2024).
9. Kayode-Edwards J., Kayode-Edwards I., Kayode-Edwards D. *Climate Change in the Arctic*. 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-73584-4_4
10. Landsat-8/LDCM. (n.d.). URL: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/landsat-8-ldcm> (дата звернення: 10 грудня 2024).
11. Mallett R. D., Stroeve J. C., Tsamados M., Landy J. C., Willatt R., Nandan V., Liston G. E. Faster decline and higher variability in the sea ice thickness of the marginal Arctic seas when accounting for dynamic snow cover. *The Cryosphere*. 2021.15(5). 2429–2450.
12. Makedon V., Dzeveluk A., Khaustova Y., Bieliakova O., Nazarenko I. Enterprise multi-level energy efficiency management system development. *International Journal of Energy, Environment, and Economics*. 2021. 29(1). 73–91.
13. Hansen K. Arctic ice melt is changing ocean currents. *NASA*. 2023. URL: <https://climate.nasa.gov/news/2950/arctic-ice-melt-is-changing-ocean-currents/> (дата звернення: 10 грудня 2024).
14. Parlow A. The changing dynamics of the Arctic ecosystem and food security: The case of the Bering Sea region. In *The climate-conflict-displacement nexus from a human security perspective* (pp. 149–170). Springer International Publishing. 2022.
15. Romero R., Emanuel K. Climate Change and Hurricane-Like Extratropical Cyclones: Projections for North Atlantic Polar Lows and Medicanes Based on CMIP5 Models. *Journal of Climate*. 2017. 30(1). 279–299. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0255.1>
16. Rudels B., Carmack E. Arctic Ocean water mass structure and circulation. *Oceanography*. 2022. 35(3/4). 52–65.
17. NASA. Arctic sea ice minimum. *NASA*. 2023. URL: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/arctic-sea-ice/?intent=121> (дата звернення: 11 грудня 2024).
18. Thomson J., Rogers W. E. Swell and sea in the emerging Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters*. 2014. 41(9). 3136–3140. <https://doi.org/10.1002/2014GL059983>
19. U.S. National Ice Center. Marginal Ice Zone. *Arctic Ice Products*. 2023. URL: <https://usicecenter.gov/Products/ArcticHome> (дата звернення: 11 грудня 2024).
20. Vizza R., Segal M. Arctic ice melt is changing ocean currents. 2020. URL: <https://climate.nasa.gov/news/2950/arctic-ice-melt-is-changing-ocean-currents/> (дата звернення: 10 грудня 2024).
21. Walsh J. E., Ballinger T. J., Euskirchen E. S., Hanna E., Mård J., Overland J. E., Tangen H., Vihma T. Extreme weather and climate events in northern areas: A review. *Earth-Science Reviews*. 2020. 209. 103324.
22. Wilson C., Aksenov Y., Rynders S. et al. Significant variability of structure and predictability of Arctic Ocean surface pathways affects basin-wide connectivity. *Communications Earth & Environment*. 2021. 2. 164. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00237-0>

References:

1. Bosserelle, C., Reddy, S., & Lal, D. (2015). WACOP wave climate reports. Secretariat of the Pacific Community. Available at: <https://wacop.gsd.spc.int/Atlas/Regional/Pdf/MA/Majuro.pdf> (Accessed 08 December 2024)
2. Deb, J. C., & Bailey, S. A. (2023). Arctic marine ecosystems face increasing climate stress. *Environmental Reviews*. Vol. 31, no. 3, pp. 403–451. <https://doi.org/10.1139/er-2022-0101>.

3. Frazier, K. A. (2024). Arctic Climate Change and its Impact on Homeland Security. Available at: https://tedstevensarcticcenter.org/wp-content/uploads/2024/07/Frazier_Arctic-_Climate_2024.pdf (Accessed 08 December 2024)
4. Frew, R. C., Feltham, D., Schroeder, D., & Bateson, A. W. (2023). Toward a marginal Arctic sea ice cover: Changes to freezing, melting and dynamics. *The Cryosphere Discussions*. Pp. 1–18. <https://doi.org/10.5194/tc-2023-91>.
5. Greene, C., Pershing, A., Cronin, T., & Ceci, N. (2008). Arctic climate change and its impacts on the ecology of the North Atlantic. *Ecology*. Vol. 89, pp. 24–38. <https://doi.org/10.1890/07-0550.1>.
6. Hegde, P. D. (2021). Global warming: Effects and remedy. KK Publications. 366 p.
7. Herman, A., & Węśławski, J. M. (2022). Typical and anomalous pathways of surface-floating material in the Northern North Atlantic and Arctic Ocean. *Scientific Reports*. Vol. 12, pp. 20521. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25008-5>.
8. Igini, M. (2023). Changing Deep Ocean Currents Due to Antarctic Melting Could Have Disastrous Impact on Climate. *Earth.org*. Available at: <https://earth.org/deep-ocean-currents-report/> (Accessed 10 December 2024)
9. Kayode-Edwards, J., Kayode-Edwards, I., & Kayode-Edwards, D. (2024). Climate Change in the Arctic. https://doi.org/10.1007/978-3-031-73584-4_4.
10. Landsat-8/LDCM. Available at: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/landsat-8-ldcm>. (Accessed 10 December 2024)
11. Mallett, R. D., Stroeve, J. C., Tsamados, M., Landy, J. C., Willatt, R., Nandan, V., & Liston, G. E. (2021). Faster decline and higher variability in the sea ice thickness of the marginal Arctic seas when accounting for dynamic snow cover. *The Cryosphere*. Vol. 15, no. 5, pp. 2429–2450.
12. Makedon, V., Dzeveluk, A., Khaustova, Y., Bieliakova, O., & Nazarenko, I. (2021). Enterprise multi-level energy efficiency management system development. *International Journal of Energy, Environment, and Economics*. Vol. 29, no. 1, pp. 73–91.
13. NASA. Kathryn, Hansen. Arctic ice melt is changing ocean currents. (2023). Available at: <https://climate.nasa.gov/news/2950/arctic-ice-melt-is-changing-ocean-currents/>. (Accessed 10 December 2024)
14. Parlow, A. (2022). The changing dynamics of the Arctic ecosystem and food security: The case of the Bering Sea region. In: *The climate-conflict-displacement nexus from a human security perspective*. Springer International Publishing. Pp. 149–170.
15. Romero, R., & Emanuel, K. (2017). Climate Change and Hurricane-Like Extratropical Cyclones: Projections for North Atlantic Polar Lows and Medicanes Based on CMIP5 Models. *Journal of Climate*. Vol. 30, no. 1, pp. 279–299. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0255.1>.
16. Rudels, B., & Carmack, E. (2022). Arctic Ocean water mass structure and circulation. *Oceanography*. Vol. 35, no. 3/4, pp. 52–65.
17. The National Aeronautics and Space Administration (NASA). Arctic sea ice minimum. NASA. (2023). Available at: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/arctic-sea-ice/?intent=121>. (Accessed 11 December 2024).
18. Thomson, J., & Rogers, W. E. (2014). Swell and sea in the emerging Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters*. Vol. 41, no. 9, pp. 3136–3140. <https://doi.org/10.1002/2014GL059983>.
19. U.S. National Ice Center. Marginal Ice Zone. Arctic Ice Products. 2023, August 2. Available at: <https://usicecenter.gov/Products/ArcticHome>. (Accessed 11 December 2024)
20. Vizza, Rexana, Segal, Matthew. (2020). Arctic ice melt is changing ocean currents. Available at: <https://climate.nasa.gov/news/2950/arctic-ice-melt-is-changing-ocean-currents/> (Accessed 10 December 2024)
21. Walsh, J. E., Ballinger, T. J., Euskirchen, E. S., Hanna, E., Mård, J., Overland, J. E., Tangen, H., & Vihma, T. (2020). Extreme weather and climate events in northern areas: A review. *Earth-Science Reviews*. Vol. 209, pp. 103324.
22. Wilson, C., Aksenov, Y., Rynders, S. et al. (2021). Significant variability of structure and predictability of Arctic Ocean surface pathways affects basin-wide connectivity. *Communications Earth & Environment*. Vol. 2, pp. 164. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00237-0>.