

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І.І. МЕЧНИКОВА

Факультет гідрометеорології і екології

Кафедра океанології та морського природокористування

Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

**ТРОПІЧНІ ЦИКЛОНИ. ПРИЧИНИ ФОРМУВАННЯ ТА ЇХ
РОЗВИТОК
TROPICAL CYCLONES. CAUSES OF FORMATION AND THEIR
DEVELOPMENT**

Виконав: здобувач денної форми навчання
спеціальності Е4 «Науки про Землю»
Освітньо-професійна програма Гідрометеорологія

Маковецький Андрій Русланович

(прізвище, ім'я, по-батькові здобувача)

Керівник ст.викладач Дерик О.В.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент к. геогр. н., доц. Катинська І.В.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

Рекомендовано до захисту:
Протокол засідання кафедри
агromетеорології та агроєкології
№ ____ від _____. 2025 р.

Захищено на засіданні ЕК № 2
протокол № ____ від _____. 2025 р.

Оцінка _____ / _____ / _____
(за національною шкалою/шкалою ECTS/ бали)

Голова ЕК

Завідувач кафедри

Микола БЕРЛІНСЬКИЙ

(підпис)

(прізвище, ім'я)

(підпис)

Валерія ОВЧАРУК

(прізвище, ім'я)

Одеса 2025

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	3
ВСТУП.....	4
1 ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРОПІЧНИХ ЦИКЛОНІВ	5
1.1 Основні характеристики та визначення	5
1.2 Формування та розвиток тропічних циклонів.....	7
2 ТРОПІЧНІ ЦИКЛОНИ В ПІВНІЧНІЙ ЧАСТИНІ АТЛАНТИЧНОГО ОКЕАНУ	11
2.1 Загальні характеристики траєкторій тропічних циклонів в атлантичному басейні	11
2.2 Райони зародження та траєкторії тропічних циклонів в Атлантиці	12
3 ВИВЧЕННЯ ДИНАМІКИ ТРОПІЧНИХ ЦИКЛОНІВ У БАСЕЙНІ АТЛАНТИЧНОГО ОКЕАНУ ПРОТЯГОМ 2022-2023 РОКІВ	17
3.1 Формування та розвиток урагану Ian у вересні 2022 року	17
3.2 Формування та розвиток урагану Lee у вересні 2023 року	25
3.3 Аномалії температурного балансу Атлантичного океану	33
4 ВПЛИВ ПОГОДИ НА ТРАЄКТОРІЮ РУХУ СУДЕН В АТЛАНТИЦІ	42
4.1 Характеристики мета-океану та його вплив на судноплавство	42
4.2 Вплив погодних умов на траєкторію суден.....	43
ВИСНОВКИ.....	47
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	49

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

США - Сполучені Штати Америки

ТЦ - Тропічний циклони

РМВ - Радіус максимального вітру

ТПМ - Температура поверхні моря

АБВ - Атлантична багаторічна варіативність

ЕКНІС - Електронно-картографічна навігаційно-інформаційна система

ВСТУП

Тропічні циклони є одними з найруйнівніших сил природи. Зародження таких циклонів в Атлантичному басейні завжди є складним і важливим природним фактором. Урагани мають вплив на кліматичні умови на Землі, економіку різних країн, та безпеку людства. Особливо вразливими до тропічних циклонів є прибережні та острівні території у тропічних регіонах світу. Саме ці території найбільш страждають від потужних вітрів та штормових нагонів, які можуть спричинити значні руйнування майна та принести багато людських жертв.

Тропічні циклони частіше всього зароджуються в тропічному поясі західніше узбережжя Африки. Рухаються вони в західному напрямку, стаючи все потужнішими через теплу воду в Атлантичному басейні. Сила урагану напряму залежить від температури океану, зсувів вітрів, а також вологовмісних умов атмосфери. Після того, як циклон виходить на сушу, він починає слабшати через нестачу вологи та взаємодію із суходолом. Сучасні методи дослідження, такі як аналіз супутникових знімків і числове моделювання, відкривають нові можливості для виявлення закономірностей у поведінці циклонів.

Актуальність теми обумовлена зростанням частоти та інтенсивності ураганів, які мають значний вплив на безпеку населення та економіку прибережних регіонів. У зв'язку з глобальними змінами клімату, вивчення механізмів формування тропічних циклонів набуває особливого значення для підвищення ефективності прогнозування та зменшення наслідків стихійних лих. Зокрема, актуальним є аналіз умов Атлантичного басейну, де спостерігається підвищена активність таких явищ.

Мета даної дипломної роботи полягає у вивченні процесів зародження та розвитку тропічних циклонів у Атлантичному басейні. У роботі детально розглянуто як виникають і розвиваються тропічні циклони, як впливають на кліматичні фактори, на безпеку людей у острівних регіонах та прибережних районах, а також на судноплавство у районах проходження тропічних циклонів. Також мета включає в себе аналіз факторів, які сприяють формуванню явищ, таких як температура, зсуви вітру та загальні погодні умови.

1 ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРОПІЧНИХ ЦИКЛОНІВ

1.1 Основні характеристики та визначення

Термін «циклон» походить від грецького слова, що означає «змія», і вперше був використаний Генрі Піддінгтоном для позначення великих штормів в Індії у 1830-х роках. Він означає великомасштабну (діаметром кілька сотень кілометрів і більше) атмосферний вихор зі зниженим тиском у центрі та круговим рухом повітря навколо нього. Основні сили та рухи повітря в циклоні наступні. Як тільки в атмосфері з'являється область зниженого тиску атмосфері, повітря прагне переміститися в цю область з навколишньої зони з більш високим тиском, під дією сили градієнта тиску. Однак, оскільки Земля досить швидко обертається навколо своєї осі, в дію вступає так звана сила Коріоліса. Напрямок і абсолютне значення цієї сили можна отримати з векторних рівнянь, але для практичних цілей достатньо пам'ятати, що вона повертає повітряний потік в Північній півкулі праворуч, а в Південній - ліворуч, а її абсолютна величина пропорційна синусу широти (отже, вона дуже мала в приекваторіальній зоні і відсутня на екваторі).

У випадку масштабних атмосферних потоків, що не зазнають впливу тертя, між основними силами - включаючи відцентрову, яка спрямовує повітря від центру обертання - встановлюється баланс. Це призводить до виникнення кругового руху повітря навколо зон пониженого тиску: у Північній півкулі цей рух має напрям проти годинникової стрілки, а в Південній - циклонічний (за годинниковою стрілкою). Наближуючись до земної поверхні - зазвичай у межах нижнього кілометра атмосфери - тертя починає відігравати значну роль, змінюючи напрямок вітру таким чином, що він частково спрямовується до центру низького тиску. Це спричиняє горизонтальну конвергенцію повітря, яка, в свою чергу, сприяє формуванню висхідних потоків - однієї з ключових ознак циклону. На висоті, навпаки, повітря піднімається знизу, створюючи над центром підвищений тиск. Це сприяє розсіюванню повітря назовні, при цьому під дією сили Коріоліса воно відхиляється вправо в Північній півкулі (вліво - у Південній), що веде до

формування антициклону з характерним рухом повітря за годинниковою стрілкою (проти годинникової - у Південній півкулі).

Циклони класифікують різними способами. Але найзагальніший поділ ґрунтується на широті їхнього походження: залежно від неї циклони можна розрізняти як тропічні та позатропічні. Цей поділ, будучи досить формальним на перший погляд, насправді є досить суттєвим, оскільки відображає різницю між двома типами основних фізичних механізмів, що керують циркуляційними системами.

Слово «циклон» також часто використовується як місцевий термін для позначення тропічних циклонів в Індійському океані та прилеглих країнах, а також поблизу північної Австралії. У цій частині світу люди просто не стикаються з іншими типами циклонів (наприклад, позатропічними). В інших регіонах використовуються давно усталені місцеві терміни для тропічних циклонів: «ураган» у Північній Америці та Вест-Індії, «тайфун» у Південно-Східній Азії, а також інші менш поширені терміни, такі як «віллі-віллі» в Австралії та Океанії, «багйо» на Філіппінах та деякі інші. Зазвичай ці терміни застосовуються лише до досить потужних тропічних циклонів, тоді як слабші називають просто «тропічними штормами». Наприклад, слово «ураган» вживається для позначення шторму, швидкість вітру в якому перевищує 33 м/с, а атмосферний тиск у центрі нижчий за 980 гПа. Тропічні циклони є одними з найруйнівніших природних явищ у світі, оскільки приносять величезні обсяги опадів і надзвичайно сильні вітри на великі території, поєднуючись із найпотужнішими хвилями нагону на океанічному узбережжі. [1,5-8,20]

Всі тропічні циклони мають свої імена для полегшення комунікації між синоптиками та широкою громадськістю щодо прогнозів, попереджень і штормових сповіщень. Оскільки такі шторми можуть тривати тиждень або більше, і одночасно може виникати кілька циклонів в одному регіоні, імена допомагають уникнути плутанини щодо того, про який саме шторм йдеться. Згідно з Данном і Міллером (1960), перше використання власного імені для тропічного циклону відбулося завдяки австралійському синоптику на початку ХХ століття.

Список затверджених імен формується в алфавітному порядку за першою літерою імені. Імена чергуються за статтю - чоловічі та жіночі. Кожне ім'я складається з одного слова, зазвичай це власне ім'я. Список поділений на 5 секцій, кожна з яких містить імена від А до Z. Коли циклону потрібно присвоїти ім'я, береться наступне в алфавітному порядку ім'я з тієї секції, яка наразі використовується. Коли список імен у поточній секції закінчується, переходять до першого імені з наступної секції. [15,29]

1.2 Формування та розвиток тропічних циклонів

Тропічні циклони формуються в широтних поясах від 5 до 30° як на північ, так і на південь від екватора, хоча вони можуть переміщатися до 42–45° від екватора. Необхідною умовою для їх виникнення є наявність теплої (не менш ніж 26-28 °С) поверхні океану. Вже давно спостерігають, що циклони зазвичай формуються та розвиваються над водною поверхнею, температура якої не опускається нижче 26 °С; вони не можуть розвиватися над холоднішою водою або сушею. Температура води у північній півкулі стає найвищою влітку та восени, що призводить до формування тропічних циклонів переважно у другій половині літа та восени. У весняний період та в перші місяці літа вони виникають рідко, а відсутні у січні-квітні. Серпень, вересень і жовтень характеризуються найвищою активністю тропічних циклонів.

Ці циклони супроводжуються інтенсивними дощами, затопленнями та формуванням хвиль висотою більше ніж 10 метрів у відкритому морі. Також можна очікувати штормові нагони, дуже сильні вітри та проливні дощі. Всі шторми супроводжуються грозами, які призводять до значних сум опадів, до 100-200 мм за добу, а іноді й більше 300 мм. Швидкість вітру може сягати більше ніж 70 м/с. Радіус сильних вітрів становить ≥ 300 км, а максимальна швидкість вітру спостерігається на висоті приблизно 1 км.

Найчастіше тропічні циклони вражають Мексиканську затоку та західну частину Атлантичного океану (на північ від екватора). Також вони трапляються на

захід від тихоокеанського узбережжя Мексики, на північний схід і північний захід від Австралії, на північний схід від острова Мадагаскар, а також в Аравійському морі. Тропічні циклони виникають порівняно рідко - у середньому близько 50 таких утворень щороку. Основним джерелом енергії тропічного циклону є виділення прихованої теплоти внаслідок конденсації в хмарних вежах типу кучово-дощових (cumulonimbus), розташованих поблизу його теплового ядра. Типова просторова структура зрілого тропічного циклону включає так зване «око шторму» в центрі (область із відносно слабким вітром і лише тонким шаром хмар або взагалі без хмар), оточене гігантськими стінами хмар кучово-дощового типу з найсильнішими вітрами біля поверхні та найінтенсивнішими дощами поблизу них. Спіралеподібні смуги відносно слабких кучово-дощових хмар оточують основне ядро тропічного циклону.

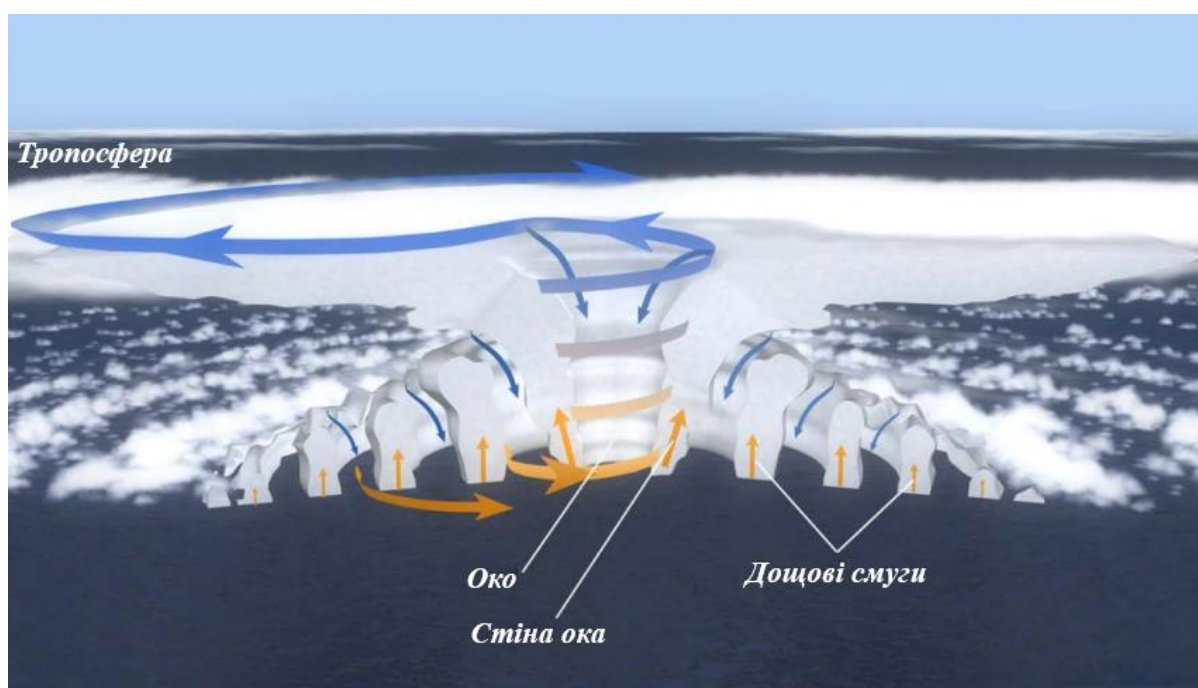


Рисунок 1.1 - Структура тропічного циклону

Позатропічні циклони формуються на широтах понад 30° на північ і південь від екватора, іноді їх називають «депресіями». Вони виникають набагато частіше, ніж тропічні циклони: зазвичай у кожній півкулі щодня спостерігається не менше 30 таких утворень. Позатропічні циклони в основному впливають на майже всі

регіони планети за межами тропіків, хоча їх прояви значно різняться залежно від місцевості: наприклад, поблизу Ісландії циклони спостерігаються майже щодня, тоді як у центрі пустелі Сахара на появу навіть слабого розсіяного циклону можна чекати кілька років. [1,3,5-8,20,28]

Найбільшого поширення набула класифікація тропічних циклонів залежно від швидкості приземного вітру:

- 1) тропічні збурення (tropical disturbance). Слабо виражений тропічний циклон з відносно невеликими швидкостями вітру (менше 17 м/с). На карті погоди відсутні замкнуті ізобари. Вихор простежується за збіжністю ліній струму;
- 2) тропічна депресія (tropical depression). На карті погоди є 1-2 замкнуті ізобари. Сила вітру - 17-20 м/с;
- 3) тропічний шторм (tropical storm). На карті погоди є 2 замкнені ізобари і більше, а сила вітру становить 21-32 м/с;
- 4) ураган (hurricane). Швидкість вітру перевищує 32 м/с. Термін "ураган" еквівалентний терміну "тайфун". Класифікація інтенсивності тропічних циклонів, досить відносна. Окремі циклони можуть пройти всі перераховані вище стадії, але лише невеликий відсоток із них досягає інтенсивності, що відповідає останній стадії.

Існує шкала вітру ураганів Саффіра-Сімпсона. Вона оцінює потенційні пошкодження майна. Хоча всі урагани супроводжуються небезпечними для життя вітрами, урагани категорії 3 і вище класифікуються як потужні урагани. Такі урагани можуть спричинити руйнівні або катастрофічні пошкодження вітром і значні людські жертви лише через силу вітру. Урагани всіх категорій можуть викликати смертельний штормовий нагін, повені, спричинені дощами, а також торнадо. Ці загрози вимагають від людей вживати захисних заходів, зокрема евакуюватися з районів, вразливих до штормових нагонів. Крім того, важливо мати план дій та запас необхідних речей для виживання. Своєчасне реагування допомагає зменшити втрати та забезпечити безпеку населення. Постійне вдосконалення систем оповіщення та підготовка населення до ураганів є ключовими факторами у зниженні ризиків від стихійних лих. [9,16,34]

Категорія	1-хв максимальний постійний вітер			
	м/с	вуз	миля/г	км/г
5	≥ 70 м/с	≥ 137 вуз	≥ 157 м/г	≥ 252 км/г
4	58–70 м/с	113–136 вуз	130–156 м/г	209–251 км/г
3	50–58 м/с	96–112 вуз	111–129 м/г	178–208 км/г
2	43–49 м/с	83–95 вуз	96–110 м/г	154–177 км/г
1	33–42 м/с	64–82 вуз	74–95 м/г	119–153 км/г
<i>ТШ</i>	18–32 м/с	34–63 вуз	39–73 м/г	63–118 км/г
<i>ТД</i>	≤ 17 м/с	≤ 33 вуз	≤ 38 м/г	≤ 62 км/г

Рисунок 1.2 - Шкала Саффіра-Сімпсона

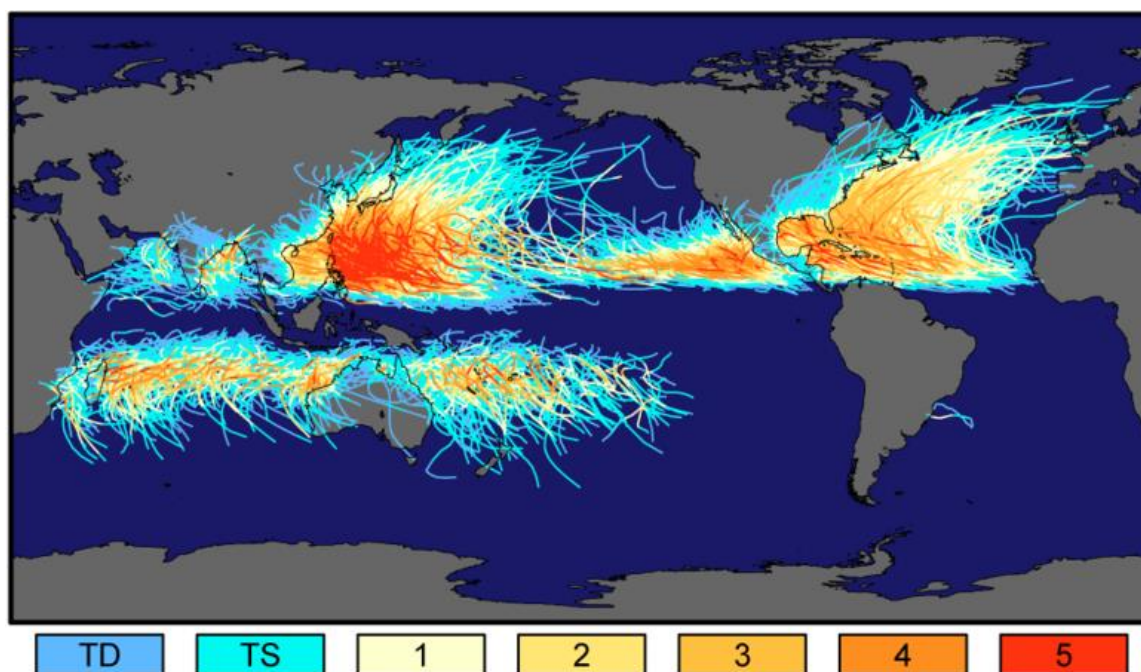


Рисунок 1.3 - Траєкторії та інтенсивності тропічних циклонів за шкалою Саффіра-Сімпсона

2 ТРОПІЧНІ ЦИКЛОНИ В ПІВНІЧНІЙ ЧАСТИНІ АТЛАНТИЧНОГО ОКЕАНУ

2.1 Загальні характеристики траєкторій тропічних циклонів в атлантичному басейні

Іноді тропічні шторми, що зароджуються в Атлантиці, проходять уздовж східного узбережжя Сполучених Штатів або перетинають центральну частину океану, досягаючи високих широт і навіть таких регіонів, як Європа, Ісландія чи Гренландія. На початковому етапі свого розвитку ці погодні системи зазвичай прямують у західному напрямку поблизу екватора, орієнтуючись на розташування субтропічних антициклонів. Згодом, наближаючись до їх західної межі, циклони змінюють свій маршрут і починають рухатися на схід, прямують у напрямку полярних широт. Цей процес відображає складну взаємодію атмосферних потоків і температурних зон. В результаті, вплив тропічних штормів може поширюватися далеко за межі їх місця виникнення, викликаючи значні погодні зміни в регіонах, віддалених від тропічної зони. [16]

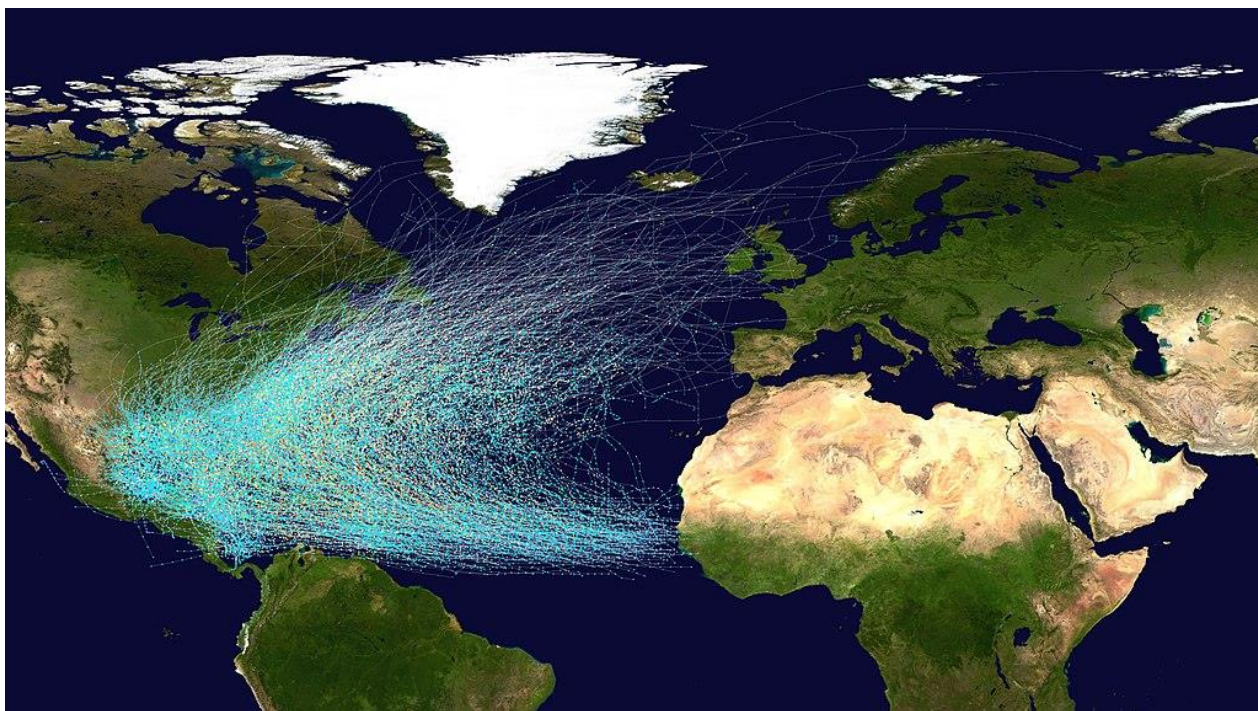


Рисунок 2.1 - Маршрути північноатлантичних тропічних циклонів з 1851 по 2019 рік

2.2 Райони зародження та траєкторії тропічних циклонів в Атлантиці

Офіційний сезон ураганів в Атлантичному басейні, який включає Атлантичний океан, Карибське море та Мексиканську затоку, триває з 1 червня до 30 листопада. Кліматичний пік сезону припадає приблизно на 10 вересня, що видно на рисунку 2.2. Існує також другий, менш виражений пік приблизно в середині жовтня, який переважно стосується регіонів Карибського моря та Мексиканської затоки. Після цього другого піку кількість штормів швидко зменшується до завершення сезону. [4,20,30]

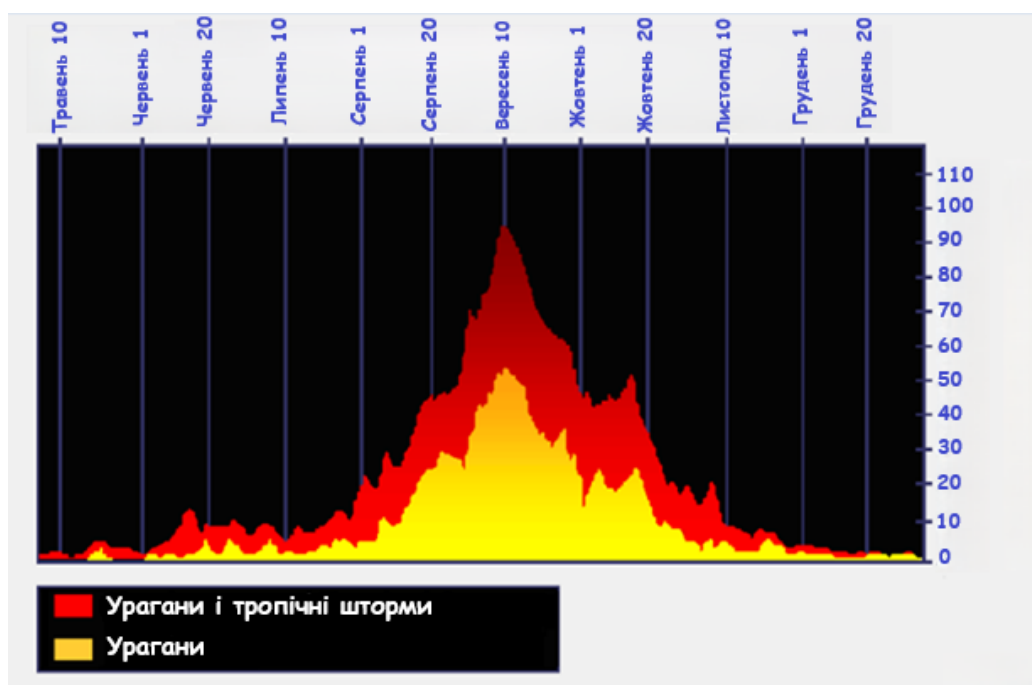


Рисунок 2.2 - Кількість штормів в Атлантичному басейні за останні 100 років

Цей графік показує обсяг тропічної циклонічної активності - за кількістю іменованих штормів та ураганів - у басейнах Атлантики та східної частини Тихого океану для кожного календарного дня в період з 1 травня по 31 грудня. Зокрема, вони ілюструють кількість ураганів (жовта зона) та загальну кількість іменованих штормів разом з ураганами (червона зона), які траплялися в кожен день року протягом 100-річного періоду. Ця інформація допомагає краще розуміти сезонні тенденції та пік активності тропічних циклонів у цих регіонах.

Тропічні циклони в Атлантичному басейні утворюються виключно в північній частині океану. Національний центр ураганів США веде моніторинг цього басейну та надає звіти, години і попередження про непогоду. Він є одним з регіональних спеціалізованих метеорологічних центрів для тропічних циклонів у Північноатлантичному басейні, згідно з Всесвітньою метеорологічною організацією. Прогнозування тропічних циклонів є надзвичайно важливими для своєчасного попередження населення і зменшення збитків.

Наступні кілька схем (рис.2.3-2.8) показують райони зародження та переважні траєкторії ураганів для кожного місяця ураганного сезону. З червня по серпень зони виникнення циклонів зміщуються з Карибського моря та Мексиканської затоки в Атлантичний океан, оскільки температура води підвищується, і атмосферні збурення, що надходять із західного узбережжя Африки, можуть легше формуватися.

В осінні місяці траєкторії ураганів відрізняються від літніх. Спочатку урагани наближаються до узбережжя США та Канади, потім повертають і рухаються у напрямку північного сходу. Інтенсивність тропічних циклонів також зазвичай зростає на фоні теплих вод Атлантики та сприятливих атмосферних умов.

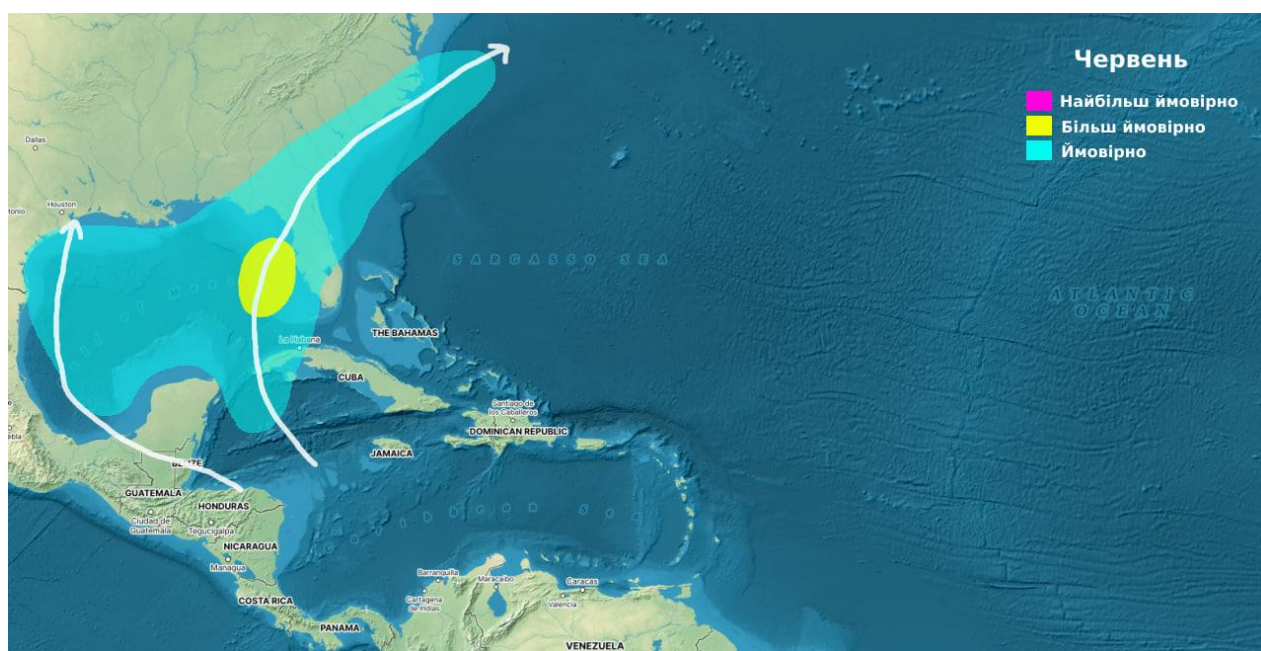


Рисунок 2.3 - Переважаючі напрями руху та райони зародження тропічних циклонів в атлантичному басейні, червень

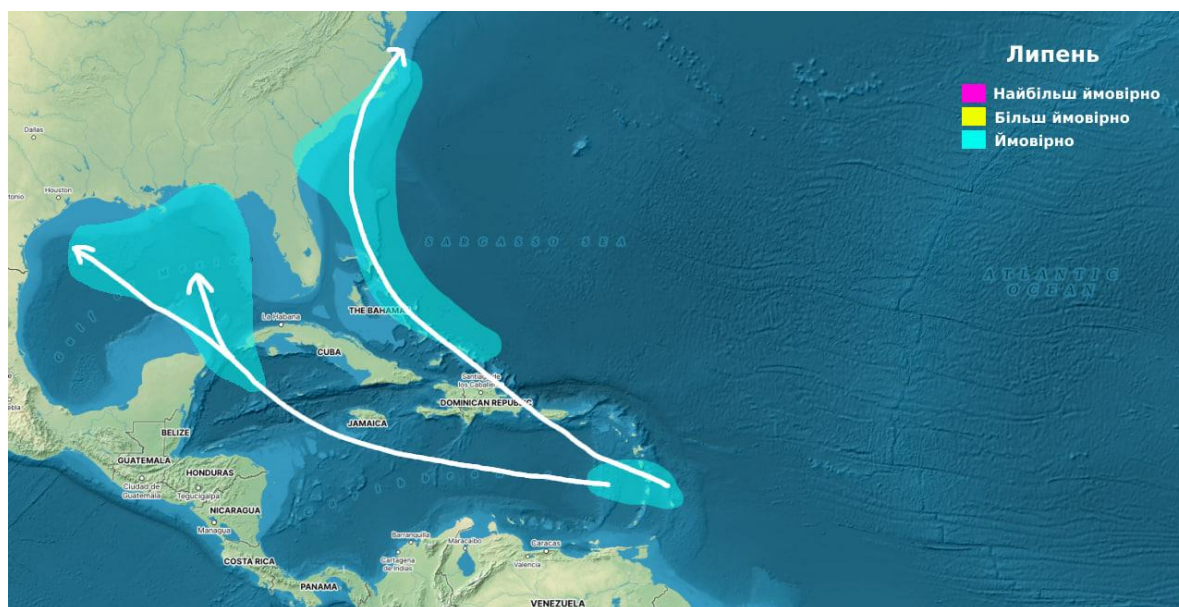


Рисунок 2.4 - Переважаючі напрями руху та райони зародження тропічних циклонів в атлантичному басейні, липень

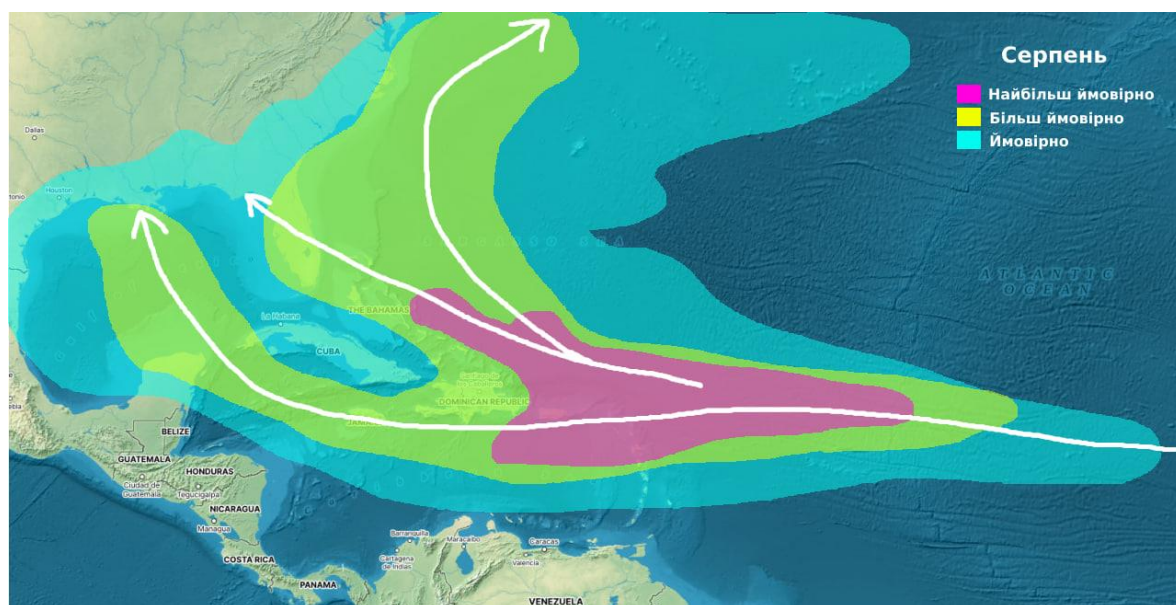


Рисунок 2.5 - Переважаючі напрями руху та райони зародження тропічних циклонів в атлантичному басейні, серпень

У червні, липні та серпні (рис. 2.3-2.5) циклони найчастіше виникають у Карибському морі та Мексиканській затоці, поступово зміщуючись в бік відкритого Атлантичного океану, ближче до західного узбережжя Африки. Це пов'язано з поступовим підвищенням температури води, що створює сприятливі умови для формування штормів зі східноафриканських атмосферних збурень.

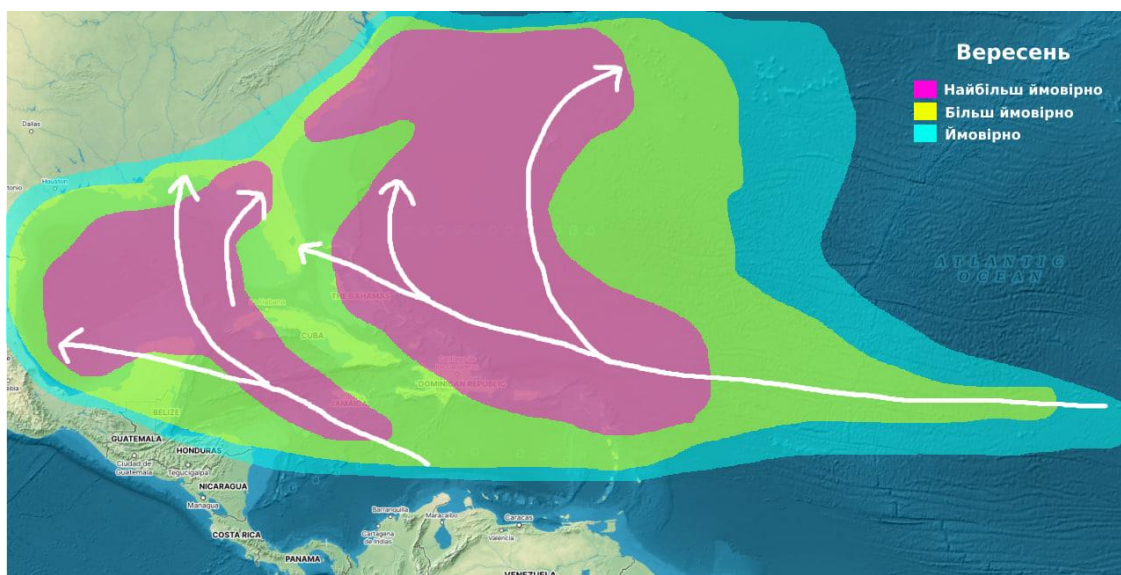


Рисунок 2.6 - Переважаючі напрями руху та райони зародження тропічних циклонів в атлантичному басейні, вересень

У вересні (рис. 2.6) спостерігається пік активності, коли велика частина ураганів зароджується вже у великій частині Атлантичного басейну. У міру просування сезону до жовтня температура води в Атлантичному океані починає знижуватися, а вертикальний зсув вітру зростає, тому основна частина тропічної активності знову зміщується до Карибського моря та Мексиканської затоки, де вода зазвичай залишається дуже теплою.

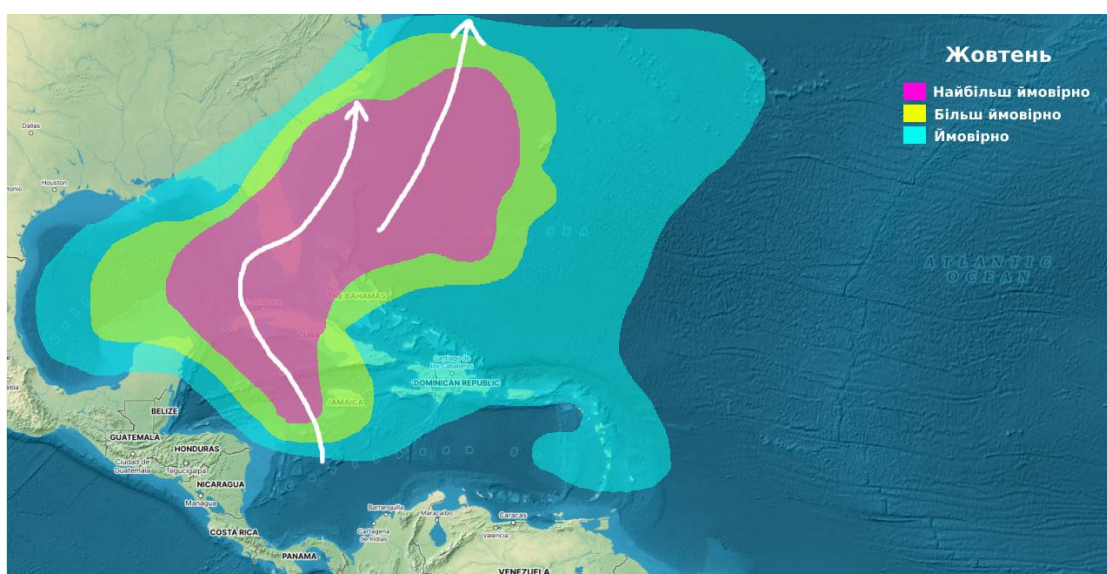


Рисунок 2.7 - Переважаючі напрями руху та райони зародження тропічних циклонів в атлантичному басейні, жовтень

У жовтні (рис.2.7) більшість тропічних циклонів зароджується в Карибському морі або Мексиканській затоці та рухається спочатку на північ, а потім на північний схід, оскільки шторм зазвичай підхоплюється східним атмосферним жолобом. Залежно від конкретних умов, така ситуація часто призводить до наближення тропічних циклонів до штату Флорида.

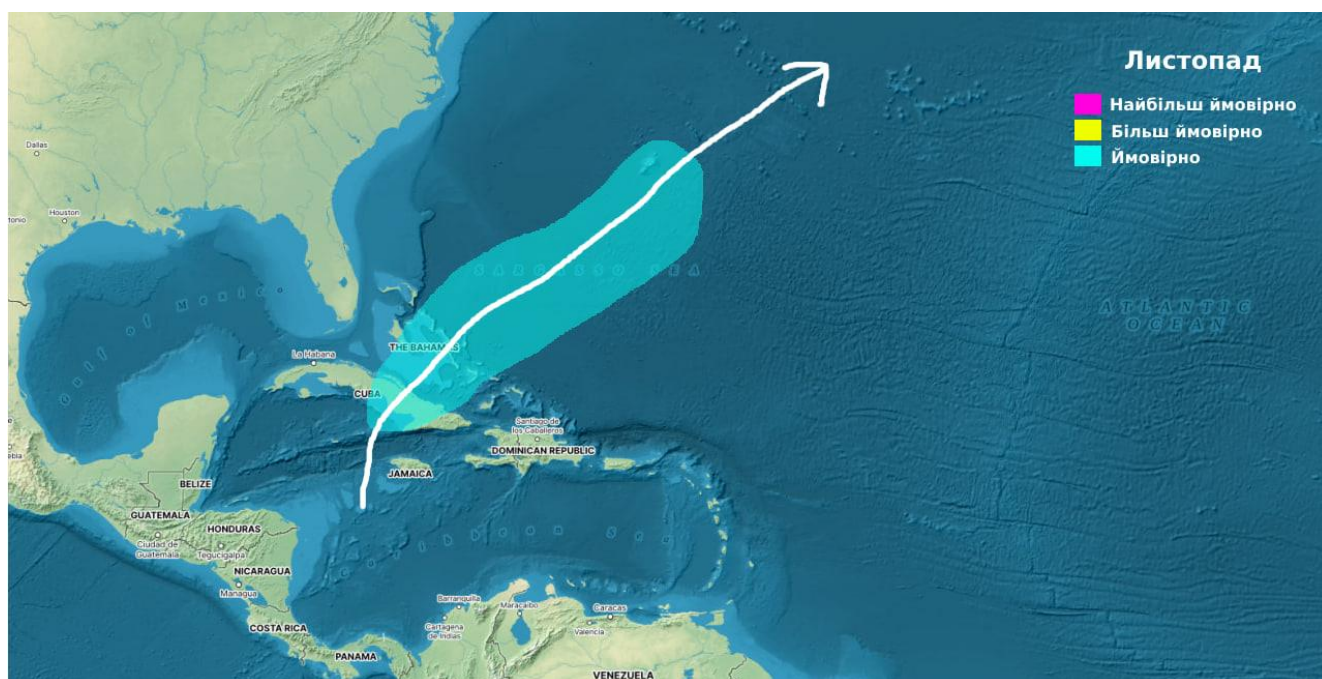


Рисунок 2.8 - Переважаючі напрями руху та райони зародження тропічних циклонів в атлантичному басейні, листопад

У листопаді (рис. 2.8) циклонічної активності майже немає, але деякі випадки зародження слабких штормів можливі. Траєкторія тропічних циклонів залишається подібною до жовтня, тобто північно-східна.

На протязі всього сезону спостерігаються помітні зміни у місцях зародження та траєкторії руху тропічних циклонів. Пов'язано це з тим, що вода з кожним місяцем сезону стає все тепліше, і тропічним циклонам стає набагато легше перетворюватись на потужні шторми. Але у жовтні, коли вода починає охолоджуватися, формування циклонів переноситься ближче до материка, у Карибське море та Мексиканську затоку. У листопаді формування циклонів майже зупиняється і тим самим закінчується сезон атлантичних ураганів. [4,17,20,30]

З ВИВЧЕННЯ ДИНАМІКИ ТРОПІЧНИХ ЦИКЛОНІВ У БАСЕЙНІ АТЛАНТИЧНОГО ОКЕАНУ ПРОТЯГОМ 2022-2023 РОКІВ

3.1 Формування та розвиток урагану Ian у вересні 2022 року

У період з 14 по 15 вересня тропічна хвиля вийшла в Атлантику з західного узбережжя Африки і рухалася на захід протягом декількох днів, супроводжуючись неорганізованими зливами і грозами. Хоча система отримала додаткову конвекцію після досягнення південно-східної частини Карибського басейну 21 вересня, зсув вітру завадив її подальшому розвитку. Однак о 06:00 UTC 23 вересня тропічна депресія сформувалася приблизно за 240 км на схід-північний схід від Аруби. (рис.3.4) Депресія перемістилася на захід-північний захід через хребет середнього рівня і на початку наступного дня посилилася, перетворившись на тропічний шторм "Ian".

Тропічний цикллон Ian сформувався о 00:00 UTC 24 вересня, коли він знаходився за 335 морських миль на південний схід від Ямайки, що збіглося з субтропічним гребнем, який повертав ТЦ Ian на захід.

Помірний і сильний вертикальний зсув вітру спочатку обмежував посилення ТЦ Ian, перешкоджаючи вирівнюванню центрів низького і середнього рівнів, поки шторм рухався над Карибським морем на південь від Ямайки. Рано вранці 25 вересня шторм повернув на північний захід, а пізніше того ж дня конвекція біля ядра ТЦ "Ian" почала об'єднуватися. Перший період швидкого посилення ТЦ "Ian" розпочався о 18:00 UTC 25 вересня, коли він рухався по південно-західній периферії вищезгаданого хребта. До 06:00 UTC 26 вересня ТЦ "Ian" перетворився на ураган, пройшовши приблизно за 100 морських миль на південний захід від острова Великий Кайман. Шторм продовжував швидко посилюватися над теплими водами (30°C і вище) і в умовах низького вертикального зсуву вітру, коли він повернув на північ до Куби. Ураган "Ian" продовжував швидко посилюватися, наближаючись до південно-західного узбережжя Куби, і до 06:00 UTC 27 вересня перетворився на сильний ураган. Через кілька годин шторм досяг берега поблизу

Ла-Коломи в провінції Пінар-дель-Ріо о 08:30 UTC 27 вересня як ураган категорії 3 з максимальними поривами вітру 204 км/год та мінімальним тиском 947 гПа.

Під час проходження над Кубою ураган "Ian" лише трохи ослаб, і центр урагану з'явився над південно-східною частиною Мексиканської затоки близько 14:00 UTC 27 вересня. Атмосферні та океанічні умови залишалися дуже сприятливими для подальшого посилення шторму в міру його просування на північ-північний схід між західною стороною субтропічного хребта і широкою улоговиною над східними Сполученими Штатами. Незабаром після входу в затоку розпочався цикл заміни стін ока. Ця структурна зміна призвела до збільшення радіусу максимального вітру (РМВ), розширення загального вітрового поля і, на диво, до незначного збільшення інтенсивності після завершення циклу заміни очної оболонки. О 02:00 UTC 28 вересня око урагану з силою вітру 204 км/год та мінімальним тиском 952 гПа пройшло безпосередньо над Сухими Тортугами.

Після ранку ураган «Ian» ще більше посилювався і досяг своєї пікової інтенсивності з максимальними поривами вітру 260 км/год та мінімальним тиском 937 гПа у центрі (ураган 5 категорії) о 12:00 UTC 28 вересня.

Незабаром після цього природні умови стали менш сприятливими, і ураган «Ian» дещо ослаб протягом наступних кількох годин, перш ніж впав на бар'єрний острів Кайо-Коста, штат Флорида, о 19:05 UTC 28 вересня з інтенсивністю 240 км/год та мінімальним тиском 941 гПа. Через півтори години, о 20:35 UTC, центр великого ока Яна зробив ще одне приземлення біля Пунта-Горда, Флорида, з оціночною інтенсивністю 230 км/год та мінімальним тиском 945 гПа.

Циклон поступово слабшав, рухаючись на північний схід через півострів Флорида наприкінці того ж дня і вночі, і перетворився на тропічний шторм з максимальним стійким вітром 110 км/год та мінімальним тиском 987 гПа о 12:00 UTC 29 вересня, якраз тоді, коли його центр з'являвся над водами Атлантики біля мису Канаверал, штат Флорида. Перебуваючи над західною Атлантикою, ТЦ «Ian» знову посилювався до 120 км/год до 18:00 UTC 29 вересня, причому більша частина його конвекції змістилася на північ від центру, в той час як ураган взаємодіяв з улоговиною над східними Сполученими Штатами. Рано вранці 30 вересня ТЦ «Ian»

повернув на північ і почав прискорюватися до узбережжя Південної Кароліни. Ураган досягнув свого остаточного узбережжя поблизу Джорджтауна, Південна Кароліна, з інтенсивністю 130 км/год та мінімальним тиском 978 гПа о 18:05 UTC 30 вересня.

Невдовзі після виходу на сушу ТЦ «Ian» злився з фронтом над Північною Кароліною, що ознаменувало його перетворення на позатропічний циклони до 00:00 UTC 1 жовтня, коли він рухався вглиб континенту. До 12:00 UTC того ж дня наземні, радіолокаційні та супутникові зображення показали, що ТЦ «Ian» розвіявся, а на північному сході сформувався окремий середньовиротний мінімум.

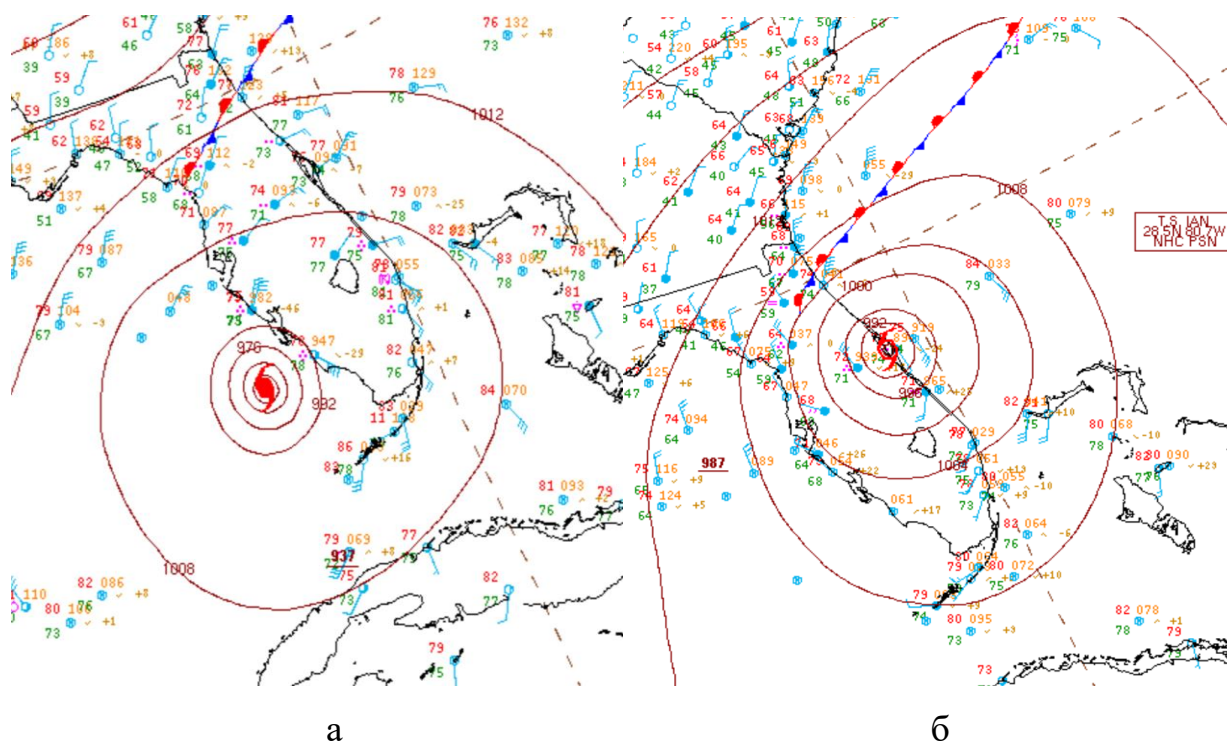


Рисунок 3.1 - Приземний аналіз: (а) – 28.09.2022, 12:00 UTC і (б) – 29.09.2022 12:00 UTC

На приземному аналізі карти можна побачити, що після того, як ураган «Ian» досягнув свого піку (рис 3.1а), він вийшов на західну частину півострова штату Флорида, після чого почав одразу слабшати, і пройшовши весь півострів, знову вийшов у води атлантичного океану (рис.3.1б), але вже в статусі тропічного шторму і продовжив рух на північний схід до штату Південна Кароліна. [16,17,19]

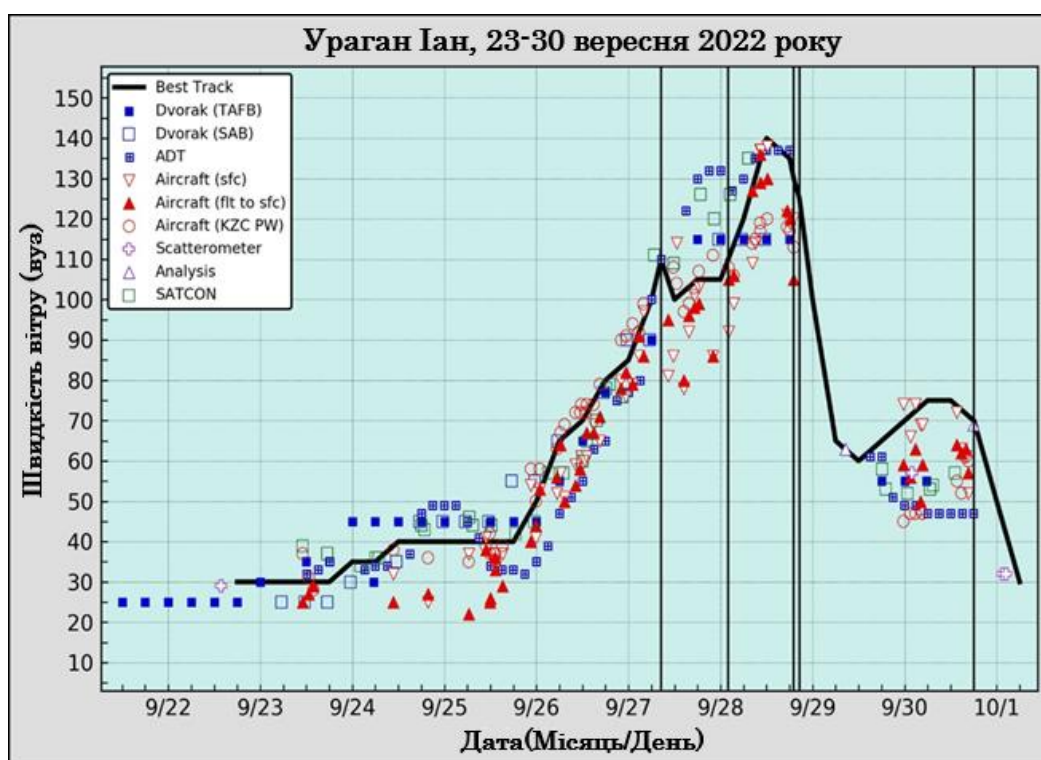


Рисунок 3.2 - Вибрані спостереження за вітром і найкраще відстеження кривої максимальної стійкої швидкості приземного вітру для урагану Іан, 23-30 вересня 2022

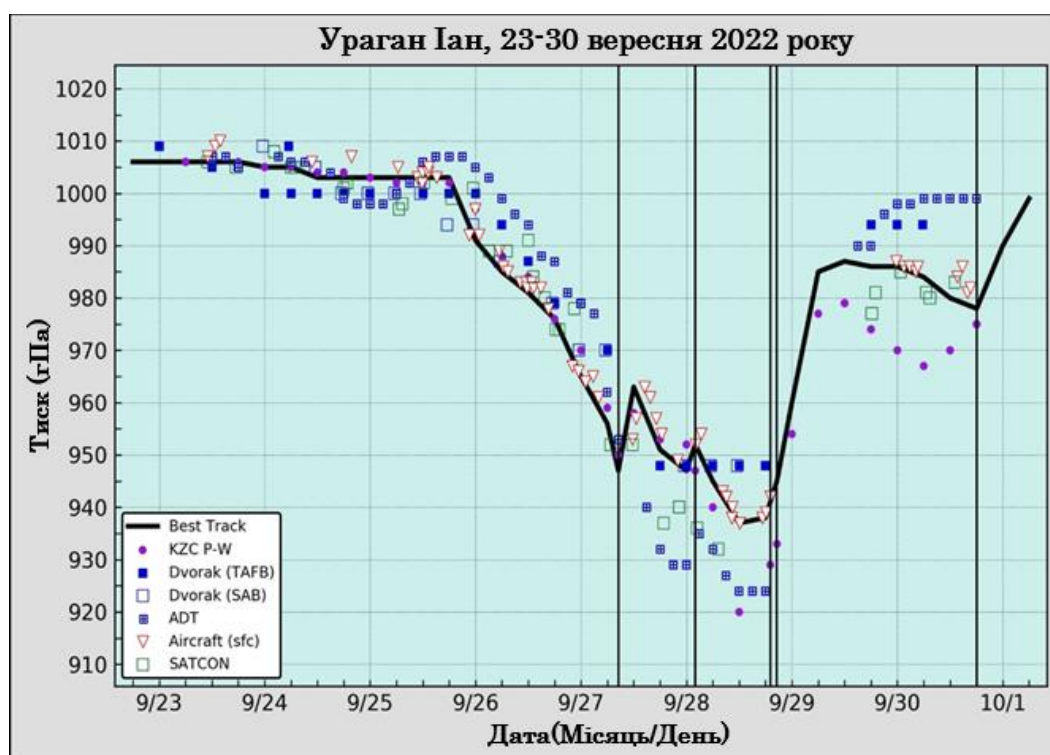


Рисунок 3.3 - Вибрані спостереження тиску та найкраще відстежувана крива мінімального центрального тиску для урагану Іан, 23-30 вересня 2022 року

Авіаційні спостереження були скориговані на висоту з використанням поправочних коефіцієнтів 90%, 80% і 75% для спостережень з висот 700 мб, 850 мб та 925 мб відповідно. Пунктирні вертикальні лінії відповідають 0000 UTC, а суцільні вертикальні лінії відповідають місцям виходу на берег ТЦ.

В перші дні зародження тропічний циклон Іап не мав потужних вітрів, лише через 4-5 днів атмосферні умови дозволили шторму посилитися. Різкий скачок сили вітру з 26 вересня пов'язан з тим, що ТЦ «Іап» прийшов до зони в Атлантичному басейні з теплими водами, які забезпечили його енергією і слабким зсувом вітру, що дало йому змогу швидко отримати статус урагану. Поступово ця система організовувалася, в центрі почало формуватися чітке око - ознака інтенсивного урагану.

Ураган Іап 27 вересня перетнув сушу в районі острова Куби, що призвело до тимчасових змін тиску та вітру, які можна побачити на графіках (рис 3.2-3.3). Шторм, перемістившись на острівну територію, почав втрачати силу через нестачу вологи. У результаті цього, тиск в центрі урагана почав зростати, а вітер слабшати, але не сильно. Після проходження центра урагана через острів Куби, дійшовши до вод Мексиканської затоки, ураган знов почав набирати вологу з теплого океану. По дорозі к півострову Флорида, ураган Іап встиг посилитися до 5-ої категорії урагана з мінімальним тиском в 937 гПа та поривами вітру до 259 км/год. В момент підходу до прибережного району Кайо-Коста, Флорида, шторм мав постійний вітер 240 км/год та мінімальний тиск у середині 941 гПа. Після проходження центра циклона через сушу, ураган ослаб до категорії тропічного шторму.

Нижче, таблиця 3.1 описує розвиток і траєкторію урагану Іап, який панував в Атлантичному басейні з 23 по 30 вересня 2022 року. Вона містить дані про дату і час (UTC), координати урагану (широта і довгота), атмосферний тиск у центрі системи, максимальну швидкість вітру та стадію розвитку урагану на кожному етапі. Всі ці дані дозволяють простежити, як змінювалися характеристики тропічного циклону. Аналіз таблиці також дає змогу виявити ключові моменти посилення та ослаблення урагану, а також визначити напрямок його руху. [16, 17, 21]

Таблиця 3.1 - Найточніший трек для урагана Ian, 23-30 вересня 2022 року

Дата/Час (UTC)	Широта (Пн)	Довгота (Зх)	Тиск (мб)	Швидкість вітру (км/год)	Стадія
22 / 1800	12.3	66.3	1006	55.4	низький тиск
23 / 0000	12.9	67.2	1006	55.4	"
23 / 0600	13.7	68.1	1006	55.4	тропічна депресія
23 / 1200	14.2	69.3	1006	55.4	"
23 / 1800	14.6	70.6	1006	64.8	"
24 / 0000	14.7	71.7	1005	64.8	тропічний шторм
24 / 0600	14.7	72.9	1005	64.8	"
24 / 1200	14.5	74.4	1003	74.2	"
24 / 1800	14.4	75.8	1003	74.2	"
25 / 0000	14.6	77.2	1003	74.2	"
25 / 0600	14.6	78.3	1003	74.2	"
25 / 1200	15.0	79.4	1003	83.5	"
25 / 1800	15.8	80.1	1003	92.5	"
26 / 0000	16.8	80.9	991	104.4	"
26 / 0600	17.7	81.7	985	120.2	ураган
26 / 1200	18.7	82.4	981	129.6	"
26 / 1800	19.7	83.0	976	148.3	"
27 / 0000	20.8	83.3	965	157.4	"
27 / 0600	21.8	83.6	956	185.2	"
27 / 0830	22.2	83.7	947	203.7	"
27 / 1200	22.6	83.6	963	185.2	"
27 / 1800	23.5	83.3	951	194.5	"
28 / 0000	24.4	83.0	947	194.5	"
28 / 0200	24.6	82.9	952	203.7	"

Продовження табл 3.1

28 / 0600	25.2	82.9	945	222.2	"
28 / 1200	26.0	82.7	937	259.3	"
28 / 1800	26.6	82.4	938	249.0	"
28 / 1905	26.7	82.2	941	240.8	"
28 / 2035	26.8	82.0	945	231.5	"
29 / 0000	27.2	81.7	960	185.2	"
29 / 0600	27.7	81.1	985	120.4	"
29 / 1200	28.4	80.6	987	111.1	тропічний шторм
29 / 1800	28.9	80.1	986	120.4	ураган
30 / 0000	29.6	79.4	986	129.6	"
30 / 0600	30.3	79.1	984	138.9	"
30 / 1200	31.5	79.0	980	138.9	"
30 / 1800	33.3	79.2	978	129.6	"
01 / 0000	34.4	79.3	990	92.6	позатропічний
01 / 0600	35.3	79.7	999	55.6	"
01 / 1200					розпад
28 / 1200	26.0	82.7	937	259.3	мінімальний тиск і максимальний вітер
27 / 0830	22.2	83.7	947	203.7	Сходження на сушу біля Ла Колома, Куба
28 / 0200	24.6	82.9	952	203.7	Сходження на сушу на Драй-Тортугас, Флорида
28 / 1905	26.7	82.2	941	240.8	Сходження на сушу біля Кайо-Коста, Флорида
28 / 2035	26.8	82.0	945	231.5	Сходження на сушу біля Пунта-Горда, Флорида

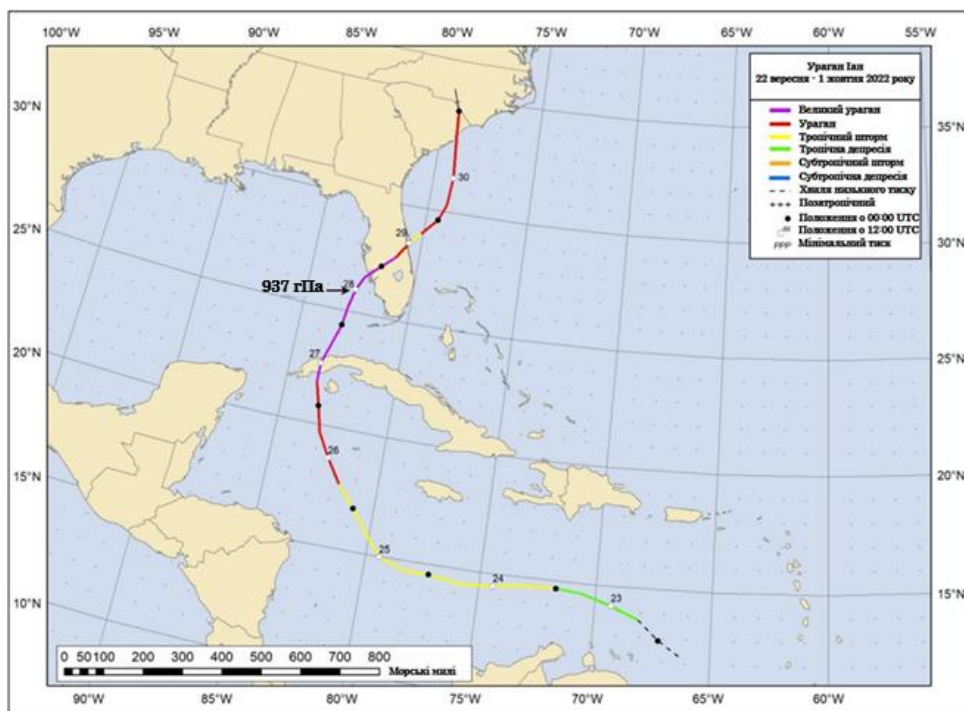


Рисунок 3.4 - Траєкторія руху тропічного циклону «Іан» 22 вересня - 1 жовтня 2022 року



Рисунок 3.5 - Супутниковий знімок хмарності урагану «Іан»

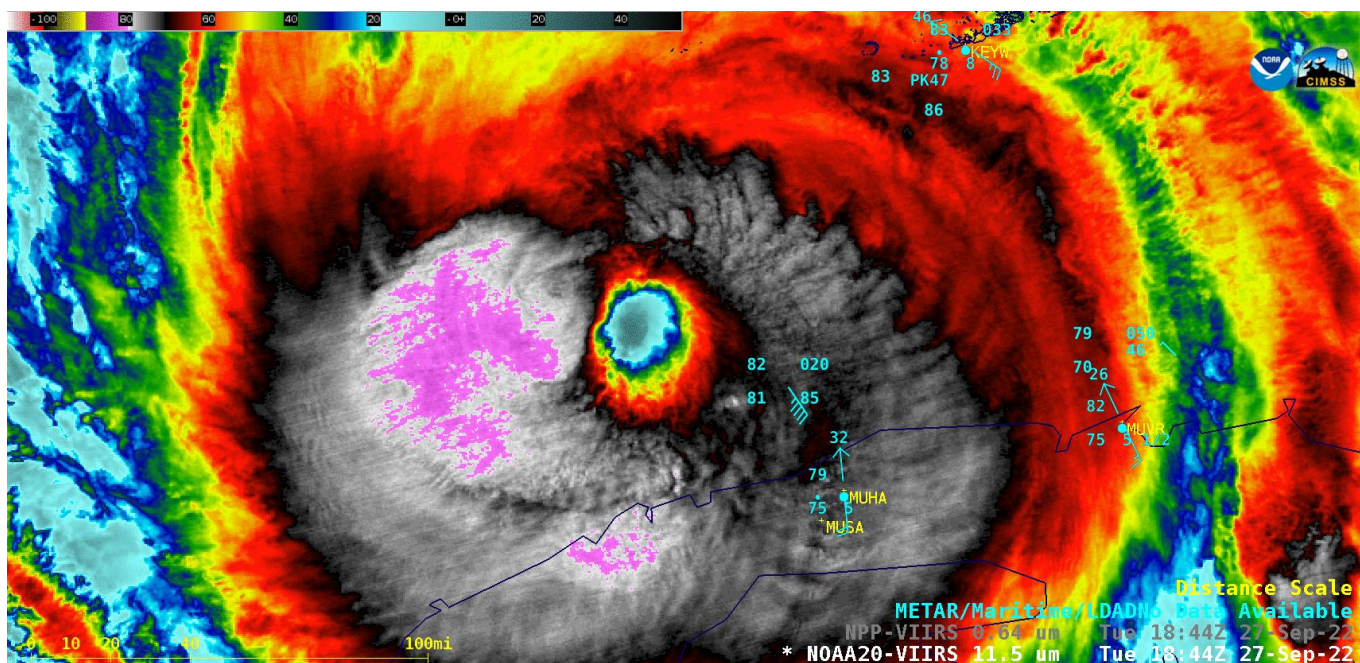


Рисунок 3.6 - Інфрачервоне зображення NOAA-20 VIIRS урагану «Ian» 27 вересня 2022 року біля берегів Куби

3.2 Формування та розвиток урагану Lee у вересні 2023 року

ТЦ Lee утворився внаслідок сильної тропічної хвилі, яка відійшла від західного узбережжя Африки пізно ввечері 1 вересня з великою зоною неорганізованих злив і гроз. Хоча пов'язана з ним глибока конвекція ослабла наступного дня, 3 вересня сформувалася циркуляція середнього рівня завдяки відновленню переважно денної конвекції за кілька сотень миль на південний захід від островів Кабо-Верде. Широка приземна область низького тиску була відзначена поблизу центру середнього рівня 4 вересня, а концентрована область глибокої конвекції сформувалася вночі 5 вересня. Супутникові дані та дані скаттерометрів показали, що приземний мінімум став чітко визначеним до 12:00 UTC 5 вересня, що ознаменувало формування тропічної депресії приблизно між Навітряними островами та узбережжям Західної Африки. Через 6 годин депресія перетворилася на тропічний шторм.

ТЦ Lee швидко посилювався, часом стрімко, протягом наступних 36 годин в умовах низького або помірного зсуву, високої вологості середнього рівня і теплої

ТПМ. Фактично, ТЦ Lee став ураганом лише через 24 години, а сильним ураганом - через 48 годин після того, як перетворився на тропічний шторм, відповідно. Рано вранці 7 вересня вертикальний зсув вітру зменшився, в той час як ураган рухався над ще теплішою водою, що сприяло періоду вибухової інтенсивності, коли вітер в ТЦ Lee посилювався приблизно до 130 км/год за 24 години. Це призвело до того, що ТЦ Lee став ураганом 5 категорії (за шкалою ураганних вітрів Саффіра-Сімпсона) з піковою інтенсивністю 270 км/год та мінімальним тиском у центрі 926 гПа о 06:00 UTC 8 вересня, в той час як ураган продовжував рухатися в північно-західному напрямку в декількох сотнях миль на схід від Підвітряних островів. Збільшення південно-західного зсуву спричинило швидке ослаблення циклону пізніше 8 вересня, і 9 вересня ТЦ Lee поступово ослаб до рівня, нижчого за основну силу урагану, все ще рухаючись у північно-західному напрямку, але дещо повільніше. Конвекція в ТЦ Lee стала більш потужною 10 вересня, і ТЦ Lee знову посилювався, а також став дещо більшим. Тропічний циклони Lee досяг другого піку інтенсивності вітру 195 км/год на початку 11 вересня і розпочав серію циклів заміни оболонки, як показують дані повітряної розвідки та зображення з радіолокатора з синтезованою апертурою, в той час як він рухався приблизно посередині між Пуерто-Рико і Бермудськими островами. Хоча мінімальний тиск у центрі майже не змінювався протягом одного-двох днів, ТЦ Lee продовжував збільшуватися в розмірах при незначному зменшенні максимального вітру. Дані з літаків показали, що ураганний вітер поширився до 203 км/год від центру на початку 13 вересня.

Навколишнє середовище навколо ТЦ Lee змінилося 13 вересня: тропічний циклони знайшов пролом у слабкому західно-атлантичному субтропічному хребті, що призвело до того, що ТЦ Lee повернув на північ, коли велика улоговина просунулася через північний схід США. Зростаючий західний зсув і підняття холодних вод під великим ураганом сприяло поступовому ослабленню, в той час як ТЦ Lee повільно рухався на північ протягом наступних кількох днів.

Ще одна короткохвильова улоговина на північному сході США опустилася на західну сторону ТЦ Lee 15 вересня, започаткувавши позатропічний перехід, а також все більш південний зсув навколишнього середовища, який приніс сухіше

повітря поблизу циклону. Близько 06:00 UTC 16 вересня, за кілька сотень миль на південь від південного-заходу Нової Шотландії, ТЦ Lee перетворився на ураганний позатропічний циклон, який досяг сили урагану. Посттропічний циклон поступово слабшав, рухаючись на північ від Гольфстріму над прохолодними водами і в межах сильного зсуву, досягнувши Лонг-Айленду на південному заході Нової Шотландії пізніше того ж дня близько 20:00 UTC з максимальним стійким вітром близько 100 км/год та мінімальним тиском 970 гПа далеко на схід від центру. Протягом наступних 18 годин ТЦ Lee рухався над затокою Фанді, Нью-Брансвіком та островом Принца Едварда, а потім перетнув затоку Святого Лаврентія, продовжуючи поступово слабшати.

Циклон пройшов через північний Ньюфаундленд, а потім вийшов у відкриту частину Північної Атлантики 18 вересня, після чого злився з іншим позатропічним мінімумом о 00:00 UTC 19 вересня, за кілька сотень миль на схід від Лабрадору. [16,17]

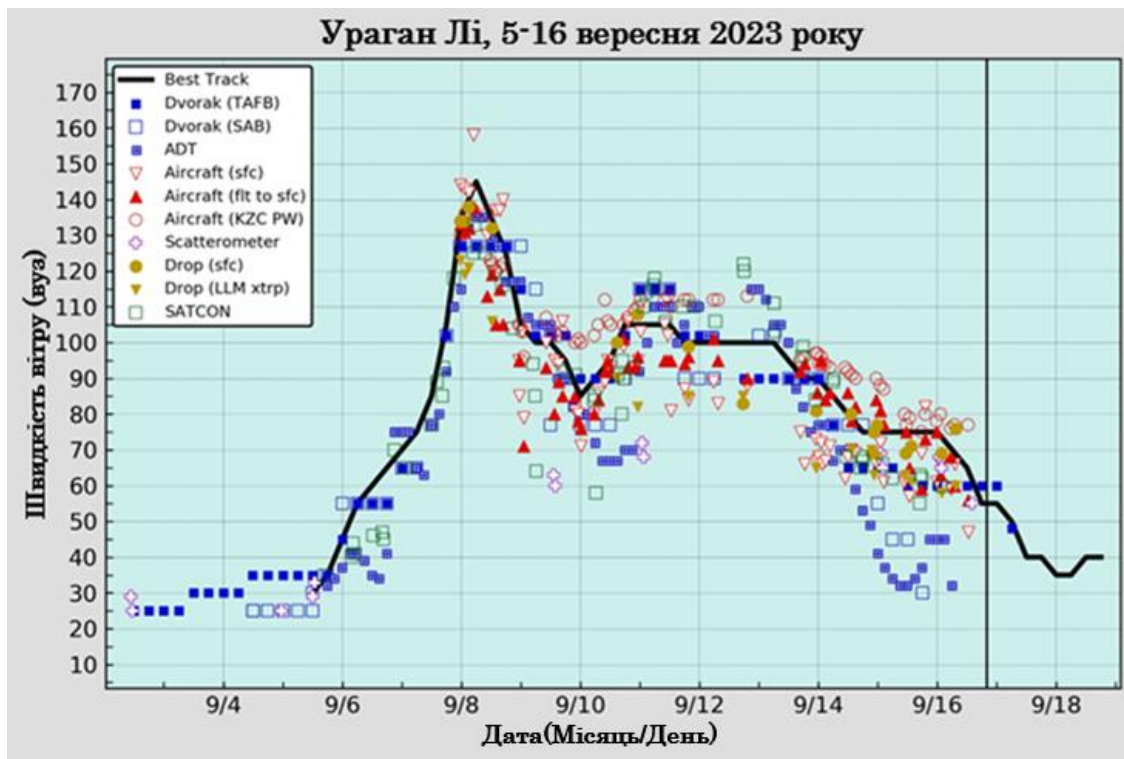


Рисунок 3.7 - Вибрані спостереження за вітром і найкраще відстеження кривої максимальної стійкої швидкості приземного вітру для урагану Lee, 5-16 вересня 2023 року

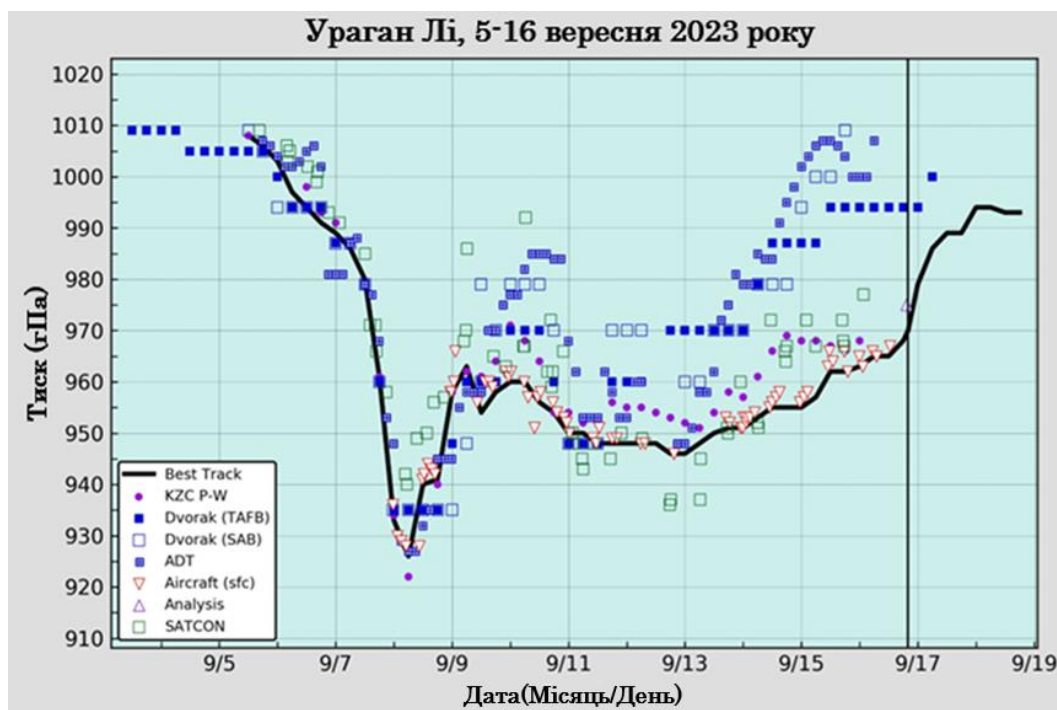


Рисунок 3.8 - Вибрані спостереження тиску та найкраще відстежувана крива мінімального центрального тиску для урагану Lee, 5-16 вересня 2023 року

Авіаційні спостереження були скориговані на висоту з використанням поправочних коефіцієнтів 90%, 80% і 75% для спостережень з висот 700 мб, 850 мб та 925 мб відповідно. Штрихові вертикальні лінії відповідають 0000 UTC, а суцільні вертикальні лінії відповідають місцю виходу шторму на сушу.

Як можна побачити, цей ураган відрізняється від інших тим, що мінімальний тиск 926 гПа у центрі спостерігався лише за перші три дні після зародження самого тропічного циклону. Тобто лише за три дні тиск в центрі впав приблизно на 90 гПа, що свідчить про бездоганні умови для формування та подальшого розвитку тропічного циклону, зсув вітру був невеликий, а температура поверхні океану була високою (понад 29 °C).

Нижче, у таблиці 3.2 наведено інформацію про розвиток і траєкторію урагану Lee, що тривав з 5 по 16 вересня 2023 року. Вона включає дані про дату та час (UTC), координати урагану (широту й довготу), атмосферний тиск у центрі системи, максимальну швидкість вітру, а також стадію розвитку урагану на кожному етапі. Аналіз таблиці дає змогу виявити ключові моменти посилення та ослаблення урагану, а також визначити напрямок його руху. [16,17,21]

Таблиця 3.2 - Найточніший трек для урагана Lee, 5-16 вересня 2023 року

Дата/Час (UTC)	Широта (Пн)	Довгота (Зх)	Тиск (мб)	Швидкість вітру (км/год)	Стадія
05 / 1200	12.2	39.6	1008	55.6	тропічна депресія
05 / 1800	12.9	41.1	1006	64.8	тропічний шторм
06 / 0000	13.2	42.5	1003	83.3	"
06 / 0600	13.5	43.9	997	101.9	"
06 / 1200	14.0	45.0	994	111.1	"
06 / 1800	14.6	46.1	991	120.4	ураган
07 / 0000	15.1	47.1	989	129.6	"
07 / 0600	15.6	48.2	986	138.9	"
07 / 1200	16.1	49.4	980	157.4	"
07 / 1800	16.6	50.7	961	194.5	"
08 / 0000	17.0	51.8	933	250.0	"
08 / 0600	17.5	53.0	926	268.5	"
08 / 1200	17.9	54.1	940	250.0	"
08 / 1800	18.5	55.1	941	231.5	"
09 / 0000	19.0	56.0	958	194.5	"
09 / 0600	19.5	57.0	963	185.2	"
09 / 1200	20.0	57.9	954	185.2	"
09 / 1800	20.4	58.8	958	175.9	"
10 / 0000	20.8	59.5	960	157.4	"
10 / 0600	21.2	60.2	960	166.7	"
10 / 1200	21.5	60.8	956	175.9	"
10 / 1800	21.9	61.4	954	194.5	"
11 / 0000	22.3	61.9	950	194.5	"
11 / 0600	22.8	62.5	950	194.5	"

Продовження табл 3.2

11 / 1200	23.2	63.2	948	194.5	"
11 / 1800	23.5	63.9	948	185.2	"
12 / 0000	23.7	64.5	948	185.2	"
12 / 0600	23.9	65.1	948	185.2	"
12 / 1200	24.1	65.7	948	185.2	"
12 / 1800	24.5	66.2	946	185.2	"
13 / 0000	24.9	66.6	946	185.2	"
13 / 0600	25.3	66.9	948	185.2	"
13 / 1200	26.0	67.2	950	175.9	"
13 / 1800	26.8	67.6	951	166.7	"
14 / 0000	27.6	67.8	951	166.7	"
14 / 0600	28.5	68.0	953	157.4	"
14 / 1200	29.8	68.2	955	148.2	"
14 / 1800	31.1	68.3	955	138.9	"
15 / 0000	32.1	67.8	955	138.9	"
15 / 0600	33.6	67.6	957	138.9	"
15 / 1200	35.1	67.1	962	138.9	"
15 / 1800	37.1	66.7	962	138.9	"
16 / 0000	38.7	65.9	963	138.9	"
16 / 1200	42.7	66.3	965	120.4	"
16 / 1800	43.8	66.4	968	101.9	"
16 / 2000	44.3	66.3	970	101.9	"
17 / 0000	44.7	66.2	979	101.9	"
17 / 0600	45.9	64.8	986	92.6	"
17 / 1200	47.3	63.0	989	74.1	"
17 / 1800	48.6	60.1	989	74.1	"

Продовження табл 3.2

18 / 0000	50.7	57.9	994	64.8	"
18 / 0600	51.7	53.2	994	64.8	"
18 / 1200	52.6	48.6	993	74.1	"
18 / 1800	53.0	42.0	993	74.1	"
19 / 0000					розпад
08 / 0600	17.5	53.0	926	268.5	мінімальний тиск і максимальний вітер
16 / 2000	44.3	66.3	970	101.9	Позатропічне сходження на берег в Лонг-Айленді, Нова Шотландія

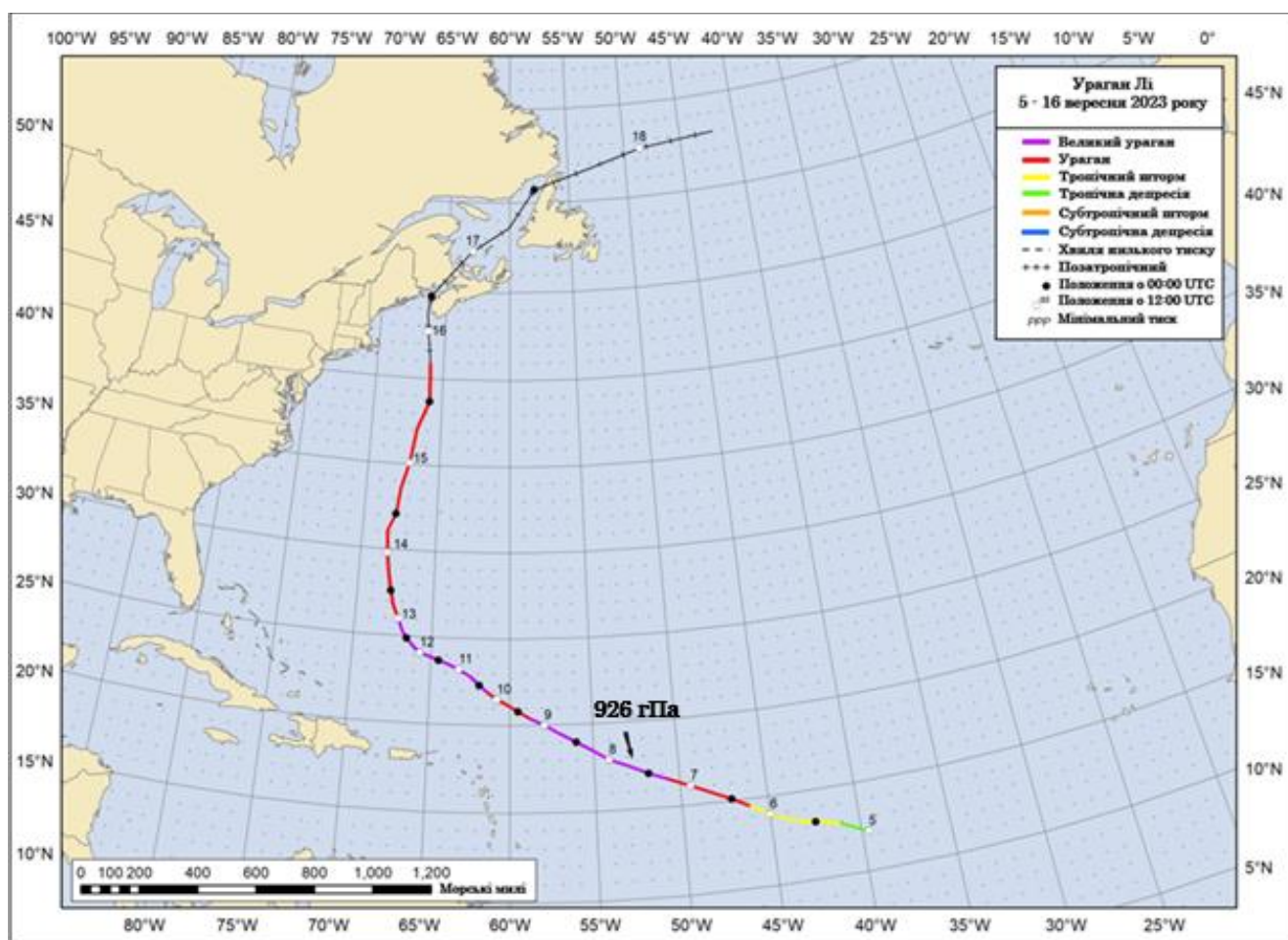


Рисунок 3.9 - Траєкторія руху тропічного циклону «Lee» 5-16 вересня 2023 року



Рисунок 3.10 - Супутниковий знімок тропічного циклон Lee, який наближається до берегів в Новій Шотландії, 14 вересня 2023 року

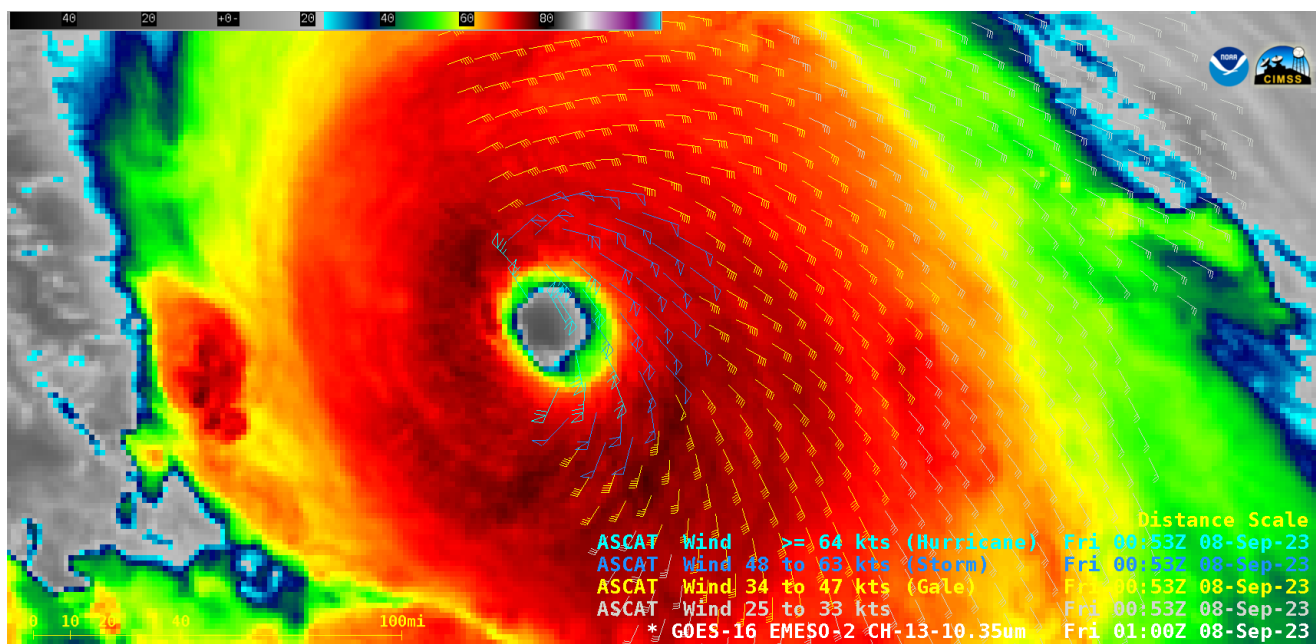


Рисунок 3.11 - Інфрачервоне зображення GOES-16 урагану «Lee» 08 вересня 2023 року в Атлантичному океані на схід від Віргінських островів

3.3 Аномалії температурного балансу Атлантичного океану

Дослідження історичних спостережень, які включають в себе різні ділянки Земної кулі, дозволяють описати особливості щорічних змін від середніх значень температури води в Атлантичному океані. Щорічні коливання температури води є більш вираженими, ніж міжрічні, проте вони значно відрізняються в залежності від місцевості. Зазвичай, у східній частині тропічної Атлантики щорічні зміни температури поверхні океану переважають над міжрічними. Відхилення температури води можуть охоплювати великі території протягом кількох місяців або навіть року. У світовому океані, як і в Атлантиці, багаторічна тенденція вказує на загальне підвищення температури морської поверхні.

Графік відображає зміни аномалії температури поверхні моря на глобальному рівні з 1980-х років (рис 3.12). Негативні значення аномалій, представлені синім кольором, домінували до кінця 20-го століття, що свідчить про більш холодні температури порівняно із середнім рівнем за базовий період 1991-2020 років. Починаючи з 2000-х років, температура стала регулярно перевищувати кліматичне середнє, що відображається червоною зоною на графіку. Особливо помітне зростання температури поверхні води спостерігається з 2012 року, досягаючи рекордних значень, що вказує на прискорене потепління океанів. [2,10-12]



Рисунок 3.12 - Щомісячна аномалія температури поверхні води з 1982 по 2024 рік

Зміна клімату значно посилюють шторми, які, формуючись над океанами із підвищеною температурою, накопичують більше вологи, що дозволяє їм зберігати силу навіть над суходолом. У зв'язку з глобальним потеплінням стихійні лиха стають більш руйнівними, зокрема в прибережних районах.

У Тихому океані існує таке явище, як Ель-Ніньйо та Ла-Нінья, але мало хто знає про існування такого явища в Атлантичному океані. Воно називається Атлантична Нінья або Атлантична Ніньйо.

Атлантична Нінья - це холодна фаза природного кліматичного явища, яке називається Атлантичним зональним режимом. (рис. 3.13). Це явище, як і Ель-Ніньйо, коливається між холодною і теплою фазами кожні кілька років. Загалом, температура морської поверхні у східній екваторіальній Атлантиці має такий сезонний цикл: найтепліші води в році бувають навесні, тоді як найхолодніші води, приблизно 25° за Цельсієм - бувають з липня по серпень.

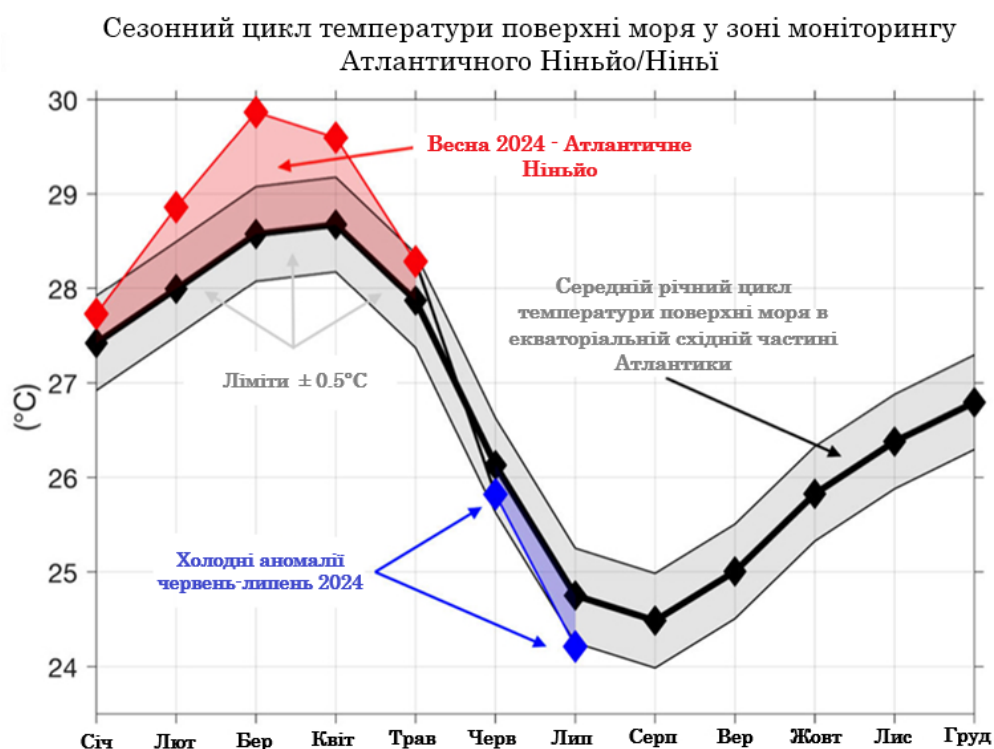


Рисунок 3.13 - Середньомісячні значення температури поверхні моря у східній екваторіальній Атлантиці у 1982 і 2023 роках (чорним кольором) та у 2024 році (червоний і синій маркери)

Червоним кольором позначено тепліші за норму води, а синім - холодніші за норму. Сіра зона позначає поріг $0,5^{\circ}$ за Цельсієм, який повинен бути перевищений, щоб вважатися Атлантичним Ніньйо/Нінья.

Літнє похолодання зумовлене вітрами, які діють на поверхні океану. Під впливом більшого сонячного тепла цей пояс опадів мігрує на північ влітку в північній півкулі. Регулярні зливи приносять повітря з південного сходу над екваторіальною Атлантикою. Ці регулярні південно-східні вітри досить сильні, щоб відштовхувати поверхневі води від екватора, що виводить на поверхню відносно холодні води глибоких шарів океану. Цей процес, відомий як екваторіальний підйом води (апвелінг), формує язик відносно холодної води вздовж екваторіальної Атлантики протягом літніх місяців. [2,10-12,22]

Але протягом декількох років цей холодний язик буває значно теплішим або холоднішим за середній рівень через коливання зонального режиму Атлантики. Холодні явища називаються «атлантичними нінья», а гарячі - «атлантичними нінью» (рис 3.14). Загалом, ці аномалії температури поверхні моря в ключовому районі моніторингу (чорна рамка на ілюстраціях), усереднені за три місяці, повинні перевищувати $0,5^{\circ}$ за Цельсієм протягом принаймні двох сезонів, що перекриваються, щоб можна було говорити про Атлантичне Ніньйо або Нінью.

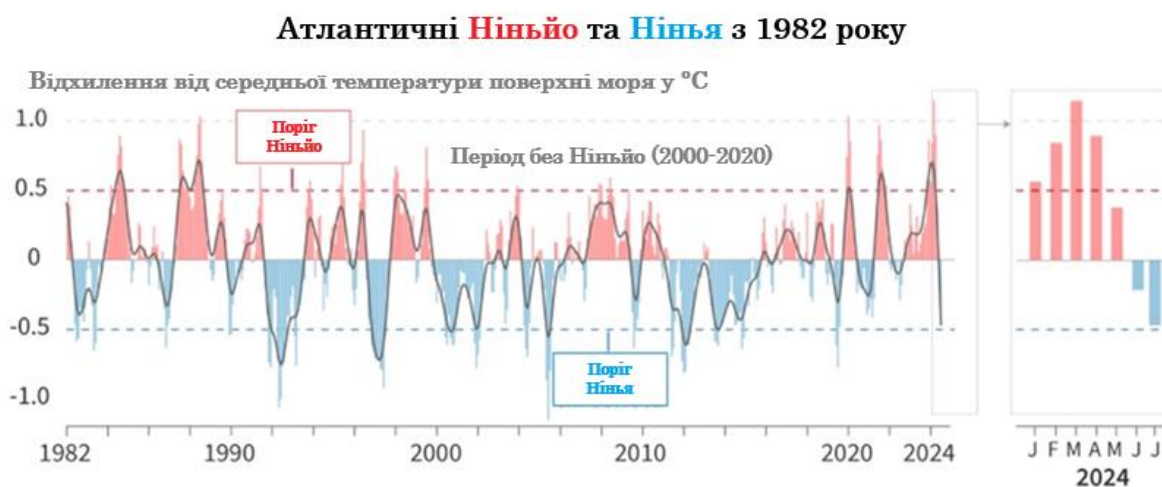


Рисунок 3.14 - Щомісячні температури поверхні моря у порівнянні з середніми показниками в ключовому регіоні моніторингу Атлантичного Ніньйо/Нінья з січня 1982 року по липень 2024 року

Візьмемо до прикладу 2024 рік, який розпочався з надзвичайно високої температури поверхні моря (ТПМ) у східній частині екваторіальної Атлантики в лютому та березні, коли температура перевищувала 30° за Цельсієм. Це найзначніший епізод спеки з 1982 року (рис.3.14). Швидкий перехід між теплими і холодними аномаліями температури поверхні моря був не менш вражаючим. Ніколи раніше за всю історію спостережень східна екваторіальна Атлантика не переходила так швидко від одного екстремального явища до іншого.

Атлантичний Ніньйо 2024 року був найсильнішим (найвища червона смуга) з 1982 року. Температура у східній екваторіальній Атлантиці в липні 2024 року була трохи нижчою за поріг Ніньї.

Тобто, Ла-Нінья та Єль-Ніньо значно впливають на активність тропічних циклонів в Атлантиці, оскільки вони змінюють атмосферні та океанічні умови. Ла-Нінья сприяє посиленню утворення циклонів через зниження вертикального зсуву вітру і тепліші води в тропічній Атлантиці, створюючи сприятливе середовище для їх формування. Натомість Єль-Ніньо, навпаки, пригнічує активність циклонів через підвищений вертикальний зсув вітру і менш сприятливі температури води, що ускладнює розвиток штормів. Ці явища також впливають на просторовий розподіл і інтенсивність циклонів.

Глобальне потепління, спричинене антропогенними чинниками, може як посилюватися, так і послаблюватися через природні кліматичні коливання, зокрема ті, що пов'язані з температурою поверхні вод Північної Атлантики. Ці зміни мають багаторічний характер і відомі як Атлантична багаторічна варіативність (АБВ). Цей термін описує закономірності змін температури поверхні Північноатлантичного океану, які проявляються у вигляді багаторічних позитивних або негативних аномалій у регіоні, порівняно із глобальним середнім рівнем. Основна ідея полягає в тому, що природні варіації в океанічній циркуляції впливають на тепловий баланс океану, визначаючи фази АБВ. Ці фази, у свою чергу, здатні впливати на погодні умови в різних частинах світу, зокрема на кількість опадів, частоту ураганів та температуру повітря. АБВ є важливим елементом у формуванні глобальної кліматичної динаміки. [2,10-12,22-25,31]

NOAA OISST V2.1 SST Anomaly (°C) [1991-2020 baseline]
1982 January

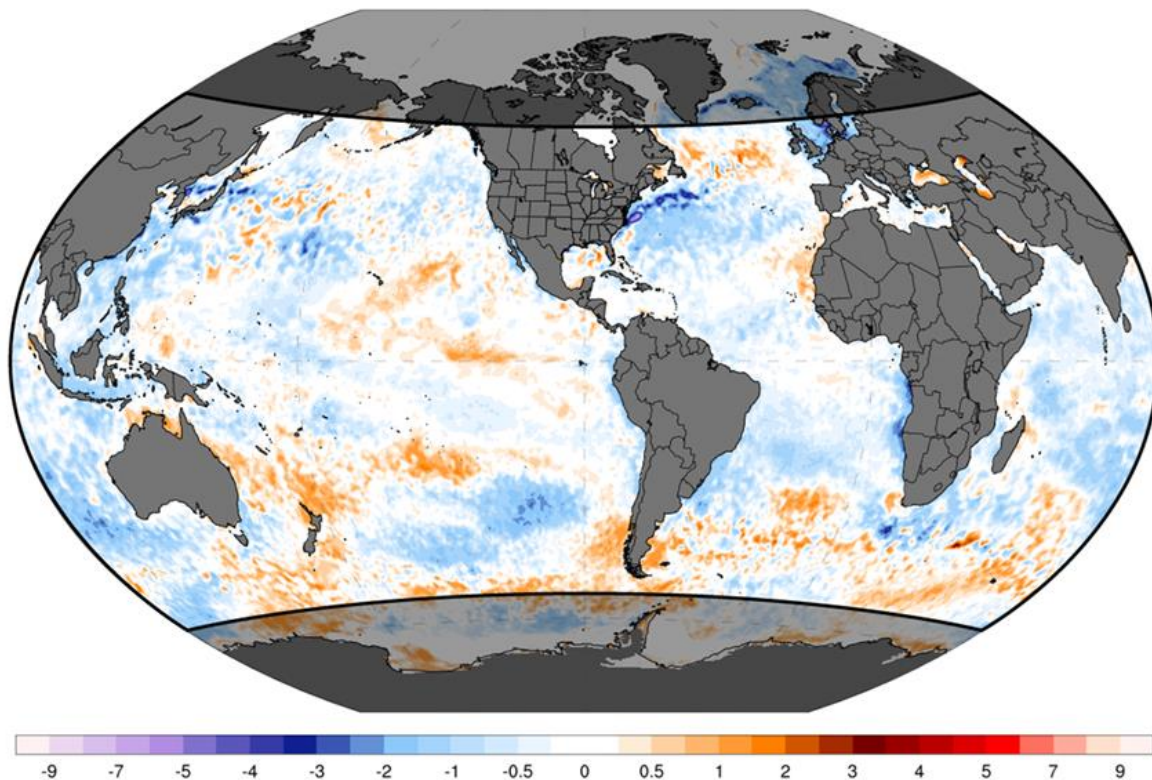


Рисунок 3.15 - Аномалія температури поверхні води у січні 1982 року

NOAA OISST V2.1 SST Anomaly (°C) [1991-2020 baseline]
2024 October

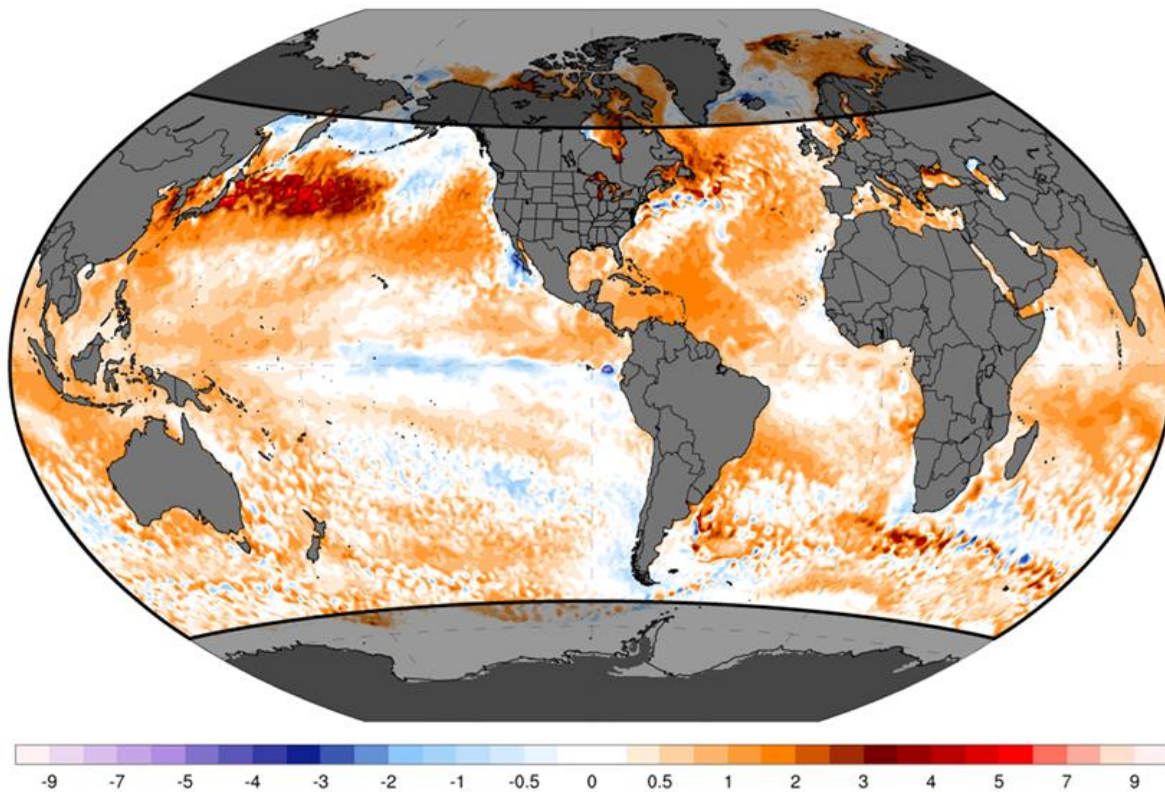


Рисунок 3.16 - Аномалія температури поверхні води у жовтні 2024 року

На першому зображенні (рис 3.15), що відноситься до січня 1982 року, температура поверхні світового океану перебуває поблизу середніх значень, з переважанням холодних аномалій у тропічній смузі поблизу екватора. Вся інша частина світового океану має невеликі відхилення від норми як у холодну сторону, так і в теплу.

На другому зображенні (рис.3.16), що відображає жовтень 2024 року, спостерігаються значні зміни. Позитивні аномалії температури домінують майже у всіх регіонах Світового океану. Особливо помітне підвищення температури води на півночі Тихого та Атлантичного океанів, де температури суттєво перевищують середні значення.

Таким чином, за період між 1982 і 2024 роками відбулося значне посилення позитивних температурних аномалій. Тривалі спостереження свідчать про зростання кількості тропічних циклонів, які досягають найпотужніших категорій, що підкреслює важливість вивчення таких природних явищ у контексті глобальних змін клімату. Розробка дієвих заходів для адаптації до зміни клімату та зменшення його впливу набуває все більшої актуальності, що потребує спільних міжнародних дій і значного фінансування наукових і технологічних розробок. Без цього ризики для економіки та безпеки лише зростатимуть.

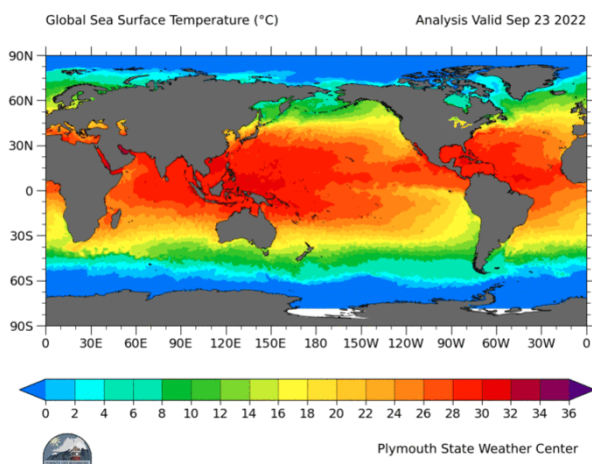
Тому у межах цього дослідження доцільним є проведення аналізу термічного стану Атлантичного океану під час періодів формування та розвитку згаданих тропічних циклонів (Ian та Lee). Аналіз температурних даних дозволить виявити кореляцію між підвищенням температури поверхні океану та інтенсивністю циклонів, а також оцінити вплив температурних аномалій на маршрути їхнього переміщення. Вивчення цих факторів важливе для точнішого прогнозування траєкторій та сили майбутніх тропічних циклонів, що має безпосереднє значення для прогнозування кліматичних явищ у регіоні.

Розглянемо вплив термічних характеристик на процеси формування та розвитку тропічних циклонів Атлантики, враховуючи взаємозв'язок між температурою поверхні моря та динамікою атмосферних процесів. Аналіз температурного поля дозволяє оцінити енергетичний потенціал океану, необхідний для підтримки

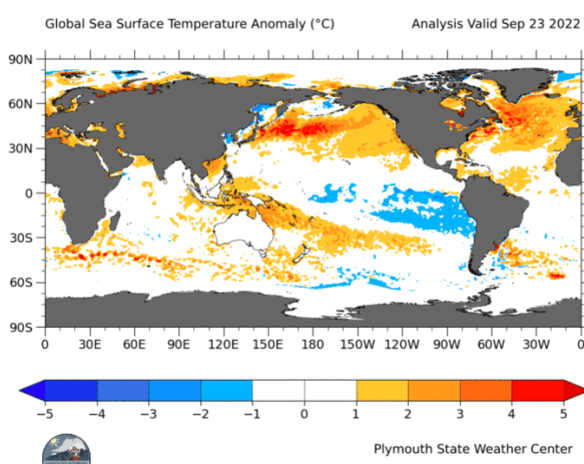
циклонічної активності. На основі представлених даних, можна визначити регіони з найбільш сприятливими умовами для утворення ураганів. Висвітлення ролі аномалій температури поверхні води дає змогу ідентифікувати ділянки, де інтенсивність циклонів може перевищувати середні значення.

Для тропічного циклону Іан (рис. 3.17-3.18) тропічна зона до 30° пн.ш. виділяється областю з високими температурами води, які досягають $26-30^{\circ}\text{C}$. У період зародження тропічного циклону, що спостерігалось 23 вересня, зафіксовано область із температурою поверхні океану $28-30^{\circ}\text{C}$. У період пікової інтенсивності урагану, що спостерігалось 28 вересня, температура поверхні океану була також на позначці $28-30^{\circ}\text{C}$. Карта аномалій температури поверхні океану в середніх широтах Атлантики ($75-60^{\circ}$ зх.д.) показує невелику зону з додатною аномалією $0,5-1^{\circ}\text{C}$, яка повністю збігається з траєкторією руху тропічного циклону Іан. [2,10-12,22-26,31]

Наявність високої температури води в атлантичному басейні може забезпечити додаткову енергію, необхідну для підтримки інтенсивності урагану протягом тривалого часу.



а)

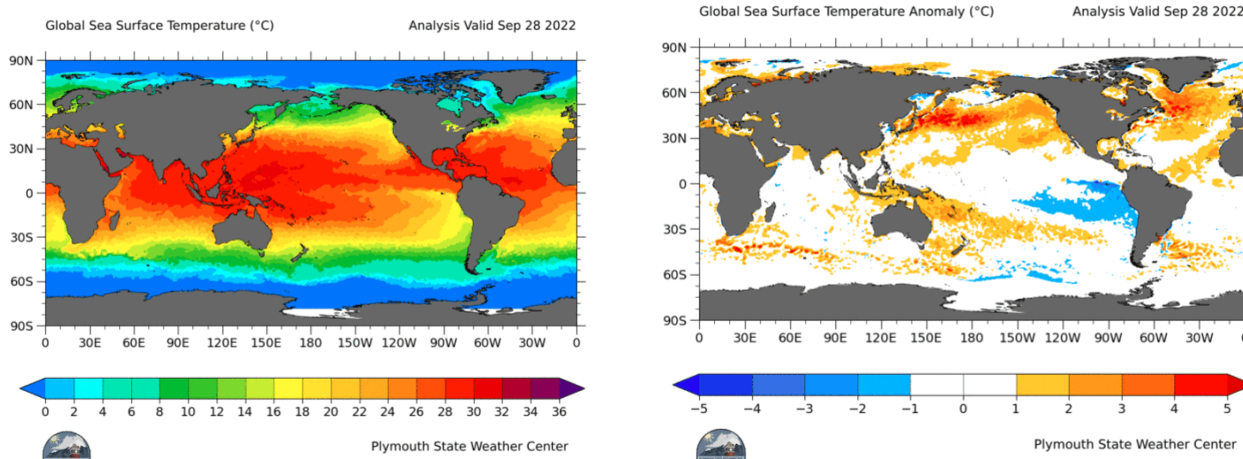


б)

Рисунок 3.17 - Карты температуры поверхности океану у середніх широтах Атлантики (ураган Іан 23-30.09.22)

а) карта температури поверхні води на стадії зародження циклону 23.09.22 р.

б) карта аномалії температури поверхні води на стадії зародження циклону 23.09.22 р.



а)

б)

Рисунок 3.18 - Карты температури поверхні океану у середніх широтах Атлантики (ураган Іан 23-30.09.22)

а) карта температури поверхні води на піковій інтенсивності циклону 28.09.22 р.

б) карта аномалії температури поверхні води на піковій інтенсивності циклону 28.09.22 р.

Для тропічного циклону Lee (рис. 3.19-3.20) тропічна зона до 30° пн.ш. характеризується високими температурами води, які становлять $26-30^{\circ}\text{C}$. У період формування циклону, зафіксованого 5 вересня, температура поверхні океану досягала $28-30^{\circ}\text{C}$. Під час максимальної інтенсивності урагану, що спостерігалася 8 вересня, ці температури залишалися на рівні $28-30^{\circ}\text{C}$. Карта аномалій температури поверхні океану в середніх широтах Атлантики ($60-30^{\circ}$ зх.д.) відображає значну область із позитивною аномалією $2-2,5^{\circ}\text{C}$, яка повністю збігається з траєкторією руху тропічного циклону Lee. Такі великі аномалії температур створюють сприятливі умови для формування тропічних циклонів, оскільки теплі води забезпечують інтенсивне випаровування, підсилюючи конвекційні процеси і можуть забезпечити додаткову енергію, необхідну для підтримки інтенсивності урагану протягом тривалого часу. Тепла поверхня океану є головним фактором, що живить тропічні циклони.

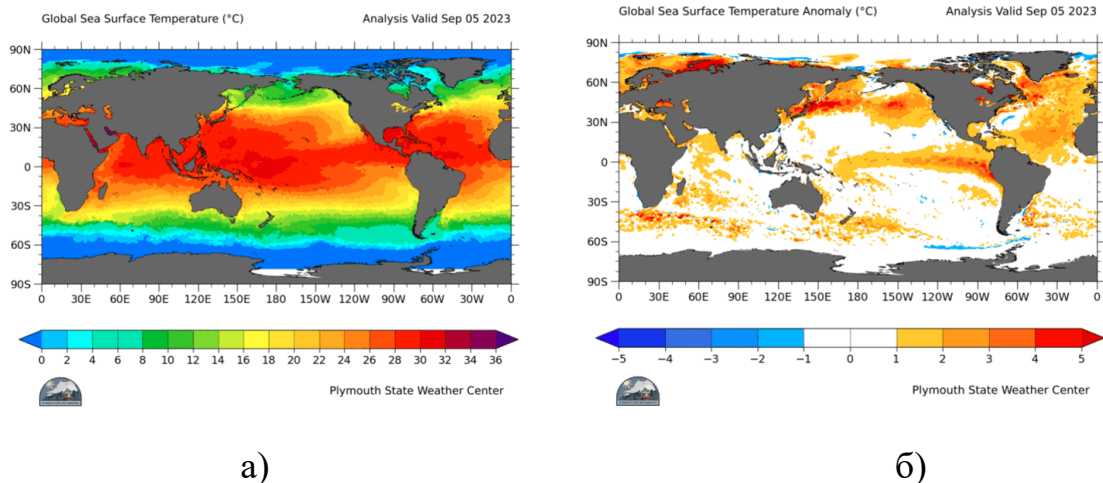


Рисунок 3.19 - Карты температуры поверхности океану у середніх широтах Атлантики (ураган Lee 05-16.09.23)

а) карта температури поверхні води на стадії зародження циклону 05.09.23 р.

б) карта аномалії температури поверхні води стадії зародження циклону 05.09.23 р.

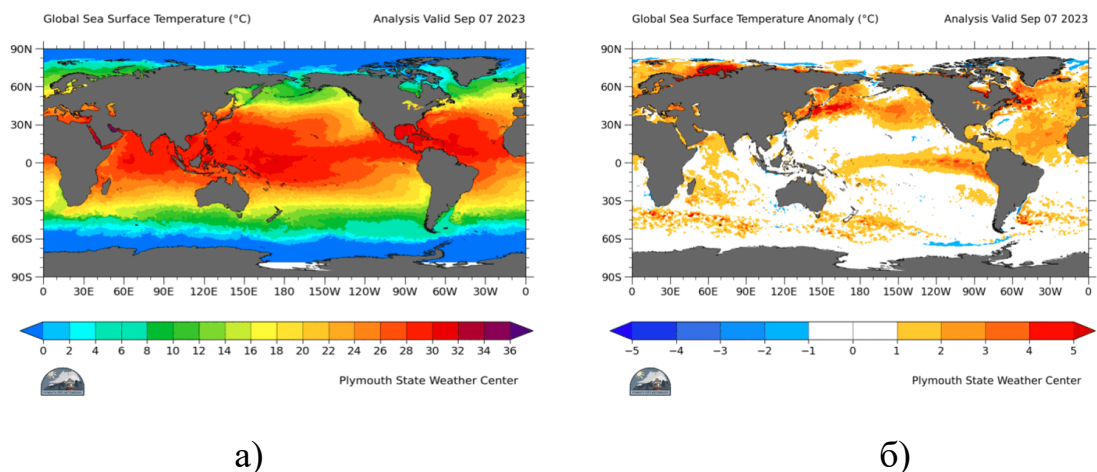


Рисунок 3.20 - Карты температуры поверхности океану у середніх широтах Атлантики (ураган Lee 05-16.09.23)

а) карта температури поверхні води на піковій інтенсивності циклону 07.09.23 р.

б) карта аномалії температури поверхні води на піковій інтенсивності циклону 07.09.23 р.

Отже, аналізуючи карти розподілу температури вод Атлантичного басейну, можна зробити висновок, що ці два урагани сформувалися в зонах із температурою води 28-30 °C, при цьому аномалії температури поверхні океану становили 0,5-2,5 °C. Це стало одним із головних факторів формування ураганів. [1, 17, 19, 26]

4 ВПЛИВ ПОГОДИ НА ТРАЄКТОРІЮ РУХУ СУДЕН В АТЛАНТИЦІ

4.1 Характеристики мета-океану та його вплив на судноплавство

Керованість і рушійні властивості суден піддаються випробуванням у мета-океанічному середовищі. Вітер, хвилі, течія, рівень морської води, а в деяких географічних регіонах і лід, визначають це середовище, яке залежить від географічного регіону і місця розташування. Для опису цих мета-океанічних явищ часто використовується суміш математичних, імовірнісних, емпіричних і статистичних моделей.

Фізичні моделі, а також польові спостереження показують, що екстремальні вітер, хвилі, течії і рівень води в широкому діапазоні періодів повернення не відбуваються одночасно. Випадкова природа цих метеорологічних явищ вимагає використання спільних ймовірностей для адекватної апроксимації їх довгострокових варіацій. Зазвичай до спільного опису включають такі параметри мета-океану або їх вибірку: середня швидкість вітру, середній напрямок вітру, значна висота хвиль, спектральний/нульовий період хвиль, середній напрямок хвиль, швидкість течії, середній напрямок течії і рівень морської води. Для більш повного опису мет-океану необхідна також інформація про коефіцієнт поривчастості вітру, спектр вітру, напрям поширення вітру та спектр напрямків хвиль. Перераховані вище характеристики мета-океану використовуються в даний час при оцінці навантажень і реакцій морських споруд.

Вплив параметрів метеорологічних умов на навантаження і реакцію судна, а отже, і на маневреність судна буде залежати від типу судна. Несприятливі погодні умови, обмежуються значною висотою хвиль, спектральним періодом хвиль, середньою швидкістю вітру і спектром хвиль, і пропонуються для прибережних вод. Вони не містять рекомендацій щодо поширення вітру за напрямком, поривів, поширення енергії хвиль, вітрового хвилювання, припливів і відпливів, припливів і течій, а також метеорологічних характеристик, які можуть бути важливими для маневреності судна в деяких регіонах океану.

У відкритому морі в більшості ситуацій, ймовірно, достатньо тримати сприятливий курс по відношенню до вітру і хвиль. Однак в океанічних районах з високою щільністю судноплавства або поблизу офшорних установок при посиленні шторму збереження маневреності може стати проблемою. Тому здатність суден зберігати маневреність в глибоководних умовах мета-океану під час шторму, що розвивається, також вимагає перевірки маневреності, в першу чергу, для утримання курсу проти вітру і хвиль. У районах океану з сильною течією сучасна здатність судна зберігати маневреність повинна враховувати, окрім вітру і хвиль, також і течію, якщо її неможливо уникнути. [13,14,32]

4.2 Вплив погодних умов на траєкторію суден

Найбільшим досягненням для виживання морських суден стало впровадження системи ЕКНІС (електронно-картографічна навігаційно-інформаційна система) на початку 2000-х років. Електронна картографічна система відображення та інформації стала значно популярнішою через недоліки паперових карт. Хоча система не має динамічних функцій, вона забезпечує гнучкість у використанні інших інструментів. Завдяки логічному нанесенню маршрутів і аналізу поведінки сусідніх суден, команда навігації отримує значні переваги. Це надає їм суттєву перевагу в умовах, коли необхідно змінювати навігаційні маршрути.

Попри своє електронне походження та переваги, ЕКНІС залишається навігаційною картою. Як наслідок, саме навігаційні офіцери отримують інформацію, щоб приймати рішення щодо маршруту, яким повинне слідувати судно для безпечного плавання. Цю важливу інформацію надають агентства з маршрутизації з урахуванням погоди - як приватні, так і державні. Такі агентства використовують три основні системи для передачі інформації: супутниковий зв'язок на відстані, навігаційний супутник та супутник дистанційного зондування.

Кожна судноплавна компанія підключає свої судна до високоякісних сервісів маршрутизації з урахуванням погоди. Під час виходу в рейс судно отримує інформацію про наступний пункт призначення. Після цього другий помічник

капітана прокладає маршрут, який відповідає вимогам безпеки та веде до пункту призначення. У разі зміни погодних умов агентство маршрутизації надає оновлену інформацію про шторми на маршруті. Це дозволяє судну або повністю змінити курс, або відповідно скоригувати швидкість.

Візьмемо до розгляду ураган 5-ої категорії Ian з 23 по 30 вересня 2022 року, який пройшов через Мексиканську затоку в США та після цього вийшов на берега півострова Флорида. До моменту виходу урагана на сушу, судноплавство в східній частині Мексиканської затоки майже зупинилося. Пов'язано це з тим, що ураган мав надпотужні пориви вітру (рис 4.1), які сприяли появі велетенських хвиль до 10 метрів заввишки (рис 4.2). Судноплавні компанії були змушені змінювати маршрути або чекати, поки пройде шторм, щоб уникнути небезпеки для екіпажів і суден. Це негативно позначилося на економіці через затримки в ланцюгах постачання. [13,14,27,32]

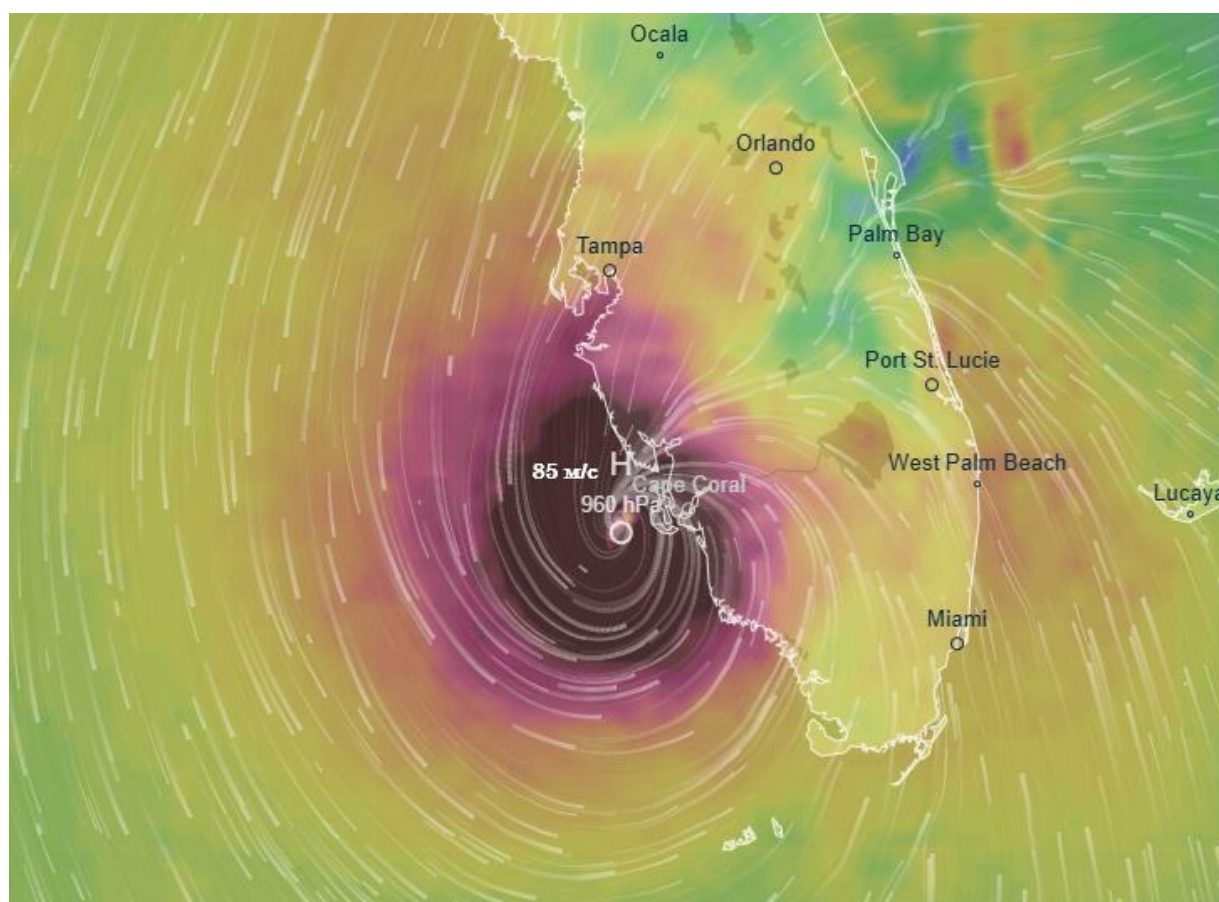


Рисунок 4.1 - Швидкість вітру під час проходження урагану 5-ої категорії «Ian» біля берегів штату Флорида, США, 15:00 UTC, 28 вересня 2022 року

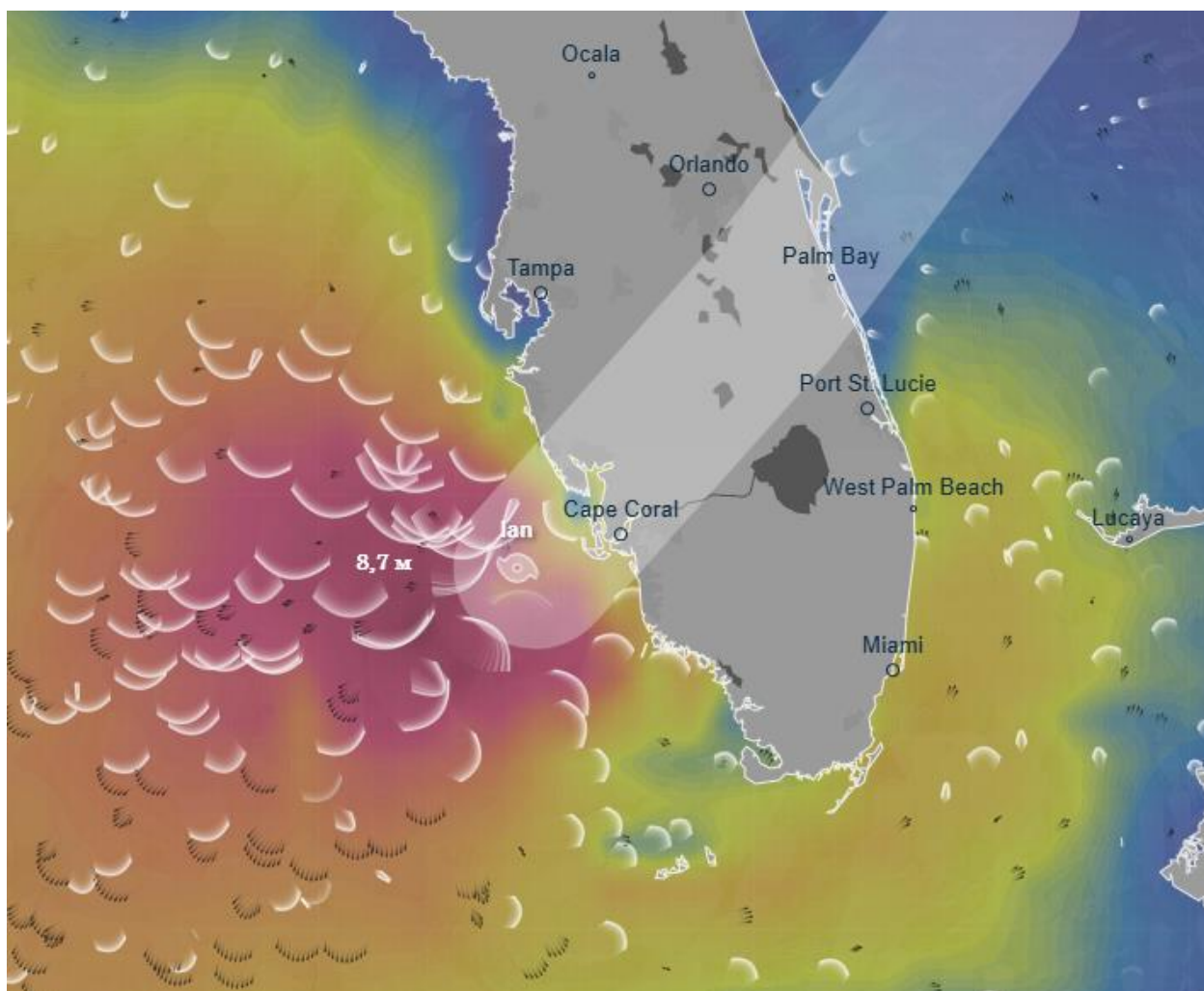


Рисунок 4.2 - Висота хвиль під час підходу урагану Іан до прибережних районів штату Флорида, США, 15:00 UTC, 28 вересня 2022 року

За декілька годин до того, як ураган дійшов на берега штату Флорида, Американська берегова охорона закрила деякі порти на західному узбережжі півострова Флорида, а саме порт Тампа, Кейп-Корал та інші. Рисунок 4.3 відображає відсутність суден в значній частині Мексиканської затоки. Деякі судна чекали західніше та південніше урагану, поки вітер стихне, щоб далі можна було йти безпечно по заданому маршруту, а деякі перебудовували свій маршрут і обходили великі хвилі стороною.

Після проходу урагану через штат Флорида, він ослабшав до тропічного шторму з поривами вітру до 110 км/год, через що Американська берегова охорона через деякий час відкрила порти, які були закриті через загрозу сильного вітру та великих хвиль. [13,14,27,32,33]

ВИСНОВКИ

У цій дипломній роботі було досліджено процеси формування, розвитку та впливу тропічних циклонів на навколишнє середовище. Було детально проаналізовано два тропічних циклона, а саме тропічний циклон Ian в період з 23 по 30 вересня 2022 року та тропічний циклон Lee з 5 по 16 вересня 2023 року. Вдалося простежити, як змінюється сила цих циклонів, в залежності від температури морської поверхні, зсувів вітру, вологості повітря, зони зародження циклону та інших вагомих факторів. Всі ці фактори показали, що навіть за невеликий проміжок часу, тропічний циклон може посилитися до урагану найвищої категорії.

У ході роботи було виявлено, що найголовнішими умовами для зародження та подальшого розвитку потужного циклону є: температура поверхні води, яка повинна перевищувати 26-27 °C; невеликі вертикальні зсуви вітру, які дозволяють тримати структуру циклону, не перешкоджаючи його розвитку; вологість повітря над зоною формування шторму. Всі ці умови були яскраво виражені на циклонах Ian та Lee. ТЦ Ian досяг п'ятої, максимальної категорії після того, як потрапив до теплих вод Мексиканської затоки (30-31°C). Тропічний циклон Lee за два дні після отримання статусу тропічного шторму посилювався до урагану максимальної категорії. Швидкий ріст обґрунтовується тим, що цей циклон попав у зону надзвичайно теплої води з позитивними аномаліями більше 2,5 °C, що призвело до інтенсивного випаровування і підсилення конвекційних процесів, і тим самим дозволило йому стати одним із потужніших ураганів сезону.

Також у роботі розглянуто зміну температури поверхні океану за останні роки та вплив глобального потепління на формування та розвиток тропічних циклонів. Вивчення температурних аномалій Атлантичного океану вказує на прямий зв'язок між глобальним потеплінням і зростанням інтенсивності ураганів. Спостерігається збільшення енергоємності тропічних циклонів, що пояснюється підвищенням температур поверхневих вод океану. Крім того, явища Атлантичної Ніні сприяють

появі умов для формування більш великих ураганів через зниження зсуву вітру та зміну вологовмісту атмосфери.

Крім того, був проаналізований вплив тропічних циклонів на судноплавство. Погодні умови значно впливають на траєкторії суден в Атлантиці. В сезон ураганів, через наявність потужних штормів, капітани суден повинні змінювати маршрути, іноді робити великі обхідні маневри, щоб уникнути потрапляння в небезпечні зони з сильними вітрами (20 м/с і вище) та великими хвилями (10 метрів та вище). Всі ці маневри призводять до затримок та збільшення витрат пального. У роботі проаналізовано судноплавство в Мексиканській затоці в момент підходу урагана Іан п'ятої категорії до берегів півострова Флорида. За декілька годин до удару шторму по прибережній зоні, Американська берегова охорона закрила деякі порти на західному узбережжі штату Флорида, для того щоб уникнути небезпеки. Судна, яким потрібно було потрапити до цих портів, чекали в безпечних зонах, поки шторм пройде далі або змінювали маршрут, щоб не втрачати час. Такі ситуації підтверджують необхідність точного прогнозування руху штормів, адже сучасні системи дозволяють вчасно реагувати на загрози.

Підсумовуючи, можна сказати, що вивчення тропічних циклонів є складним і надзвичайно важливим для людства. З огляду на сучасні кліматичні зміни та глобальне потепління, необхідно підвищити точність прогнозування їх розвитку, особливо в галузі морської навігації, оскільки безпека залежить від своєчасного реагування на потенційні загрози.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Антонюк Я.І., Нажмудінова О.М. Урагани північної Атлантики // Матеріали XIX наукової конференції молодих вчених ОДЕКУ, 25-29 травня. Одеса: ОДЕКУ, 2020. С. 267.
2. Ель Хадрі Ю., Берлінський М.А., Сліже М.О. Взаємодія океану та атмосфери: конспект лекцій. Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2022. 200 с.
3. Нажмудінова О.М. Синоптична метеорологія: Конспект лекцій. - Одеса, 2010, 77 с.
4. Нестеров Є.С., Похіл А.Е., Федоренко О.В. Про особливості формування глибоких циклонів у Північній Атлантиці в осінній період. Гідрометеорологічні дослідження та прогнози. - 2019. №2(372). - С. 101.
5. NATURAL DISASTERS - Vol.II - Cyclones, Hurricanes, Typhoons and Tornadoes - A.B. Shmakin
6. Barry R.G., Chorley R.J. (1998). Atmosphere, weather and climate. London - New York: Routledge (7th edition), 409 p.
7. Clark, P., Shakun, J., Marcott, S. et al., 2016: Consequences of twenty-first-century policy for multi-millennial climate and sea-level change. *Nature Clim Change* 6, 360–369
8. Longshore D. (1998). Encyclopedia of hurricanes, typhoons and cyclones. New York, 372 p.
9. T. Marshall, 2009 in On the Performance of Buildings in Hurricanes – A Study for the Saffir-Simpson Scale Committee.
10. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958.
11. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)].

IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. URL: https://ar5-syr.ipcc.ch/ipcc/ipcc/resources/pdf/IPCC_SynthesisReport.pdf

12. Kriegler, E., Edmonds, J., Hallegatte, S., et al., 2014: A new scenario framework for climate change research: the concept of shared climate policy assumptions, *Climatic Change* 122:401–414. DOI:[doi:10.1007/s10584-013-0971-5](https://doi.org/10.1007/s10584-013-0971-5)

13. Bitner-Gregersen E.M., 2012. Joint long-term models of met-ocean parameters, in “Marine Technology and Engineering.” Guedes Soares C, Garbatov Y., Fonseca N., Texeira A.P. (Ed), CRC Taylor & Francis Group, London, UK. 19–34.

14. Cardone, V.J., Callahan, B.T., Chen, H., Cox, A.T., Morrone, M.A. and Swail, V.R., 2014. Global distribution and risk to shipping of very extreme sea states (VESS). *Int. J. Climatol.* Pub.online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/joc.3963

15. https://www.meteo.fr/temps/domtom/La_Reunion/webcmrs9.0/anglais/faq/FAQ_Ang_B.html

16. <https://www.nhc.noaa.gov/>

17. <https://www.wetter3.de/>

18. <https://www.tropicaltidbits.com/sat/>

19. <https://www.wetterzentrale.de/>

20. <https://studfile.net/preview/9333568/page:30/>

21. <https://cimss.ssec.wisc.edu/satellite-blog/archives/48122>

22. <https://www.climate.gov/news-features/event-tracker/atlantic-nina-verge-developing-heres-why-we-should-pay-attention>

23. <https://www.navigation-mac.fr/el-nino-en-voie-daffaiblissement-dans-le-pacifique/?lang=en>

24. <https://dataselection.euro-argo.eu/>

25. <https://theconversation.com/what-is-an-atlantic-nina-how-la-ninas-smaller-cousin-could-affect-hurricane-season-237425>

26. https://climatereanalyzer.org/clim/t2_daily/?dm_id=world

27. <https://ventusky.com/>

28. https://severeweather.wmo.int/TCFW/RAIV_Workshop2022/11_RAIV-HurricaneWorkshop2022_TCStructure_PhilippePapin.pdf
29. <https://www.bom.gov.au/cyclone/tropical-cyclone-knowledge-centre/understanding/tc-names/#how-tropical-cyclones-are-named>
30. <https://www.nhc.noaa.gov/climo/>
31. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/b_fdi_43-44/010004525.pdf
32. https://www.researchgate.net/publication/304529954_Adverse_Weather_Conditions_for_Ship_Manoeuvrability
33. <https://www.marinetraffic.com/>
34. <https://dabrownstein.com/2018/01/10/saturated-southeastern-texas/>