

УДК 551.515.2:656.61, PACS: 92.60.-e, 92.70.Gt

ЗМІНИ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПІВНІЧНОЇ АТЛАНТИКИ В УМОВАХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛІННЯ

А. Б. Семергей-Чумаченко, В. В. Шепель

*Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
вул. Всеволода Змієнко, 2, 65082, Одеса, Україна,
alina.semerhei-chumachenko@onu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-8718-4073>*

Визначені тенденції океанічно-атмосферних умов Північної Атлантики в контексті глобального потепління, яке проявляється з другої половини XX століття та посилюється на початку XXI століття. На основі даних платформи Climate Reanalyzer проаналізовано просторово-часову мінливість температури поверхні моря, температури приземного повітря, термічного контрасту між океаном і атмосферою (визначеного як різниця між температурою поверхні моря та температурою приземного повітря), середнього приземного тиску, а також поля вітру на рівні 250 гПа, яке характеризує положення та інтенсивність струминної течії.

Порівняння аномалій температури поверхні моря за 2021–2024 рр. з кліматичними нормами 1961–1990 та 1991–2020 рр. показало, що відносно обох періодів більша частина Північної Атлантики характеризується переважанням додатних аномалій з максимумами у фронтальній зоні Гольфстріму та Північно-Атлантичної течії. Водночас відносно 1991–2020 рр. ці аномалії є менш інтенсивними та просторово неоднорідними, а в субполярному секторі (Лабрадорське море – південна Гренландія – Ісландія) зберігається стійка область ослабленого потепління або відносного охолодження. Виявлена сезонна мінливість температури поверхні моря: восени та взимку переважають слабко від’ємні або квазинейтральні аномалії, тоді як весна характеризується максимумом додатних аномалій у фронтальній зоні Гольфстріму. Влітку спостерігається зміщення на північ зон підвищеного теплового вмісту океану до моря Ірмінгера та субполярних вод.

Аналіз рядів температури поверхні моря, температури приземного повітря та їх різниці за 1940–2024 рр. виявив прискорення потепління після 1990-х років, при цьому температура приземного повітря зростає швидше, ніж температура поверхні океану. Така асиметрія зумовлює стійке зменшення термічного контрасту між океаном і атмосферою та ослаблення середнього тепло- і вологообміну, особливо в холодний сезон. Ослаблення цього контрасту має сезонну асиметрію: найбільше абсолютне зменшення спостерігається взимку, тоді як влітку зафіксовано перехід різниці температур до від’ємних значень, коли температура приземного повітря перевищує температуру поверхні океану.

Під час дослідження баричного поля взимку 2021–2024 рр. виявлені від’ємні аномалії середнього приземного тиску в центральному субполярному басейні Північної Атлантики та підвищений тиск на його периферії, що відображає концентрацію та можливу перебудову ядра позатропічної штормової зони. Аномалії вітру на рівні 250 гПа вказують на локальне посилення та зсув на північ осі струминної течії.

Ключові слова: Північна Атлантика, кліматичні зміни, температура поверхні моря, шторм, термічний контраст океан–атмосфера, тренд.

1. ВСТУП

Посилення та зміщення штормових траєкторій у Північній Атлантиці на тлі глобального потепління підвищує ризики для трансатлантичних морських перевезень і стабільності глобальних логістичних ланцюгів. Оцінка просторово-сезонних змін температури поверхні океану, повітря, термічного контрасту океан–атмосфера та перебудови баричного поля Північної Атлантики потрібна для вдосконалення прогнозування што-

рмових ризиків, розробки маршрутів суден з врахуванням погодних умов (weather-routing) та зменшення економічних втрат у судноплаванні. Сучасні зміни штормової траєкторії Північної Атлантики впливають на економіку України через зростання глобальної вартості та ризиків морської логістики, що відбивається на фрахті, страхуванні, надійності поставок і конкурентоспроможності українського експорту. Розуміння причин ускладнення погоди у цьому регіоні підсилює

потенціал України у розвитку кліматичних сервісів для транспорту й управління морськими ризиками.

Сучасні дослідження свідчать, що кліматичні зміни вже змінюють великомасштабну циркуляцію атмосфери, яка визначає небезпечні метеорологічні умови над Північною Атлантикою. Одним із ключових механізмів є арктичне підсилення (Arctic Amplification) — прискорене потепління Арктики порівняно із середніми широтами, що послаблює меридіональний градієнт температури [1] і може трансформувати конфігурацію тропосферних струминних течій, сприяючи зростанню повторюваності екстремальної погоди у середніх широтах. Для Північної Атлантики це означає можливі зміни траєкторій циклонів, тривалості штормових ситуацій та частоти епізодів сильного вітру на морських маршрутах.

Розуміння цих змін забезпечує концепція штормових траєкторій (storm tracks). В [2] узагальнюють, що кліматичні зміни впливають на траєкторії циклонів через протилежні механізми: зростання вологості й латентного тепловиділення може посилювати барокліний розвиток циклонів, тоді як ослаблення температурних контрастів здатне послаблювати штормову активність. Така конкуренція процесів особливо характерна для Північної Атлантики, де ризики для судноплавства залежать не тільки від зміни частоти штормів, а й від їхньої інтенсивності, сезонності та географічного перерозподілу.

Важливим керівним елементом для розміщення штормових зон є Північно-Атлантична течія, який [3] має значну міжрічну й декадну мінливість та визначає широтне положення траєкторії штормів та умови інтенсивного циклогенезу. Навіть за незначних змін у середніх характеристиках штормів зсув струменя на північ чи південь може перемістити зони небезпечного вітру, опадів і хвиль відносно основних трансатлантичних трас. Методологічно близькі результати отримано й для інших регіонів: в [4] показано, що проєктовані зміни позатропічних циклонів у CMIP5 пояснюють регіональні тренди опадів, і цей підхід є корисним для аналізу зв'язків «циклонічність-наслідки» в Атлантиці.

Оскільки атмосферні зміни трансформуються у морські небезпеки через вітрове поле, ключове значення для безпеки судноплавства мають вітрові хвилі. В [5] на основі багатомодельного ансамблю визначено, що в глобальному масштабі очікуються суттєві зміни висоти значних хвиль, періоду та напрямку хвильової енергії, причому реакція є просторово неоднорідною і тісно

пов'язана зі змінами циркуляції. Північна Атлантика віднесена до басейнів із підвищеною чутливістю хвильових екстремумів до трансформації штормових режимів.

Регіональний аналіз для північного сходу Атлантики [6, 7] підтверджує таку чутливість: автори показують, що клімат вітрових хвиль Північної Атлантики має виразну просторову структуру змін, з тенденціями до посилення екстремальних хвиль у північних і північно-східних секторах, особливо взимку. Ці результати безпосередньо важливі для судноплавства, оскільки саме крайні значення хвилювання визначають ризик аварійності, затримок, зміни маршрутів і вимоги до конструктивної стійкості суден.

Як контрастний приклад кліматично зумовленої перебудови морських трас виступають автори [8], які показують, що зменшення льодовитості відкриває нові трансарктичні маршрути, змінюючи глобальну логістику. Хоч ці роботи не стосуються безпосередньо Північної Атлантики, вони демонструють принципово важливий висновок: кліматичні зміни можуть переформатувати географію судноплавства, що потенційно збільшує значення північно-атлантичної акваторії і підвищує потребу в надійних оцінках штормових ризиків.

В [9] автор виділяє провідний режим мінливості північноатлантичних штормових трас, використовуючи аналіз варіацій синоптичної активності (коливання атмосферного тиску на рівні моря) у зимовий сезон 1900–1992 рр., і показує його тісний зв'язок із Північноатлантичною осциляцією (NAO). Робота важлива як «класична» основа: траєкторії штормів у Північній Атлантиці змінюється узгоджено з перебудовою баричного поля (Азорський максимум–Ісландський мінімум) та великомасштабною циркуляцією. Дослідження надає критично важливу ланку між океанічними фронтами, кліматичною динамікою та погодними ризиками. Наявність чіткого фронту Гольфстріму в межах великомасштабної аномалії температури поверхні океану (SST) посилює перший центр хвильового потоку (Rossby wave train), що спрямовується на Євразію, приблизно на 40%, та інтенсифікує потік хвильової активності та призводить до посилення транспорту вологи та екстремальних опадів над морськими акваторіями у бік Західної Європи.

Огляд [10] систематизує знання про NAO, його фази, механізми та впливи у період до метеорологічних спостережень, в тому числі за допомогою палео-реконструкцій (даних непрямих свідчень, наприклад, кілець дерев). Реконструкції добре узгоджуються з інструментальними

спостереженнями у період їх перетину. Окремо підкреслюється, що NAO безпосередньо пов'язаний зі зміщеннями та інтенсивністю North Atlantic storm track (під час позитивної фази — більш інтенсивний і зміщений на північний схід; під час негативної — слабший і більш південний). Це дає фізичний «місток» між баричним полем/струменем і практичними наслідками (наприклад, шторми з сильним вітром над Європою).

Стаття [11] показує, що в умовах потепління змінюється частота/ймовірність певних режимів атмосферної циркуляції над Північною Атлантикою та Європою, що має наслідки для екстремумів (зокрема, ризиків повеней узимку та посух улітку в Європі), тобто зміни циркуляції є статистичне та динамічне значущими й релевантними до ризиків.

У роботі [12] через аналіз двох наборів ансамблеві експериментів (2000-2013 рр.) аналізується, як сила SST-фронту в зоні Гольфстріму впливає на атмосферну відповідь на великомасштабні аномалії температури поверхні океану взимку. Показано, що більш різкий фронт Гольфстріму може підсилювати атмосферний відгук і телезв'язки через процеси, пов'язані зі проходженням циклонів та вихорами, тобто фронтальна зона є «підсилювачем» взаємодії океан-атмосфера, вказує на важливість «гарячих плям»/фронтів SST для активності штормів.

Порівнюючи траєкторії штормів у зимовий сезон Північної півкулі [13] в високороздільних (HR, 10 км океан і 25 км атмосфера) і низькороздільних (LR, 100 км океан і 100 км атмосфера) конфігураціях Community Earth System Model (CESM) та реаналізом досліджені довгострокові середні зимові штормові треки Північної півкулі (NH). Основний акцент роботи на барокліній нестійкості як механізму формування траєкторії штормів та впливу модельної роздільності на інтенсивність і структуру збурень.

Більшість досліджень аналізують окремі компоненти (штормові траси, хвилі, NAO), але не інтегрують їх у комплексну оцінку ризиків для конкретних практичних аспектів. Отже, комбінований вплив зсуву трас штормів, змін екстремальності хвиль і мінливості NAO було б доцільно трансформувати в кількісні показники ризику (ймовірність небезпечних подій, очікувані економічні втрати, вразливість глобальних ланцюгів поставок) для різних сезонів і широт

Метою дослідження є визначення зміни метеорологічних умов під впливом глобального потепління в Північній Атлантиці з застосуван-

ням ресурсу Climate Reanalyzer [14], для подальшої оцінки ризиків для судноплавства (штормові вітри, хвилі, тумани, сильні опади тощо).

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для кількісної оцінки впливу клімату на метеорологічні умови судноплавства потрібні високороздільні та узгоджені ряди вітру, тиску, температури, опадів та інших параметрів, необхідних для діагностики штормів та їх трендів над Північною Атлантикою. Реаналіз ERA5 є надійною основою для аналізу історичної мінливості, просторових закономірностей та прив'язки змін атмосферної циркуляції до морського стану.

Для характеристики впливу сучасних кліматичних змін на метеорологічні умови у Північній Атлантиці використано платформу візуалізації даних реаналізу ERA 5 Climate Reanalyzer [14].

Climate Reanalyzer є корисним інструментом для оперативного моніторингу та попереднього аналізу кліматичних параметрів, надаючи доступ до візуалізацій щоденних даних (температура повітря та морської поверхні, площа морського льоду) та місячних продуктів реаналізу (карти, часові ряди, кореляції) на основі ERA5. Ресурс дозволяє швидко оцінювати аномалії, формувати гіпотези та отримувати ілюстративний матеріал для статей, проте для глибокого аналізу та посилань необхідно використовувати первинні джерела даних, зазначені на сайті [14].

Для визначення проявів глобального потепління проаналізовані поля температури поверхні океану (SST) та температура повітря біля поверхні землі (T2m), які доступними на платформі Climate Reanalyzer. Цей набір даних є важливим для аналізу міждесятилітніх змін і аномалій у Північній Атлантиці та що дозволяє швидко ідентифікувати регіональні «гарячі плями» потепління та сезонні особливості.

Для обробки даних та проведення статистичного аналізу у дослідженні було використано надбудову Real Statistics Resource Pack для Microsoft Excel [15]. Її застосування зумовлене зручністю інтеграції з табличними даними багаторічних спостережень і можливістю реалізації сучасних статистичних тестів без необхідності використання спеціалізованих мов програмування. Даний інструмент підтримує виконання тесту Манна-Кендалла та методу Сена, що дозволяє автоматично отримати значення статистик, рівень значущості (p-value) та довірчі інтервали для оцінки тенденцій.

Методи – просторово-часовий аналіз метеорологічних полів, непараметричний тест Манна-

Кендела.

Для аналізу фонових кліматичних змін (SST та T2m) побудовані:

- сезонні та річні карти аномалій 2021–2024 рр. відносно кліматичних періодів 1961–1990 та 1991–2020 рр.;
- часові ряди середніх аномалій у межах обраного домену;
- лінійні тренди ($^{\circ}\text{C}/\text{десятиліття}$) з оцінкою параметрів тренду за методом Манна-Кендела і інтенсивності тренду за методом Сена.

Сезонний аналіз виконано для зими (DJF), весни (MAM), літа (JJA) та осені (SON), із акцентом на DJF та SON як періоди максимальних позатропічних штормів в Атлантиці.

Для кількісного аналізу циклонічної активності і небезпечних для судноплавства вітрових умов використані осереднені поля атмосферного тиску на рівні моря (mean sea level pressure - MSLP) та вітру на рівні 250 гПа (250 hPa wind).

Дослідження охоплює акваторію Північної Атлантики, а саме домен North Atlantic LEA (Lambert Equal-Area) у ламбертовській азимутальній рівновеликій проекції.

Аналіз проводився для періоду 1940–2024 рр., із врахуванням попередньої кліматичної норми 1961–1990 рр., чинної кліматичної норми 1991–2020 рр. та міжрічної мінливості з 2021 по 2024 рр. Таке розбиття дає змогу зіставити «кліматичну норму» з поточними змінами, що мають практичне значення для морської діяльності.

Для розрахунку термічного контрасту океан–атмосфера ($\Delta T = \text{SST} - \text{T2m}$) використано місячні та сезонні цифрові дані температури поверхні моря (SST) і температури приземного повітря на висоті 2 м (T2m), отримані з ресурсу Climate Reanalyzer на основі реаналізу ERA5. Значення ΔT розраховані як різниця узгоджених у часі та просторі полів SST і T2m для обраного регіону Північної Атлантики.

Діагностика змін умов штормової активності та сильних вітрів здійснена для зимових місяців за полями атмосферного тиску на рівні моря (MSLP) та вітру на рівні 250 гПа.

3. РЕЗУЛЬТАТИ

Розглянемо прояви глобального потепління в акваторії Північної Атлантики. Середньорічні поля температури поверхні океану (SST, $^{\circ}\text{C}$), наведені на рис. 1, свідчать про загальне потепління басейну та поступове зміщення ізотерм у північ-

ному напрямку. Попри збереження великомасштабного температурного контрасту між тропічними, помірними та субполярними широтами, у сучасний період спостерігається розширення площі теплих поверхневих вод, що відображає системну термічну перебудову Північної Атлантики.

У тропічно-субтропічному поясі Північної Атлантики ($0\text{--}25^{\circ}\text{N}$) у кліматичному періоді 1961–1990 рр. поверхневі води характеризувалися наявністю обширної зони SST $26\text{--}29^{\circ}\text{C}$ у західній тропічній Атлантиці та Карибському морі, тоді як у східній тропічній частині басейну переважали значення $24\text{--}27^{\circ}\text{C}$. У 1991–2020 рр. спостерігалось розширення області SST понад 26°C у північному та східному напрямках, що свідчить про посилення теплового стану поверхневих вод. У 2021–2024 рр. зони з SST близько $28\text{--}30^{\circ}\text{C}$ у (біла рамка на рис. 1) західній тропічній Атлантиці та Карибському басейні займають ще більшу площу та поширюються у північному напрямку, відображаючи подальше розширення теплих поверхневих вод у цьому секторі.

Найбільш виразна область підвищеного теплового вмісту океану в усі розглянуті кліматичні періоди просторово асоційована з системою Гольфстріму. У період 1961–1990 рр. тепла течія Гольфстріму та її північно-східне продовження — Північно-Атлантична течія — характеризувалися відносно меншою шириною, нижчими значеннями SST та обмеженим просторовим розвитком фронтальної зони. У кліматичному періоді 1991–2020 рр. відбулося посилення та розширення теплої течії, що супроводжувалося північним зміщенням ізотерм $18\text{--}20^{\circ}\text{C}$ на кілька градусів широти та подовженням Північно-Атлантичної течії в напрямку північно-східної Атлантики. У 2021–2024 рр. максимальні додатні аномалії SST були зосереджені вздовж осі Гольфстріму та його північно-східного продовження (червона рамка на рис. 1), що свідчить про подальше розширення фронтальної зони та інтенсифікацію Північно-Атлантичної течії з поширенням теплих поверхневих вод у центральну Атлантику та в напрямку Європи.

Зона підвищеного теплового вмісту океану, пов'язана з системою Гольфстріму та Північно-Атлантичної течії, сприяє інтенсифікації тепло- та вологообміну і бароклічних процесів, які підсилюють циклогенез та штормові хвилі на головних трансатлантичних судноплавних маршрутах [2, 5, 6, 12].

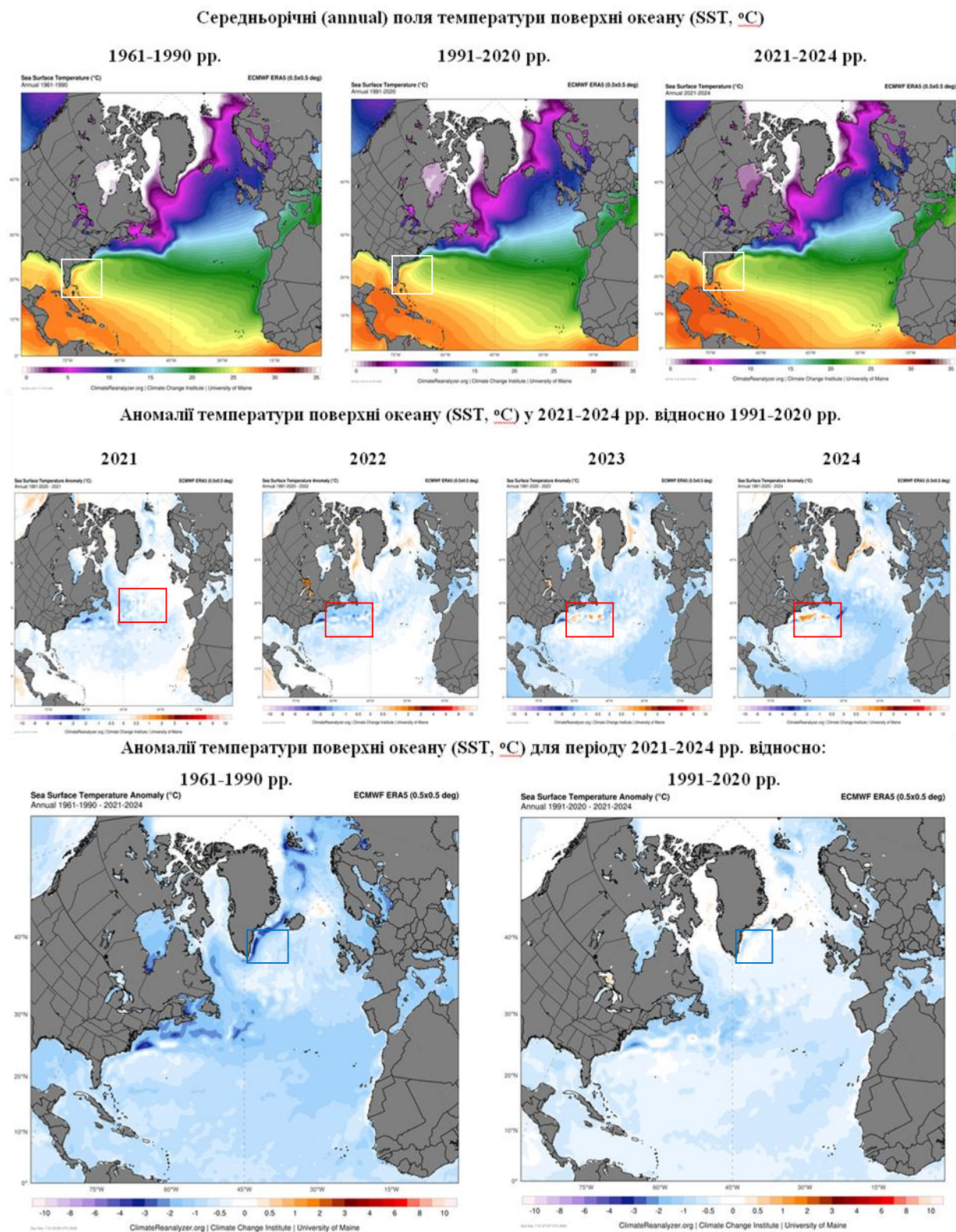


Рис. 1 – Поля середньорічних значень та аномалій SST, °C у Північній Атлантиці для різних кліматичних періодів
Fig. 1 – Fields of mean annual SST values and anomalies (°C) in the North Atlantic for different climatic periods

У субполярній гирловій зоні, тобто області, що знаходиться поблизу Ньюфаундленду та в Північній Атлантиці ($\approx 45\text{--}60^\circ\text{N}$, $60\text{--}20^\circ\text{W}$), розділяє

субтропічний та субполярний кругообіги, і де зустрічаються тепла Північно-Атлантична та холодна Лабрадурська течії тренд неоднорідний. У

кліматичному періоді 1991–2020 рр. у субполярному секторі Північної Атлантики фіксується загальне потепління, однак його інтенсивність є суттєво нижчою порівняно з фронтальною зоною Гольфстріму та Північно-Атлантичної течії. У сучасному середньому полі 2021–2024 рр. холодні води, пов'язані з циркуляцією субполярного кругооберту, займають значну площу, а фронтальний перехід між теплими субтропічними та холодними субполярними водними масами стає більш контрастним. Саме в цій області формується стійка холодна аномалія, відома як Subpolar Cold Blob або North Atlantic Warming Hole [16], яка відображає зону ослабленого потепління або відносного охолодження поверхневих вод порівняно із загальним фоновим потеплінням Північної Атлантики.

Порівняння двох карт аномалій SST показує різний географічний розподіл аномалій, тому що періоди 1961–1990 і 1991–2020 рр. мають різний рівень потепління.

Аномалії SST у 2021–2024 рр. відносно попередньої кліматичної норми 1961–1990 рр. характеризуються переважанням додатного фону на більшій частині акваторії Північної Атлантики та значною просторовою протяжністю теплих відхилень. Максимальні додатні аномалії зосереджені у фронтальній зоні Гольфстріму та Північно-Атлантичної течії, а також у східному секторі басейну поблизу Європи.

Водночас у субполярному секторі Північної Атлантики, у межах субполярного кругооберту та зоні взаємодії Лабрадорської і Східно-Гренландської течій із Північно-Атлантичною течією, зберігається область слабких або від'ємних аномалій SST - так звана субполярна холодна пляма. Її прояв у період 1961–1990 рр. був більш вираженим порівняно з кліматичним періодом 1991–2020 рр. (синя рамка на рис. 1), що відображає посилення контрасту між субполярним і субтропічним секторами Північної Атлантики у сучасну кліматичну епоху.

Аномалії 2021–2024 рр. відносно 1991–2020 рр. (чинна кліматична норма) стають меншими за величиною і більш плямистими.

Позитивні аномалії SST у сучасний період зберігаються переважно у фронтальній зоні Гольфстріму та його північно-східного продовження — Північно-Атлантичної течії, формуючи локалізовані осередки підвищеного теплового вмісту. Водночас значна частина центральної та східної Північної Атлантики характеризується аномаліями, близькими до нульових значень відносно кліматичної норми 1991–2020 рр., що свідчить

про відсутність вираженого додаткового потепління в цих секторах. Натомість у межах субполярного кругооберту, зокрема в районах Лабрадорського моря, моря Ірмінгера та південної Гренландії, від'ємні аномалії SST стають більш виразними та просторово узгодженими, що відображає посилення або збереження субполярної холодної аномалії відносно сучасної кліматичної 1991–2020 рр.

Загалом аномалії для окремих років у 2021–2024 рр. помірні та є міжрічні особливості. У 2021 р. позитивні аномалії SST були локалізовані переважно у фронтальній зоні Гольфстріму та його осьовій частині, тоді як центральна частина субполярної Північної Атлантики характеризувалася умовами, близькими до кліматичної норми або слабо від'ємними аномаліями.

У 2022 р. у західному секторі субполярного кругооберту, включно з Лабрадорським морем і зоною субполярної холодної аномалії, посилювалися від'ємні або квазинейтральні відхилення SST. Водночас фронтальна зона Гольфстріму зберігала додатні аномалії відносно норми, що призводило до зростання термічного контрасту між субтропічним і субполярним секторами Північної Атлантики.

2023 рік характеризувався найбільш вираженою просторовою неоднорідністю полів аномалій SST. Локалізовані додатні аномалії посилювалися у фронтальній зоні Гольфстріму та в області Субполярного фронту, тоді як у центральній частині Північної Атлантики зберігалися слабкі від'ємні або близькі до нульових відхилення від чинної кліматичної норми.

У 2024 р. спостерігалася найбільш контрастна просторово-термічна структура аномалій SST: додатні відхилення фіксувалися як у фронтальній зоні Гольфстріму, так і в субполярному секторі поблизу Гренландії та Ісландії, тоді як у центральній частині субполярної Північної Атлантики зберігалася ядро відносно прохолодних вод, пов'язане з циркуляцією субполярного кругооберту.

Отже, у 2021–2024 рр. аномалії SST у Північній Атлантиці демонстрували зростаючу просторову контрастність із концентрацією додатних відхилень у фронтальній зоні Гольфстріму та збереженням субполярної холодної аномалії в межах субполярного кругооберту

З урахуванням сезонної мінливості атмосферної циркуляції Північної Атлантики, хвильового режиму та пов'язаних із ними навігаційних ризиків, аналіз аномалій температури поверхні моря (SST), вітрових характеристик і екстремальних метеорологічних проявів виконувався окремо для

стандартних кліматологічних сезонів: зими (DJF), весни (MAM), літа (JJA) та осені (SON). Особливу увагу приділено періоду SON–DJF, який відповідає максимуму позатропічної штормової активності та формуванню небезпечних для судноплавства умов у регіоні.

У зимовий сезон поля аномалій SST у більшій частині Північної Атлантики характеризуються переважанням слабо від’ємних значень. Найбільш виразні від’ємні аномалії зосереджені (сині рамки на рис. 2) у західному та центральному секторах середніх широт (приблизно 25–40°N, 75–45°W), включно з акваторіями, розташованими південніше та східніше фронтальної зони Гольфстріму. У субполярному секторі Північної Атлантики, південніше Гренландії та Ісландії, аномалії SST також мають переважно від’ємний або близький до нульового характер

Взимку (DJF) 2021–2024 рр. поля аномалій SST у Північній Атлантиці не демонструють стійких або просторово розвинених додатних відхилень: позитивні аномалії мають локальний і слабо виражений характер. Таким чином, зимовий період сучасних років характеризується ослабленим проявом океанічного потепління на фоні підвищеного термічного контрасту між фронтальною зоною Гольфстріму та відносно холодними водами прилеглих субполярних і центрально-атлантичних районів.

У весняний сезон (MAM) загальний фон аномалій SST у більшій частині басейну залишається слабо від’ємним, особливо в центральній Північній Атлантиці. Водночас чітко формується зонально витягнута смуга додатних аномалій (червона рамка на рис. 2) уздовж фронтальної зони Гольфстріму та Північно-Атлантичної течії (приблизно 30–40°N від східного узбережжя США до 55–45° W).

Найбільша інтенсивність додатних аномалій SST протягом року спостерігається у весняний сезон, що визначає весну як період максимуму теплих відхилень у фронтальній зоні Гольфстріму. У цей час фронтальна смуга додатних аномалій є найбільш інтенсивною та просторово протяжною порівняно з іншими сезонами, відображаючи посилення ролі океанічних фронтів у формуванні сезонної термічної структури Північної Атлантики.

У літній сезон (JJA) 2021–2024 рр. у тропічно-субтропічному та центральному секторах Північної Атлантики переважали слабо від’ємні аномалії SST, тоді як у середніх широтах фон аномалій

був близьким до нульових або слабо від’ємних значень. Водночас сезонний максимум додатних аномалій SST зміщувався у північному напрямку: найбільш виразні позитивні відхилення фіксувалися вздовж західного узбережжя Гренландії (червоні рамки на рис. 2), в районі моря Ірмінгера та прилеглих субполярних вод, що відображає літнє посилення теплових аномалій у межах субполярного кругооберту.

Отже, літо характеризується відносним посиленням додатних аномалій SST у субполярному секторі Північної Атлантики на тлі слабо вираженого потепління в тропічно-субтропічних широтах басейну.

Восени (SON), подібно до зимового, у більшій частині Північної Атлантики знову переважають слабо від’ємні аномалії SST. Центральний та східний сектори басейну характеризуються значеннями, нижчими за кліматичну норму (сині рамки на рис. 2), тоді як у субполярному секторі аномалії SST є переважно близькими до нульових або слабо від’ємними. Додатні аномалії SST проявляються локально у західній частині фронтальної зони Гольфстріму поблизу узбережжя Північної Америки (приблизно 30–35°N, 75–65°W), проте їх інтенсивність і просторова протяжність є суттєво меншими порівняно з весняним сезоном

Аналіз температури приземного повітря на висоті 2 м (T2m) є методичне обґрунтованим доповненням до аналізу SST, оскільки характеризує термічний стан нижнього шару атмосфери, його реакцію на великомасштабні циркуляційні режими та формування метеорологічних умов, важливих для морської навігації. Особливу інформативність має оцінка термічного контрасту океан–атмосфера ($\Delta T = SST - T2m$), який визначає інтенсивність тепло- і вологообміну над океанічними фронтальними зонами, зокрема в області Гольфстріму, та впливає на енергетику позатропічних циклонів у штормовий сезон.

Ряди SST і T2m за період 1940–2024 рр. свідчать про стале потепління Північної Атлантики з прискоренням після 1990-х років і максимумами у 2023–2024 рр. При цьому зростання T2m є дещо швидшим і більш рівномірним порівняно з SST (рис. 3), що в довгостроковій перспективі зумовлює зменшення термічного контрасту океан–атмосфера (ΔT), незважаючи на наявність міжрічної мінливості.

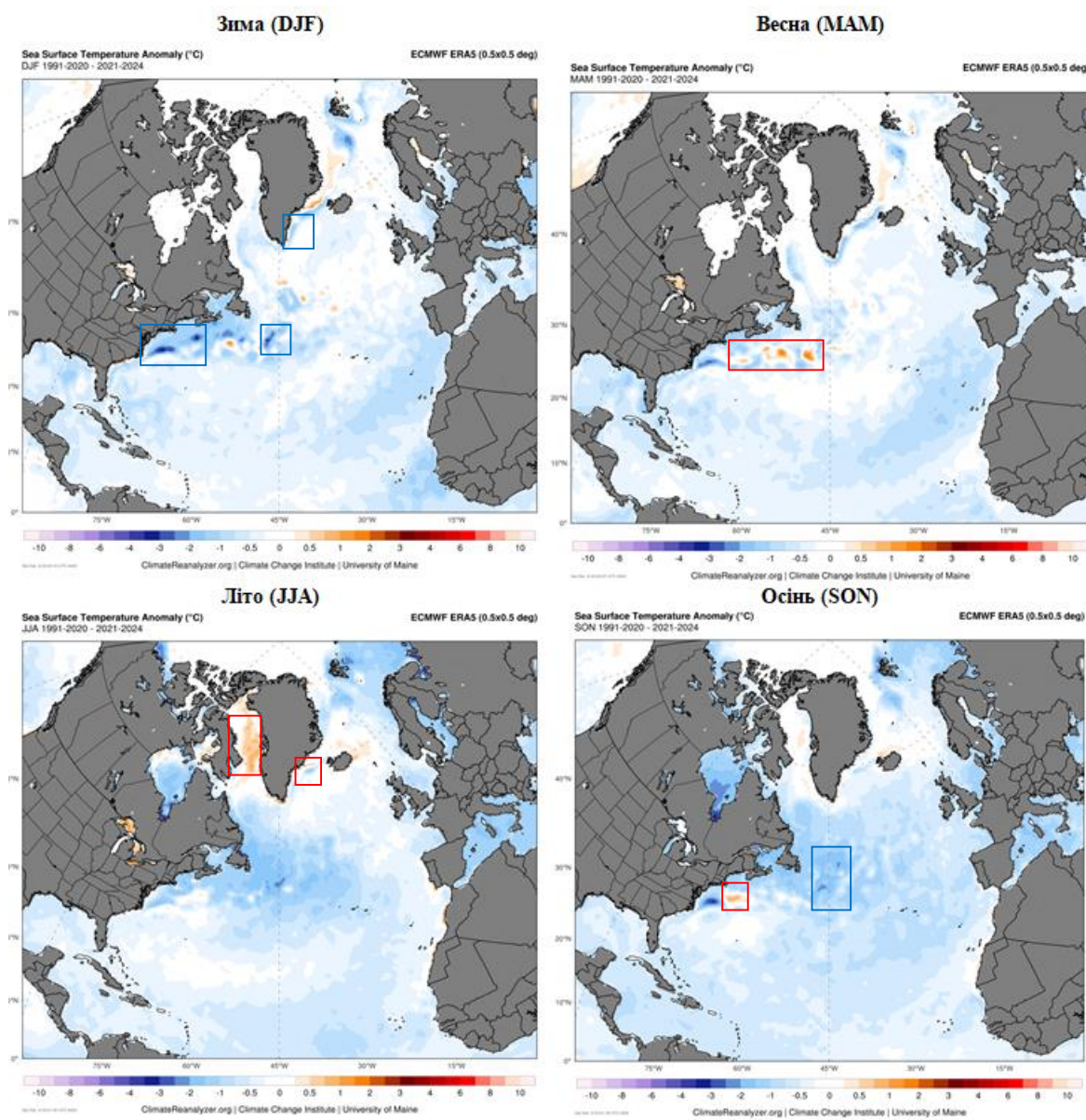


Рис. 2 – Поля аномалій SST, °C у Північній Атлантиці у 2021-2024 рр. відносно 1991-2020 рр. для різних сезонів
Fig. 2 – Fields of SST anomalies (°C) in the North Atlantic in 2021–2024 relative to 1991–2020 for different seasons

Ряди термічного контрасту океан–атмосфера ($\Delta T = SST - T_{2m}$) за періоду 1940–2024 рр. демонструють стійкий від’ємний лінійний тренд упродовж усього періоду спостережень як для річних середніх значень, так і для всіх сезонів (рис. 3). Річні значення ΔT зменшилися приблизно з 1,5–1,6 °C у 1940–1950-х роках до рівнів близько 1,0 °C і нижче у 2020-х роках, що свідчить про поступове ослаблення середнього термічного контрасту між океаном і атмосферою в Північній Атлантиці.

Найбільш інтенсивне зменшення термічного контрасту океан–атмосфера спостерігається у зи-

мовий сезон: сезонні значення ΔT знизилися орієнтовно на 0,5 °C, що свідчить про істотне ослаблення теплового контрасту між океаном і приземною атмосферою в межах основного коридору позатропічної штормової активності Північної Атлантики. У перехідні сезони також фіксується помітний спад ΔT на рівні приблизно 0,3–0,4 °C. Особливо показовою є літня еволюція ΔT , для якої зафіксовано перехід від слабо додатних значень у середині XX ст. до від’ємних у сучасний період, що означає переважання температури приземного повітря над температурою поверхні океану влітку в межах домену.

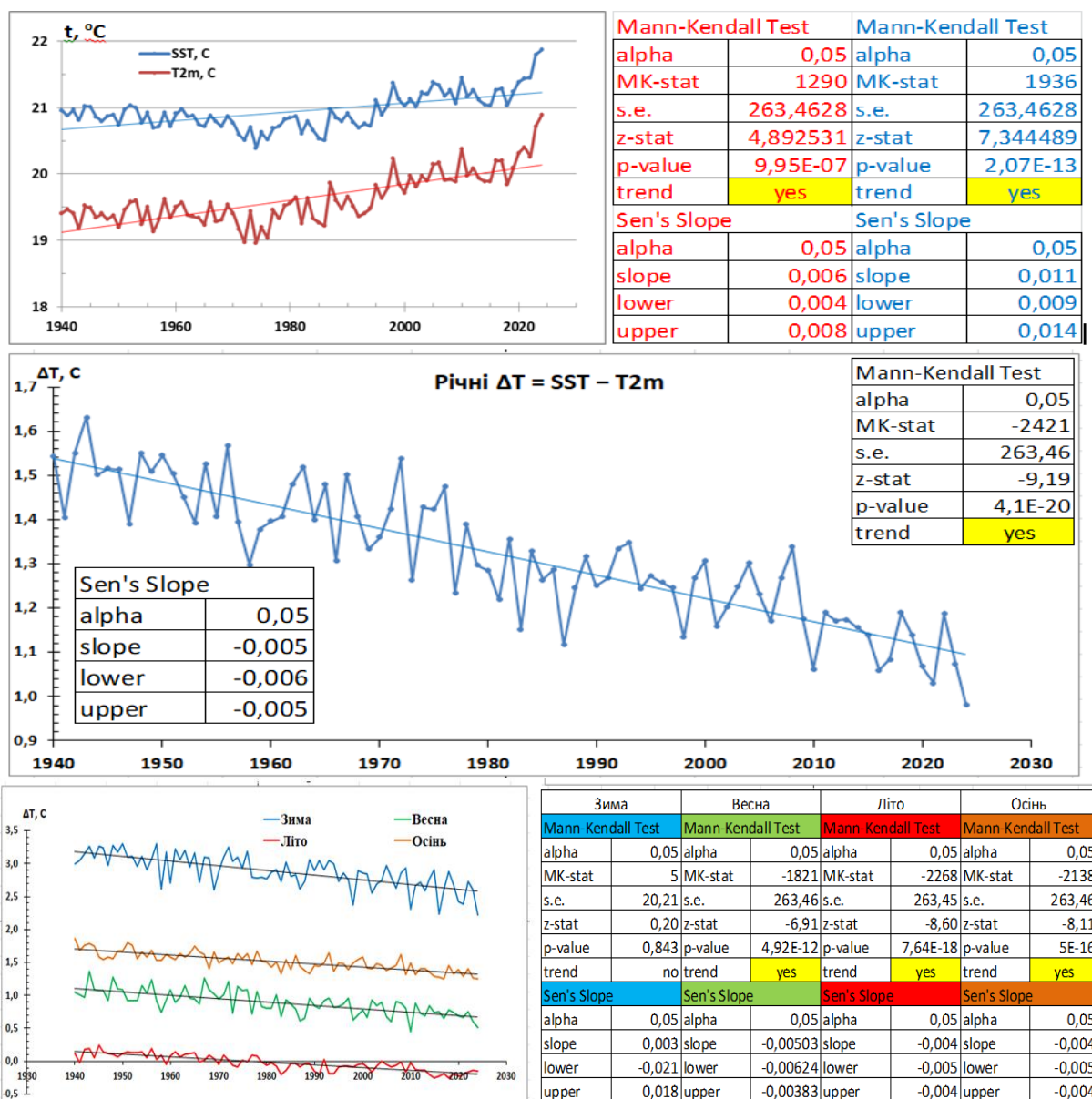


Рис. 3 – Динаміка і статистична оцінка трендів SST, T2m та різниці температур ΔT (°C) у 1940-2024 рр.
 Fig. 3 – Dynamics and statistical assessment of trends in SST, T2m and the temperature difference ΔT (°C) in 1940-2024

Аналіз часових рядів температури моря та повітря за допомогою непараметричних методів (Манна-Кендалла та Сена) виявив статистично значущі монотонні зростаючі тренди в обох випадках ($p < 0.001$). Однак швидкість зростання суттєво відрізняється. Температура повітря зростає зі швидкістю $0,015$ °C на рік (оцінка тренду з 95% довірчим інтервалом: $0,013$ – $0,018$ °C/рік). Температура моря зростає повільніше $0,010$ °C на рік (оцінка тренду з 95% довірчим інтервалом: $0,008$ – $0,013$ °C/рік). Різниця в нагонах є статистично значущою (довірчі інтервали не перекриваються), що узгоджується з фізичними властивостями середовища: повітря, маючи меншу теплоємність, реагує на зміну клімату швидше, ніж водна маса.

Високі значення Z-статистики та крихітні p-value для обох змінних є класичним індикатором сильного впливу глобального потепління у регіоні. Обидві $Z \gg 3,29$, тому тренди в обох випадках значущі з найвищою можливою статистичною впевненістю. Z-статистика для температури повітря на 20% вища, ніж для температури моря.

Розгляд річної різниці між температурою моря та повітря виявив найсильніший та найнадійніший ($Z\text{-stat} = -9,19$) тренд серед усіх досліджених змінних. Встановлено статистично значуще монотонне зменшення цієї різниці зі швидкістю $-0,005$ °C на рік (оцінка тренду з 95% довірчим інтервалом: $-0,006$... $-0,005$ °C/рік; $p < 0,001$). Це є прямим наслідком того, що температура повітря

зростає значно швидше ($+0,015\text{ }^{\circ}\text{C/рік}$), ніж температура моря ($+0,010\text{ }^{\circ}\text{C/рік}$). Таке скорочення теплового розриву між середовищами може вказувати на зміну режиму теплообміну в системі "океан-атмосфера" та є важливим індикатором нерівномірності прогрівання компонентів кліматичної системи в регіоні дослідження.

Сезонний аналіз виявив виразну асиметрію: значуще зменшення різниці температури мореповітря відбувається в теплий період року (весна, літо, осінь), тоді як взимку тренд відсутній. Найсильніший та найстійкіший спад спостерігається влітку ($Z = -8,60$). Це свідчить про те, що процес більш швидкого прогрівання атмосфери порівняно з океаном є сезонно-залежним і найбільш вираженим у період максимальної сонячної радіації та стабільних атмосферних умов.

Спільний аналіз SST, T2m та їх різниці (ΔT), є інформативним підходом для оцінки стану та змін у системі "океан-атмосфера". Він дозволяє кількісно оцінити нерівномірність прогрівання компонентів кліматичної системи та потенційні наслідки для циркуляційних процесів та енергетики погодних явищ у Північній Атлантиці

Поля аномалій SST в осінній сезон 2021–2024 рр. характеризуються переважанням слабо від'ємних або близьких до нульових відхилень на більшій частині акваторії Північної Атлантики. У центральному та східному секторах басейну фіксуються помірні від'ємні аномалії SST відносно кліматичної норми 1991–2020 рр., що свідчить про ослаблене потепління або відносне охолодження поверхневих вод у цей період.

Поля аномалій температури приземного повітря (T2m) в осінній сезон істотно відрізняються від відповідних полів SST. У 2021–2024 рр. (рис. 4) над більшою частиною акваторії Північної Атлантики, а також над прилеглими континентальними територіями, переважають додатні аномалії T2m відносно кліматичної норми. Найбільш інтенсивні позитивні відхилення зосереджені у субполярному секторі Північної Атлантики та Арктиці, зокрема над Канадською Арктикою, Баффіновою затокою, Лабрадормом і північно-західним сектором Атлантичного океану. Такий просторовий розподіл узгоджується з проявами арктичного підсилення потепління, яке характеризується максимальними темпами зростання температури приземного повітря в осінній сезон.

В Центральній Атлантиці ($\approx 20\text{--}50^{\circ}\text{N}$) переважно слабкі додатні аномалії (світло-блакитні), тобто повітря тут тепліше, але не так різко, як у високих широтах. Східна Атлантика біля Європи й Північ Африки - переважають позитивні відхи-

лення, відносно рівномірні, без великих "холодних" осередків.

Загалом, осінь 2021–2024 рр. характеризується стійким потеплінням приземної атмосфери у всьому басейні з максимумом у субполярно-арктичній зоні на заході Північної Атлантики.

У зимовий сезон 2021–2024 рр., на відміну від полів аномалій температури приземного повітря (T2m), поля аномалій SST у Північній Атлантиці характеризуються домінуванням слабо від'ємних або квазинейтральних значень на більшій частині басейну. У період грудень–лютий (DJF) океанська поверхня в середньому не демонструє суцільного потепління, а загальний термічний фон відповідає умовам слабого відносного охолодження. Водночас локалізовані додатні аномалії SST зберігаються у фронтальній зоні Гольфстріму, що підкреслює підвищений термічний контраст між цією течією та навколишніми водами в холодний сезон.

У зимовий сезон 2021–2024 рр. відносно кліматичної норми 1991–2020 рр. Північна Атлантика характеризується переважанням додатних аномалій температури приземного повітря (T2m) з максимумами у субполярно-арктичному та північно-західному секторах басейну. Водночас аномалії SST у більшій частині акваторії мають квазинейтральний або слабо від'ємний характер, за винятком локалізованих додатних відхилень у фронтальній зоні Гольфстріму.

Протилежний характер аномалій SST і T2m вказує на зменшення зимового термічного контрасту океан–атмосфера (ΔT) і зміну умов тепло- та вологообміну в зоні основної штормової активності Північної Атлантики.

Зимова кліматологія поля середнього атмосферного тиску на рівні моря (MSLP, гПа) за 1991–2020 рр. чітко визначає основне ядро північноатлантичної штормової траєкторії (рис. 5). Найнижчі середні значення тиску формують Ісландський мінімум — просторово витягнуту область пониженого MSLP, центр якої розташований у субполярному секторі між південною Гренландією та Ісландією (приблизно $55\text{--}65^{\circ}\text{N}$, $45\text{--}25^{\circ}\text{W}$). Від цього ядра ізобари розходяться до більш високого тиску на південь (Азорський максимум) і на захід до континенту Північної Америки. Така конфігурація відображає стійкий зимовий градієнт тиску між субтропіками та субполярними широтами та відповідає кліматологічному коридору найчастішого циклогенезу і проходження позатропічних циклонів у Північній Атлантиці.

Порівняння поля MSLP за 2021–2024 рр. з кліматичною нормою демонструє помітну перебу-

дову поля тиску в зоні Ісландського мінімуму. Карта аномалій показує від'ємні відхилення MSLP у центрально-субполярній Атлантиці навколо Гренландії та південніше Ісландії, тоді як у західному секторі (поблизу Лабрадору/північно-східної Канади) і в східному секторі біля Європи переважають додатні аномалії тиску. Подібна структура аномалій означає, що в сучасний період

ядро пониженого тиску зберігається і локально поглиблюється у центральному субполярному басейні, але водночас посилюється фон атмосферного тиску з боків штормового коридору, що це вказує на модифікацію його позиції та “стиснення” у зоні найнижчого тиску.

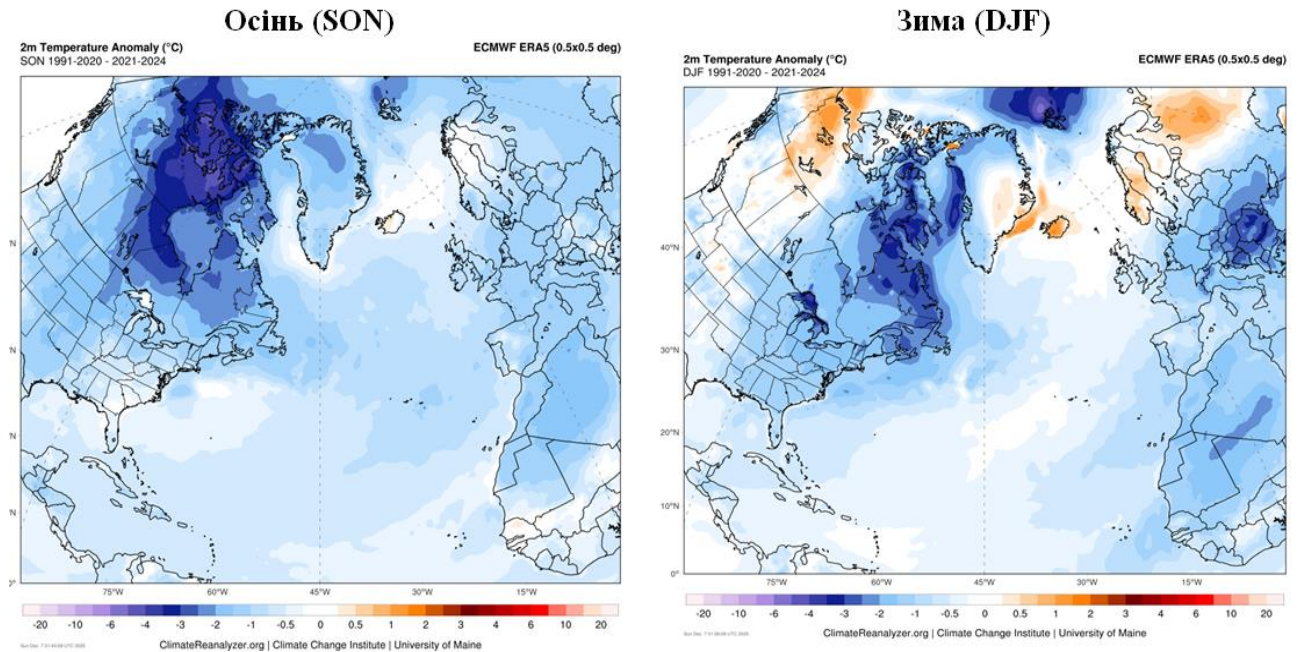


Рис. 4 – Просторові аномалії температури приземного повітря (T2m) у Північній Атлантиці восени (SON) та взимку (DJF) за 2021–2024 рр. відносно кліматичної норми 1991–2020 рр.

Fig. 4 – Spatial anomalies of near-surface air temperature (T2m) in the North Atlantic in autumn (SON) and winter (DJF) for 2021–2024 relative to the 1991–2020 climatic normal

Кліматологічне поле швидкості вітру на 250 гПа за 1991–2020 рр. відображає класичний північноатлантичний потік, який формує динамічний “скелет” штормових траєкторій. Зимовий максимум швидкості простягається смугою від східного узбережжя Північної Америки через центральну Атлантику до Західної Європи, з ядром у широтах приблизно 35–50°N. Саме зона входу/виходу струменя та найбільших горизонтальних градієнтів швидкості відповідає основному коридору циклонної активності.

У 2021–2024 рр. конфігурація струменя зберігає загальну орієнтацію, проте аномалії швидкості на 250 гПа мають дипольну структуру: у субполярній Атлантиці та біля Гренландії фіксується посилення струменя, а на окремих ділянках східної Атлантики і над Європейським сектором спостерігається ослаблення швидкості.

Тобто в сучасний період вісь і зона найбільшої інтенсивності струменя локально зміщується до півночі та стає більш хвилястою, що є динаміч-

ною передумовою для зсувів та перебудови шляхів штормів.

4. ВИСНОВКИ

Аналіз кліматологічних середніх полів SST свідчить про стійке потепління Північної Атлантики при переході від кліматичного періоду 1961–1990 до 1991–2020 рр., яке додатково посилюється у 2021–2024 рр. Найбільш інтенсивне зростання температури поверхні океану просторово асоційоване з фронтальною системою Гольфстріму та Північно-Атлантичної течії.

Усереднені аномалії SST за 2021–2024 рр. підтверджують переважання додатного температурного фону на більшій частині акваторії Північної Атлантики, з максимумами у фронтальній зоні Гольфстріму та мінімальними значеннями у межах субполярного кругооберту, де зберігається область ослабленого потепління або відносного охолодження.

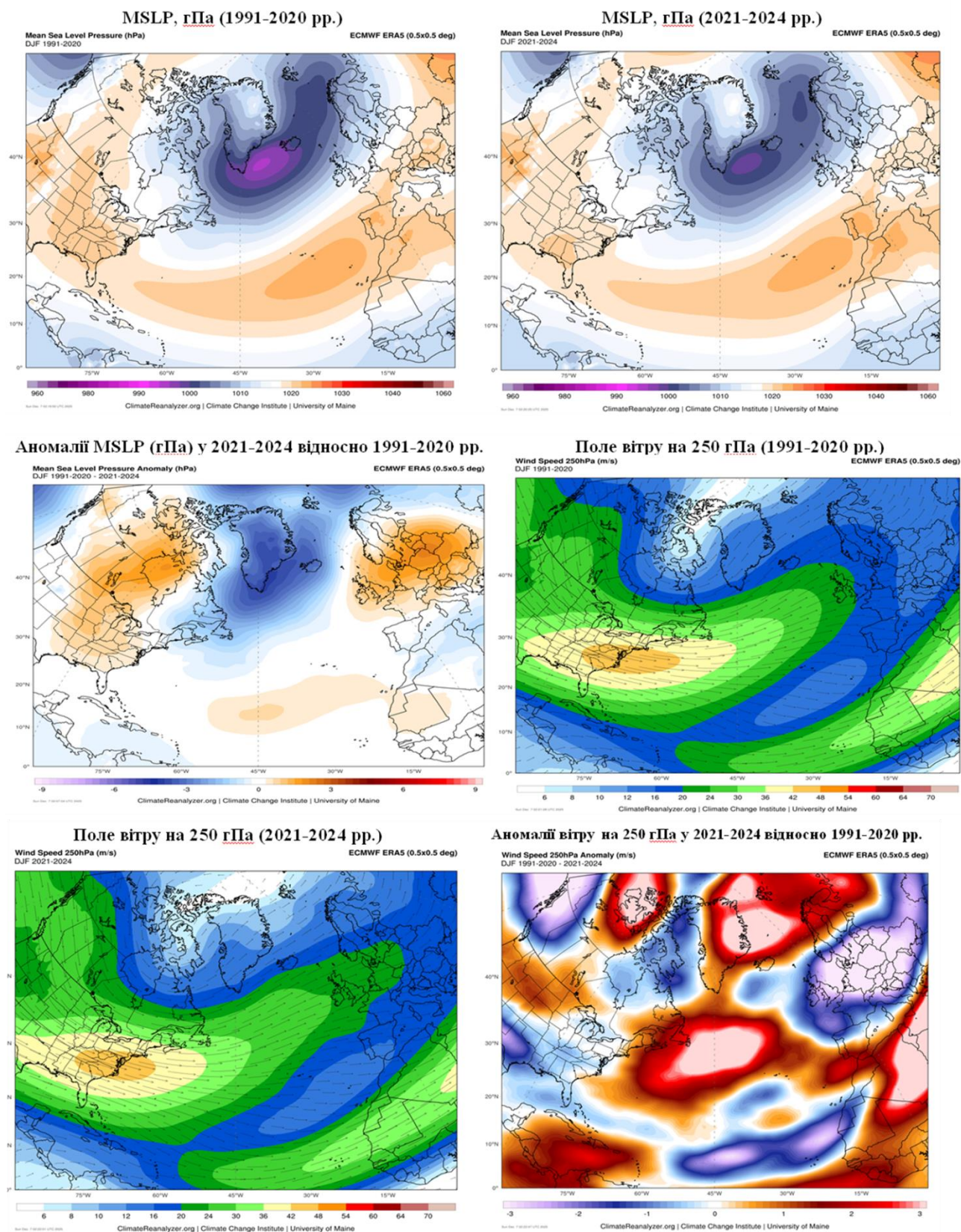


Рис. 5 – Поля середнього атмосферного тиску на рівні моря (MSLP, гПа) та вітру на рівні 250 гПа (250 hPa wind) у Північній Атлантиці взимку 1991-2020 і 2021-2024 pp., та їх просторові аномалії відносно 1991-2020 pp.

Fig. 5 – Fields of mean sea level pressure (MSLP, hPa) and 250-hPa wind in the North Atlantic for winters of 1991–2020 and 2021–2024, and their spatial anomalies relative to 1991–2020

Аномалії SST у 2021–2024 рр. характеризуються чітко вираженою сезонною мінливістю. Восени та взимку переважають слабо від’ємні або квазинейтральні відхилення, тоді як весняний сезон відповідає максимуму додатних аномалій у фронтальній зоні Гольфстріму. Влітку спостерігається північне зміщення зон максимального потепління до субполярного сектору, що відображає сезонну перебудову термічної структури поверхневих вод Північної Атлантики.

Посилення меридіонального термічного контрасту між субтропічними та субполярними широтами, а також сезонно-контрастна перебудова полів SST, потенційно впливають на бароклініст атмосфери та енергетику позатропічного циклогенезу.

Просторове положення та інтенсивність штормової зони визначаються конфігурацією Ісландського мінімуму та смугою максимальних швидкостей струминної течії. У 2021–2024 рр. ця система зберігає активний характер, однак супроводжується від’ємними аномаліями приземного атмосферного тиску в центральному субполярному басейні та підвищеним тиском на його периферії.

ПОДЯКА

Автор висловлює подяку рецензентам та редакційній колегії Журналу за критичні зауваження до тексту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Cohen J., Screen J., Furtado J., Barlow M., Whittleston D., Coumou D., Francis J., Dethloff K., Entekhabi D., Overland J. & Jones J. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geoscience*. 2014. 7 (9), Pp. 627–637. <https://doi.org/10.1038/ngeo2234>
2. Shaw T., Baldwin M., Barnes E., Caballero R., Garfinkel C.I., Hwang Y.-T., Li C., O’Gorman P.A., Rivière G., Simpson I.R., & Voigt A. Storm track processes and the opposing influences of climate change. *Nature Geoscience*. 2016. 9 (9), Pp. 656–664. <https://doi.org/10.1038/ngeo2783>
3. Woollings T., Hannachi A., Hoskins B. Variability of the North Atlantic eddy-driven jet stream. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2010. 136 (649), Pp. 856–868. <https://doi.org/10.1002/qj.625>
4. Zappa G., Hawcroft M.K., Shaffrey L., Black E., Brayshaw D.J. Extratropical cyclones and the projected decline of winter Mediterranean precipitation in the CMIP5 models. *Climate Dynamics*. 2015. 45 (7), Pp. 1727–1738. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2426-8>
5. Hemer M.A., Fan Y., Mori N., Semedo A., Wang X.L. Projected changes in wave climate from a multi-model ensemble. *Nature Climate Change*. 2013. 3 (5), Pp. 471–476. <https://doi.org/10.1038/nclimate1791>
6. Wolf J., Woolf D.K. Waves and climate change in the North-East Atlantic. *Geophysical Research Letters*. 2006. 33 (6). <https://doi.org/10.1029/2005GL025113>
7. Bricheno L.M., Woolf D., Valiente N.G., Makrygianni N., Chowdhury P., Timmermans B. Climate change impacts on

- storms and waves relevant to the UK and Ireland. *MCCIP Science Review*, 2025, 24 pp. <https://doi.org/10.14465/2025.reu09.str>
8. Smith L.C., Stephenson S.R. New trans-Arctic shipping routes navigable by midcentury. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2013. 110 (13), Pp. E1191–E1195. <https://doi.org/10.1073/pnas.1214212110>
 9. Rogers J. C. North Atlantic storm track variability and its association to the North Atlantic Oscillation and climate variability of Northern Europe // *Journal of Climate*. – 1997. 10 (7). Pp. 1635–1647. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<1635:NASTVA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<1635:NASTVA>2.0.CO;2)
 10. Pinto J. G., Raible C. C. Past and recent changes in the North Atlantic oscillation. *WIREs Climate Change*. 2011. 3 (1). Pp. 79–99. DOI: <https://doi.org/10.1002/wcc.150>
 11. Rousi, E., F. Selden, S. Rahmstorf, & D. Coumou. Changes in North Atlantic Atmospheric Circulation in a Warmer Climate Favor Winter Flooding and Summer Drought over Europe. *Journal of Climate*. 34 (6). P. 2277–2295. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0311.1>
 12. Xie X., Jia Y., Han Z. The Gulf Stream Front Amplifies Large-Scale SST Feedback to the Atmosphere in North Atlantic Winter. *Atmosphere*. 2023. Vol. 14, p. 1758. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos14121758>
 13. Chang E. K. M., Ma C.-G., Zheng C. Effects of model horizontal resolution on Northern Hemisphere winter storm tracks. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. – 2023. Vol. 15. Article e2023MS003652. DOI: <https://doi.org/10.1029/2023MS003652>
 14. Climate Reanalyzer [Електронний ресурс]. – Climate Change Institute, University of Maine, 2024. URL: https://climatoreanalyzer.org/research_tools/monthly_maps/ (Дата звернення: 20.11.2025).
 15. Real Statistics Using Excel [Електронний ресурс]. URL: <https://real-statistics.com/> (Дата звернення: 20.12.2025).
 16. Gervais M., Shaman J., Kushnir Y. Impacts of the North Atlantic Warming Hole in Future Climate Projections: Mean Atmospheric Circulation and the North Atlantic jet. *Journal of Climate*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0647.1>

REFERENCES

1. Cohen, J., Screen, J.A., Furtado, J.C., Barlow, M., Whittleston, D., Coumou, D., Francis, J., Dethloff, K., Entekhabi, D., Overland, J., & Jones, J. (2014). Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geoscience*, 7 (9), pp. 627–637. <https://doi.org/10.1038/ngeo2234>
2. Shaw, T. A., Baldwin, M., Barnes, E.A., Caballero, R., Garfinkel, C.I., Hwang, Y.-T., Li, C., O’Gorman, P.A., Rivière, G., Simpson, I.R., & Voigt, A. (2016). Storm track processes and the opposing influences of climate change. *Nature Geoscience*, 9 (9), pp. 656–664. <https://doi.org/10.1038/ngeo2783>
3. Woollings, T., Hannachi, A., & Hoskins, B. (2010). Variability of the North Atlantic eddy-driven jet stream. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136 (649), pp. 856–868. <https://doi.org/10.1002/qj.625>
4. Zappa, G., Hawcroft, M.K., Shaffrey, L., Black, E., & Brayshaw, D.J. (2015). Extratropical cyclones and the projected decline of winter Mediterranean precipitation in the CMIP5 models. *Climate Dynamics*, 45(7), pp. 1727–1738. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2426-8>
5. Hemer, M.A., Fan, Y., Mori, N., Semedo, A., & Wang, X. L. (2013). Projected changes in wave climate from a multi-model ensemble. *Nature Climate Change*, 3(5), pp. 471–476.

- <https://doi.org/10.1038/nclimate1791>
6. Wolf, J., Woolf, D.K. (2006). Waves and climate change in the North-East Atlantic. *Geophysical Research Letters*, 33 (6), <https://doi.org/10.1029/2005GL025113>
 7. Bricheno, L.M., Woolf, D., Valiente, N.G., Makrygianni, N., Chowdhury, P., & Timmermans, B. Climate change impacts on storms and waves relevant to the UK and Ireland. *MCCIP Science Review*, 2025, 24 pp. <https://doi.org/10.14465/2025.reu09.str>
 8. Smith, L. C., & Stephenson, S. R. (2013). New trans-Arctic shipping routes navigable by midcentury. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110 (13), E1191–E1195. <https://doi.org/10.1073/pnas.1214212110>
 9. Rogers, J. C. (1997). North Atlantic storm track variability and its association to the North Atlantic Oscillation and climate variability of Northern Europe. *Journal of Climate*, 10(7), 1635–1647. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<1635:NASTVA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<1635:NASTVA>2.0.CO;2)
 10. Joaquim G. Pinto, Christoph C. Raible. (2011). Past and recent changes in the North Atlantic oscillation. *WIREs Climate Change*, 2, 79–99. <https://doi.org/10.1002/wcc.150>
 11. Rousi, E., F. Selten, S. Rahmstorf, & D. Coumou, (2021): Changes in North Atlantic Atmospheric Circulation in a Warmer Climate Favor Winter Flooding and Summer Drought over Europe. *J. Climate*, 34 (6), 2277–2295, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0311.1>
 12. Xie, X.; Jia, Y.; Han, Z. (2023) The Gulf Stream Front Amplifies Large-Scale SST Feedback to the Atmosphere in North Atlantic Winter. *Atmosphere*, 14, 1758. <https://doi.org/10.3390/atmos14121758>
 13. Zhaoying Wang, Mingkui Li, Shaoqing Zhang, R. Justin Small, Lv Lu, Man Yuan, Jianlin Yong, Xiaopei Lin, Lixin Wu (2023) The Northern Hemisphere Wintertime Storm Track Simulated in the High-Resolution Community Earth System Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 15 (10), e2023MS003652. <https://doi.org/10.1029/2023MS003652>
 14. Climate Reanalyzer. – Climate Change Institute, University of Maine, 2024. URL: https://climatoreanalyzer.org/research_tools/ (Accessed: 20.11.2025).
 15. Real Statistics Using Excel. URL: <https://real-statistics.com/> (Accessed: 20.12.2025).
 16. Gervais Melissa, Shaman Jeffrey, Kushnir Yochanan (2019) Impacts of the North Atlantic Warming Hole in Future Climate Projections: Mean Atmospheric Circulation and the North Atlantic jet. *Journal of Climate*, 2019; <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0647.1>

CHANGES IN METEOROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE NORTH ATLANTIC UNDER GLOBAL WARMING

A. B. Semerhei-Chumachenko, V. V. Shehel

*Odesa I. I. Mechnikov National University,
2 Vsevoloda Zmiienka Street, Odesa 65082, Ukraine, alina.semerhei-chumachenko@onu.edu.ua*

Trends in the ocean–atmosphere conditions of the North Atlantic under global warming, manifested since the second half of the 20th century and intensified in the early 21st century, are identified, and their relationship with storm activity is examined. Using data from the Climate Reanalyzer platform, the spatiotemporal variability of sea surface temperature, near-surface air temperature, the thermal contrast between the ocean and the atmosphere (defined as the difference between sea surface temperature and near-surface air temperature), mean sea level pressure, and wind fields at 250 hPa, which characterize the position and intensity of the jet stream, was analyzed.

Relative to the 1961–1990 climate baseline, sea surface temperature anomalies during 2021–2024 indicate widespread warming across the North Atlantic, with maximum values along the Gulf Stream and the North Atlantic Current. In contrast, anomalies relative to the 1991–2020 baseline are weaker and more spatially heterogeneous, with a persistent region of reduced warming in the subpolar North Atlantic. Seasonal analysis reveals springtime maxima along the Gulf Stream, a northward displacement of warm anomalies in summer, and predominantly weak or negative anomalies in autumn and winter.

Long-term records (1940–2024) indicate accelerated warming since the 1990s, with near-surface air temperature increasing more rapidly than sea surface temperature, leading to a reduction in the ocean–atmosphere thermal contrast, particularly during winter.

Wintertime (2021–2024) pressure fields exhibit negative mean sea level pressure anomalies over the central subpolar North Atlantic and higher pressure along the basin periphery, suggesting a concentration and partial reorganization of the extratropical storm track. Corresponding 250-hPa wind anomalies indicate localized jet strengthening and a northward displacement of the jet axis.

Keywords: North Atlantic, climate change, sea surface temperature, storm, ocean–atmosphere thermal contrast, trend.

*Подання до редакції : 08. 12. 2025
Надходження остаточної версії : 21. 12. 2025
Публікація статті : 23. 12. 2025*