

УДК 551.467.313

## МІЖРІЧНА МІНЛИВІСТЬ ЛЬОДОВОГО ПОКРИВУ В ПРОТОЦІ ДЕЙВІСА ТА МОРІ ЛАБРАДОР ЗА ПЕРІОД З 1979 ПО 2023 РІК

Е. С. Малюга<sup>1</sup>, Р. В. Гаврилюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний університет «Одеська морська академія»,  
вул. Дідріхсона, 8, 65000, Одеса, Україна, [eduard241965@gmail.com](mailto:eduard241965@gmail.com)  
<http://orcid.org/0009-0005-0039-9837>

<sup>2</sup> Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, [RAISAGAVR@gmail.com](mailto:RAISAGAVR@gmail.com)  
<http://orcid.org/0009-0002-9129-3293>

В умовах швидкого розвитку торговельних та транспортних комунікацій, питання навігації в зонах льодового режиму набуває все більшої актуальності. Зокрема, скорочення площі льодового покриття в Канадській Арктиці, в зв'язку з глобальним потеплінням, відкриває сприятливі перспективи для поглиблення розвитку морського судноплавства у цих водах. Враховуючи, що маршрути через Північно-Західний судноплавний прохід найкоротші з усіх, що з'єднують Атлантичний та Тихий океани, стає зрозумілим велике значення і актуальність усіх аспектів даної теми. Особливо це стосується тих, що присвячені дослідженню особливостей появи, формування, концентрації, фізичних характеристик, траєкторії руху криги та прогнозування площі льодового покриття в даному районі, які впливають на умови льодової навігації і є визначальними факторами, пов'язаними з безпекою мореплавства.

В роботі розглянуті деякі з цих питань, а саме розповсюдження льодового покриття в період максимального його розвитку в протоці Дейвіса і морі Лабрадор (тут починаються маршрути через Північно-Західний прохід) і встановлення статистичних зв'язків між розповсюдженням криги і температурами поверхневої води та приземного повітря. Метод дослідження – синоптико-кліматичний і статистичний аналіз числового ряду відхилення крижаного покриття від середньої межі на 15 квітня за період 1979-2023 рр. у даному районі.

Відповідно до поставленої мети, у дослідженні було оброблено вихідні дані по розподілу крижаного покриття в протоці Дейвіса і морі Лабрадор за період 1979-2023 рр. і проведено його статистичний аналіз. Результати аналізу показали, що в міжрічній мінливості розподілу крижаного покриття за досліджуваний період спостерігається суттєвий статистично значущий від'ємний тренд і наявність циклічних коливань з періодами 3-6, 9, 10 і 13 років. В міжрічній мінливості температури поверхневої води та температури приземного повітря спостерігаються позитивні тренди. Після приведення вихідних рядів до квазістаціонарного виду проведено кореляційний аналіз взаємозв'язків між розподілом крижаного покриття і температурою води та повітря. За результатами аналізу були визначені райони і точки зі статистично значущими коефіцієнтами кореляції між ними протягом року. Виявилось, що найбільші значення коефіцієнтів спостерігаються з грудня по березень, а максимальні припадають на березень.

Систематизація і аналіз крижаного поля в протоці Дейвіса і морі Лабрадор у період максимального розвитку дозволили встановити, що розповсюдження криги між 60° – 55° північної широти було найбільш стабільним за досліджуваний період, а на ділянці нижче 55° північної широти – найменш стабільним.

Результати проведеної роботи відкривають перспективи для розробки методів прогнозування розподілу крижаного покриття в протоці Дейвіса і морі Лабрадор, що дозволить зробити льодову навігацію даного району більш безпечною.

**Ключові слова:** льодовий покриття; протока Дейвіса; море Лабрадор; Північно-Західний прохід; розповсюдження криги.

### 1 ВСТУП

За останній час спостерігаються надзвичайно швидкі кліматичні зміни в арктичних регіонах, які спричинили багато наслідків. Зокрема, середня за рік температура повітря зростала в Арктиці в два рази швидше, ніж у світі в цілому.

Цей факт отримав назву «арктичне посилення» [1, 2]. Це призвело до того, що з 1979 по 2020 рр. середньорічна площа льодового покриття в Арктиці зменшилася на 2 млн. км<sup>2</sup> [3]. Деякі кліматичні моделі навіть прогнозують повне зникнення криги у літні місяці до 2050 р.

[4] і навіть до 2035 р. [5]. Одночасно постала низка проблем для навколишнього середовища [6] не тільки в Арктиці, але й в більш низьких широтах [7], а також збільшилося судноплавство [8] та, як наслідок, дещо зросла аварійність на морських шляхах [9].

Враховуючи вищесказане, вивченню таких змін погодних умов і їх наслідків приділяється достатньо уваги. Відповідно до цілі даного дослідження, розглянемо джерела, присвячені розповсюдженню арктичного льодового покриву взагалі і в протоці Дейвіса та морі Лабрадор зокрема, а також факторам, що на це впливають. Так, в роботі [7] зазначено, що не тільки крижане поле залежить від перенесення тепла течіями Атлантичного океану в напрямку полюсу, але й лід в свою чергу діє на перенесення тепла океаном, однак останні процеси ще недостатньо вивчені. До цього, помічено скорочення площі льодів Баренцева моря у зв'язку з «арктичним посиленням» і потеплінням атлантичної води, що надходить у море [10], в той час, як у Дейвісовій протоці значних змін перенесення тепла не відбулося [11]. За допомогою кліматичної моделі NorESM1- M встановлено, що океан впливає на процеси танення і замерзання льоду більше, ніж атмосфера [12].

Взагалі, в основних питаннях, наприклад, щодо впливу на площу арктичної криги вітру, океанських течій та низьких зимових температур [13], думки більшості вчених однакові. Але в деталях зустрічаються різні, навіть дещо не співпадаючі точки зору. Так, Heide-Jørgensen M. P. et al. [13] говорять про кореляцію площі льоду з зимовими індексами Північноатлантичної та Арктичної осциляцій, а Smedsrud L. H. et al. [14] і Semenov V. A. et al. [15] такого стійкого зв'язку не виявили. Також, без детальних пояснень, яким чином вони отримані, представлено середні за період з 2002 по 2021 рік коефіцієнти кореляції між концентрацією морської криги (SIC) і температурою поверхні моря (SST) в [16], та сезонні і річні коефіцієнти кореляції між SIC і SST, SIC і температурою приземного повітря (SAT) за період з 1979 по 2017 рік в [17].

Тобто, не зважаючи на достатню велику увагу наукового товариства приділену проблемам арктичної зони, ще є питання, які потребують більш детального вивчення і узгодження. Деякі з них, а саме пошук статистичного зв'язку між характеристиками льодового покриву в протоці Дейвіса і морі Лабрадор у період максимального поширення криги та факторами, що впливають на їх

межирічну мінливість, а також систематизація і аналіз крижаного поля досліджуваного району у цей період, є метою даної роботи.

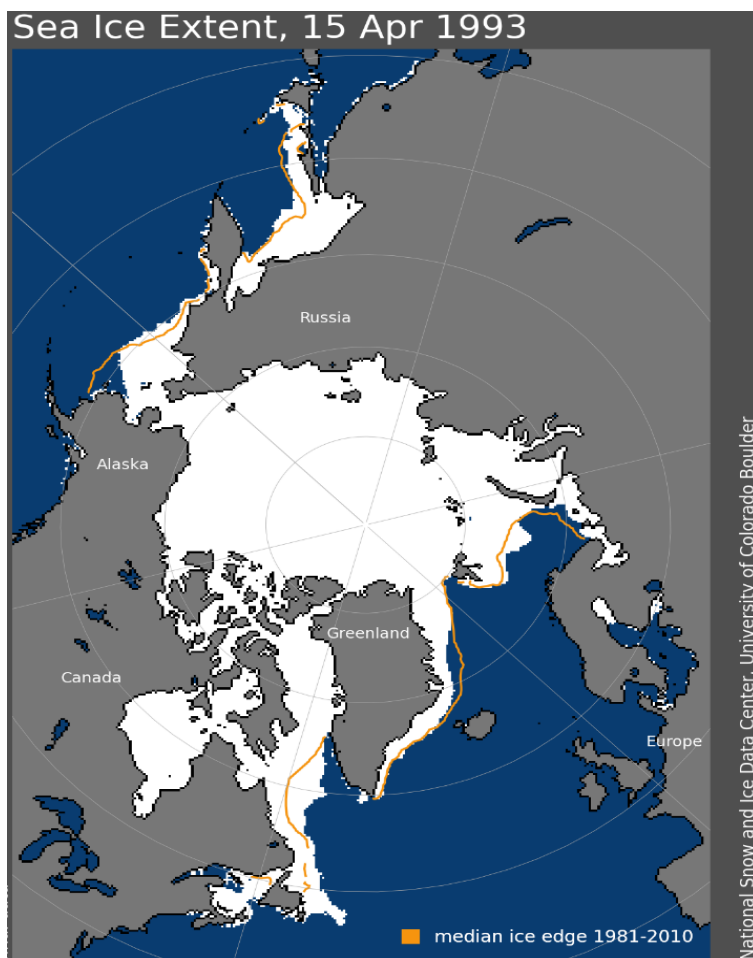
## 2 ОПИС МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для аналізу змін крижаного покриву в Дейвісовій протоці та морі Лабрадор з 1979 по 2023 рік використовувалися карти з архіву [National Snow and Ice Data Center](#) [18]. Білим кольором на цих картах позначено акваторії, зайняті морським льодом не менше, ніж 15% від загальної площі. Помаранчевим кольором для кожного числа місяця нанесено середню межу розповсюдження льоду на цю дату, обчислену для періоду з 1981 по 2010 рік – median ice edge (MIE) (рис. 1). Аналіз проводився на дату 15 квітня, так як у розглядуваному районі льодовий покрив досягає свого найбільшого поширення у березні-травні [19, 20].

Необхідні для аналізу дані були отримані наступним чином. Безпосередньо на картах, площі крижаного покриву у окремих регіонах або морях не надаються, але наносяться MIE. Вона була обрана в якості відлікової межі. Далі кожна карта за 15 квітня з 1979 по 2023 рік збільшувалася за допомогою графічного редактору. На ній до MIE підраховувалася кількість пікселів синього кольору, тобто, не зайнятих льодом (це було від'ємне значення), та за MIE – кількість пікселів білого кольору, тобто, з льодом (це було додатне значення). Тобто, якщо до межі спостерігається вільна від льоду поверхня води, то це говорить про менше, ніж зазвичай, розповсюдження льоду на цю дату і тому значення від'ємне. Аналогічно, якщо за межею спостерігається крига, то це свідчення про більше, ніж зазвичай, розповсюдження і тому значення додатне.

Додатні та від'ємні значення на кожен рік надалі склалися і, таким чином, для подальшого аналізу було створено цифровий ряд аномалій розповсюдження крижаного покриву в досліджуваному районі, представлений у таблиці 1 (слід пам'ятати, що одиниця виміру значення аномалії є умовною, бо отримана при підрахунку пікселів на електронній карті). Також було побудовано графік відхилення крижаного покриву від середньої межі на 15 квітня, за період з 1979 по 2023 рік (рис. 2).

Для кореляційного аналізу використовувалися середньомісячні дані щодо температурі води та повітря SST і SAT (1979 – 2023 рр.) Європейського центру середньострокових прогнозів погоди ([ECMWF European Reanalysis V5 \(ERA5\) \[0.25°\]](#)) [21].



**Рис. 1** – Розповсюдження морської криги в північній півкулі на 15.04.93 [18]  
**Fig. 1** – Distribution of sea ice in the Northern Hemisphere on 04.15.93 [18]

**Таблиця 1** – Числовий ряд відхилень крижаного покриву від середньої межі на 15 квітня за період 1979-2022 рр.  
**Table 1** - Numerical series of deviations of the ice cover from the average limit on April 15 for the period 1979-2022

Рік	Значення	Рік	Значення	Рік	Значення	Рік	Значення
1979	-2415	1991	5262	2003	392	2015	4690
1980	595	1992	1415	2004	-3451	2016	691
1981	-869	1993	8889	2005	-3628	2017	1481
1982	2982	1994	4542	2006	-3661	2018	-544
1983	10446	1995	3966	2007	-514	2019	-2879
1984	5586	1996	-1728	2008	1750	2020	-3260
1985	4453	1997	604	2009	2233	2021	-3176
1986	-1209	1998	-400	2010	-2335	2022	-749
1987	3727	1999	-1820	2011	-2013	2023	-1261
1988	-1616	2000	-1053	2012	210		
1989	4657	2001	-1440	2013	-3341		
1990	5033	2002	-200	2014	3230		

### 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Сукупності випадкових величин, що аналізуються, найчастіше подаються у вигляді

простого і згрупованого статистичних рядів. Для вивчення мінливості цих величин в часі використовують простий ряд, де вихідні дані розташовані у послідовності, в якій вони були

отримані. Такий ряд представлено в табл. 1 і на рис. 2. Його тривалість складає 45 років, що є достатнім для проведення статистичного аналізу.

З зовнішнього вигляду часового ряду на рис. 2 можна зробити висновок, що відхилення крижаного покриву від середньої межі відчуває суттєвий статистично значущий від'ємний тренд з коефіцієнтом детермінації  $R^2 = 0,18$ . З 1979 по 2007 рік переважали додатні значення аномалій, далі лінія переходить через нуль і з 2008 по 2023 рік вже переважали від'ємні.

Основний максимум графіку спостерігався у 1983 р. (10446), значимі локальні максимуми – у 1987, 1991, 1993 (другий за величиною максимум ряду), 2009 і 2015 рр. Основний мінімум спостерігався у 2006 році (-3661), а значимі локальні мінімуми у 1979, 1988, 1996, 1999, 2010, 2013 і 2020 рр. При порівнянні амплітуд додатних і від'ємних значень помітно, що у додатних вони значно більші. Тобто, за досліджуваний період площа криги за середньою межею (на 15.04) у окремі роки була значно більшою, ніж площа, вільна від криги до цієї межі. Це також підтверджується тим, що середнє значення ряду додатне і становить 739.

За візуально однаковими ознаками графік на рис. 2 можна розбити на три частини: 1981-1996, 1996-2005 і 2005-2020 рр. Спільними рисами цих періодів є великі максимуми на початку і кінці строку, а також невеликі максимуми-мінімуми всередині. Перший період триває 15 років, другий 9, третій 15. Тобто, можна зробити два припущення. Або існують цикли з максимумами на початку і завершенні, між якими спостерігаються значно менші зростання-падіння з періодичністю 9-15 років, або більш довгі цикли (періодичністю біля 15 років) перемежаються більш короткими циклами (періодичністю біля 9 років).

Також помітно, що з початку двохтисячних років розбіжність між максимальними додатними і від'ємними значеннями аномалій починає безперервно збільшуватися. Якщо з'єднати максимуми 2000, 2008, 2009 і 2015 рр. та мінімуми 2005, 2006, 2013, 2020 і 2021 рр., то можна побачити, що як позитивні, так і негативні екстремуми майже знаходяться на прямих і ці прямі розходяться одна від одної. Тобто амплітуда коливань графіку на рис. 2 у цей проміжок часу постійно зростає.

У багатьох дослідженнях, присвячених Арктиці, відзначається суттєвий зв'язок льодового покриву з температурами поверхневої води і приземного повітря. На рис.3 і 4 наведено

графіки часової мінливості і лінії тренду для температури води і повітря у квадраті  $60 - 62,5^\circ \text{N}$ ,  $52,5 - 55^\circ \text{W}$  за період 1979-2023 рр. Якщо порівняти рис. 2, 3 і 4 можна бачити, що основним і локальним максимумам на рис. 2 найчастіше відповідають мінімуми на рис. 3 і 4 (наприклад, у 1983, 1993, 2008, 2012 і 2015 рр.), а мінімумам на рис. 2 – максимуми на рис. 3 і 4 (у 1981, 1988, 1992, 1996, 2005, 2013, 2023 рр.). Тобто, коливання на графіках рис. 2 і 3 та 4 протифазні, але треба відзначити, що амплітуди сплесків не завжди відповідають одне одному (наприклад, на рис. 2 амплітуди максимумів 2012 і 2015 рр. значно відрізняються, а на рис. 3 і 4 амплітуди мінімумів цих років майже однакові).

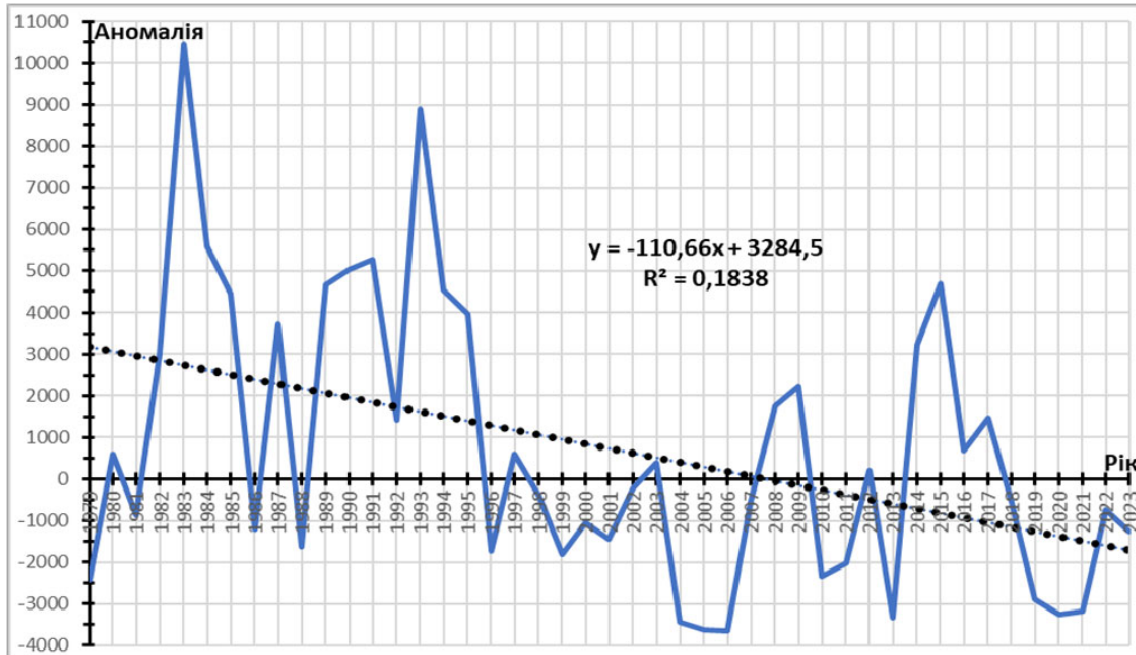
Гістограму з полігоном розподілу числового ряду аномалій представлено на рис. 5. З її вигляду також можна підтвердити зроблений вище висновок, що випадки аномально великого розповсюдження криги за МІЕ у даному районі на 15.04 з 1979 по 2023 р. траплялися нечасто. У разі від'ємних значень аналогічні випадки (тобто, дуже значна площа вільної води до МІЕ) не спостерігалися зовсім.

Для приведення числового вихідного ряду до квазістаціонарного виду з метою його подальшого статистичного аналізу, надалі розглядалися не аномалії розповсюдження крижаного покриву ( $x_1, x_2, \dots, x_{45}$ ), а їх зміни за рік (річний приріст). Тобто, отримуємо новий ряд річного приросту, в якому буде 44 члена. Він є результатом послідовного віднімання попереднього члену ряду від наступного ( $x_2 - x_1, x_3 - x_2, \dots, x_{45} - x_{44}$ ) і набув характер близький до стаціонарного з незначним від'ємним трендом (табл. 2, рис. 6, 7). Така методика була застосована для обробки ряду багаторічних змін рівня Каспійського моря, в якому, як добре відомо, спостерігається суттєвий від'ємний тренд, а її описання наведено в [22].

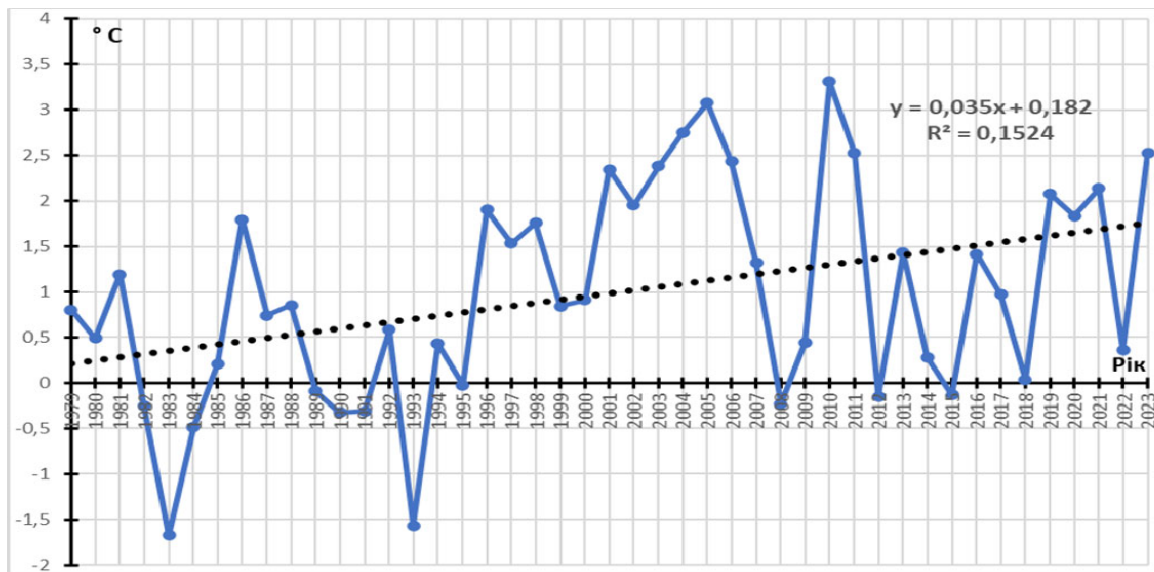
За допомогою кореляційного аналізу можна виявити зв'язок між двома і більше випадковими величинами. Статистична залежність вважається значущою, якщо коефіцієнт кореляції достатньо високий і не менше, ніж в 6-10 раз перевищує свою похибку, яка дорівнює

$$\sigma = 0,67(1 - r^2) / \sqrt{n},$$

де  $r$  – коефіцієнт кореляції, а  $n$  – кількість членів ряду. Для нашого ряду річного приросту з 44 членами, значущими на рівні 0,01 будуть коефіцієнти кореляції 0,48 і вище.

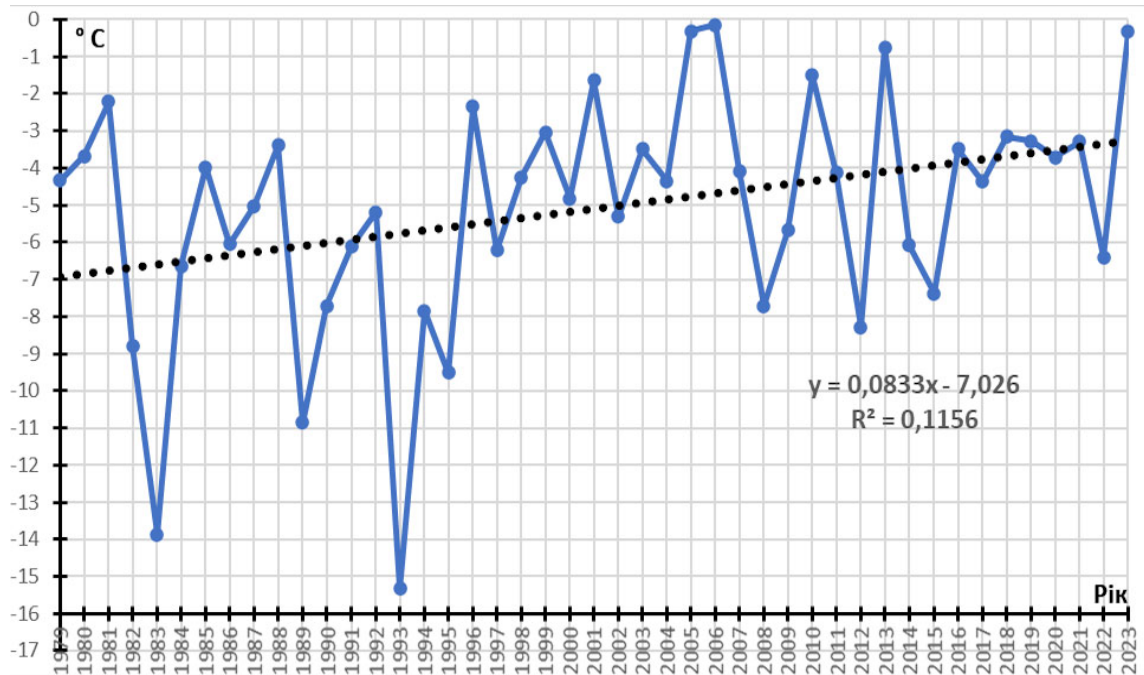


**Рис. 2** – Графік відхилень крижаного покриву від середньої межі на 15 квітня за період 1979-2023 рр. з лінією тренду  
**Fig. 2** – Graph of deviations of the ice cover from the average limit on April 15 for the period 1979-2023 with a trend line



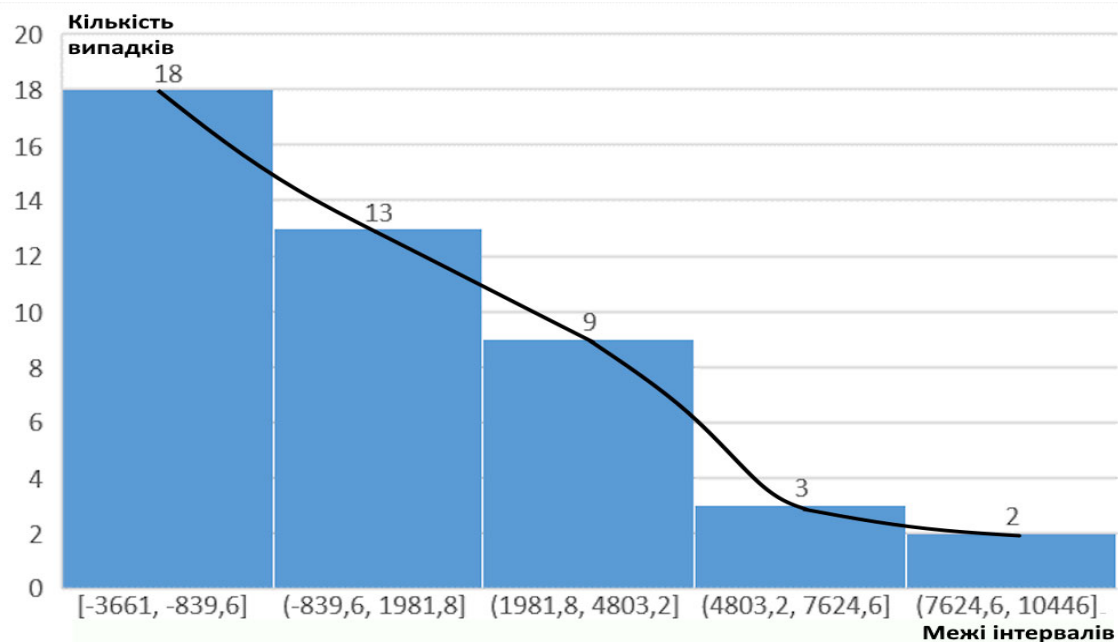
**Рис. 3** – Графік середньомісячної температури поверхневої води (SST) для березня у квадраті 60 – 62,5° N, 52,5 – 55° W за період 1979-2023 рр. з лінією тренду

**Fig. 3** – Graph of average monthly surface water temperature (SST) in March in the square 60 - 62.5° N, 52.5 - 55° W for the period 1979-2023 with a trend line



**Рис. 4** – Графік середньомісячної температури приземного повітря (SAT) для березня у квадраті 60 – 62,5° N, 52,5 – 55° W за період 1979-2023 рр. з лінією тренду

**Fig. 4** – Graph of the average monthly surface air temperature (SAT) in March in the square 60 - 62.5° N, 52.5 - 55° W for the period 1979-2023 with a trend line



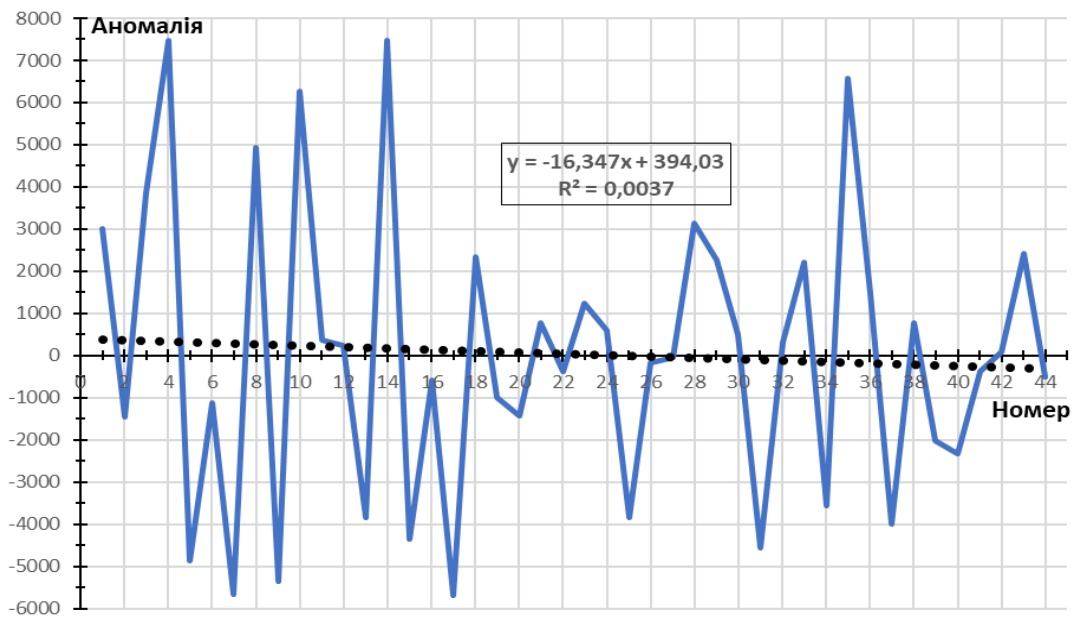
**Рис. 5** – Гістограма з полігоном розподілу числового ряду відхилень крижаного покриву від середньої межі на 15 квітня за період 1979-2023 рр.

**Fig. 5** – Histogram with a polygon of the distribution of the numerical series of deviations of the ice cover from the average limit on April 15 for the period 1979-2023

**Таблиця 2** – Числовий ряд річного приросту аномалій крижаного покриву від середньої межі на 15 квітня за період 1979-2023 рр.

**Table 2** – The numerical series of the annual increase in ice cover anomalies from the average limit on April 15 for the period 1979-2023

№	Значення	№	Значення	№	Значення	№	Значення	№	Значення
1	3010	10	6273	19	-1004	28	3147	37	-3999
2	-1464	11	376	20	-1420	29	2264	38	790
3	3851	12	229	21	767	30	483	39	-2025
4	7464	13	-3847	22	-387	31	-4568	40	-2335
5	-4860	14	7474	23	1240	32	322	41	-381
6	-1133	15	-4347	24	592	33	2223	42	84
7	-5662	16	-576	25	-3843	34	-3551	43	2427
8	4936	17	-5694	26	-177	35	6571	44	-512
9	-5343	18	2332	27	-33	36	1460		



**Рис. 6** – Крива річного приросту аномалій крижаного покриву за період 1979-2023 рр. з лінією тренду  
**Fig. 6** – The curve of the annual growth of ice cover anomalies for the period 1979-2023 with a trend line

Спочатку перевіримо взаємозв'язок членів числового ряду самих із собою зі зсувом у часі. Для цього визначимо коефіцієнти кореляції між незгладженими рядами відхилень льодового покриву від середньої межі ( $x_1, x_2, \dots, x_{30}$ ) і ( $x_2, x_3, \dots, x_{31}$ ) (зсув 1 рік), рядами ( $x_1, x_2, \dots, x_{30}$ ) і ( $x_3, x_4, \dots, x_{32}$ ) (зсув 2 роки), рядами ( $x_1, x_2, \dots, x_{30}$ ) і ( $x_4, x_3, \dots, x_{33}$ ) (зсув 3 роки) і так до рядів ( $x_1, x_2, \dots, x_{30}$ ) і ( $x_{16}, x_3, \dots, x_{45}$ ) (зсув 15 років) (рис. 8). Як бачимо з рис. 8, ряд аномалій крижаного покриву відчуває циклічні коливання з періодами 3–6, 9, 10 і 13 років.

Далі розглянемо зв'язок ряду річного приросту відхилень, отриманого раніше, з температурою поверхні моря (SST) і температурою приземного повітря на висоті 2 м

над рівнем моря (SAT). Числові ряди середніх за місяць значень SST і SAT з 1979 по 2023 рік також були перетворені у ряди річного приросту, аналогічно процедурі з рядом аномалій розповсюдження крижаного покриву, як описано вище.

Спочатку визначаємо коефіцієнти кореляції названих величин з членами ряду річного приросту аномалій на десятиградусних квадратах в Північній Атлантиці (тут і далі для кожного місяця року). Максимальні значення цих показників було отримано у квадраті 50 – 60° N, 40 – 50° W, для SST у грудні – -0,47 і для SAT також у грудні – -0,61. Оскільки температура приземного повітря бралася тільки над водною поверхнею, а ділянки суші з аналізу

виключалися, то безпосередньо у морі Лабрадор і протоці Дейвіса це визначення не проводилося.

Потім коефіцієнти кореляції знаходилися вже у п'ятиградусних квадратах. Найвищі показники для обох температур виявилися протоці Дейвіса, в одному й тому ж квадраті – 60 – 65° N, 55 – 60° W. Для SST у березні кореляція становила - 0,63 і для SAT, також у березні, – - 0,72. Подальше зменшення масштабу до 2,5° підвищило результат: - 0,76 для SST і - 0,74 для SAT у березні у квадраті 60 – 62,5° N, 52,5 – 55° W. Надалі квадрати сітки зменшувались до 1° та 0,5° (рис. 9, 10, табл. 3, 4) і, нарешті, знаходилися коефіцієнти кореляції між членами ряду річного приросту та SST і SAT у вузлах сітки з роздільною здатністю 0,5×0,5°. Найкращими для SST виявилися показники - 0,776 (квадрат 60 – 60,5° N, 54,5 – 54° W, березень) і - 0,774 (точка з координатами 60,5° N, 54° W, березень). Для SAT це були - 0,753 (точка з координатами 61° N, 54,5° W, березень) і - 0,752 (точка з координатами 60,5° N, 54° W, березень).

З рисунків 9 і 10 видно, що максимальні за рік коефіцієнти кореляції ряду річного приросту, як з SAT, так і з SST, спостерігаються приблизно в одних і тих же районах. Відмінність полягає у тому, що коли більшість коефіцієнтів з SAT перевищує 0,7, то з SST вони зустрічаються значно рідше, а переважають показники від 0,5 до 0,69. Але, не дивлячись на це, найбільше значення кореляції з SST перевищує аналогічне з SAT – -0,78 проти -0,75. Ще можна відмітити відносно велику кореляцію розповсюдження криги на 15 квітня з SST (-0,63 і -0,64) на південний схід від мису Фарвел, у квадраті 58,5 – 59° N, 41,5 – 42,5° W.

Таблиці 3 і 4 демонструють зв'язок величини коефіцієнтів кореляції з місяцем року. Так, їх найбільші значення спостерігаються у березні, трохи нижчі у грудні та ще менші у січні і лютому. Якщо порівняти ці два останні місяці для SST і SAT, то кореляція з температурою повітря більш слабка і виявляється рідше, ніж з температурою води.

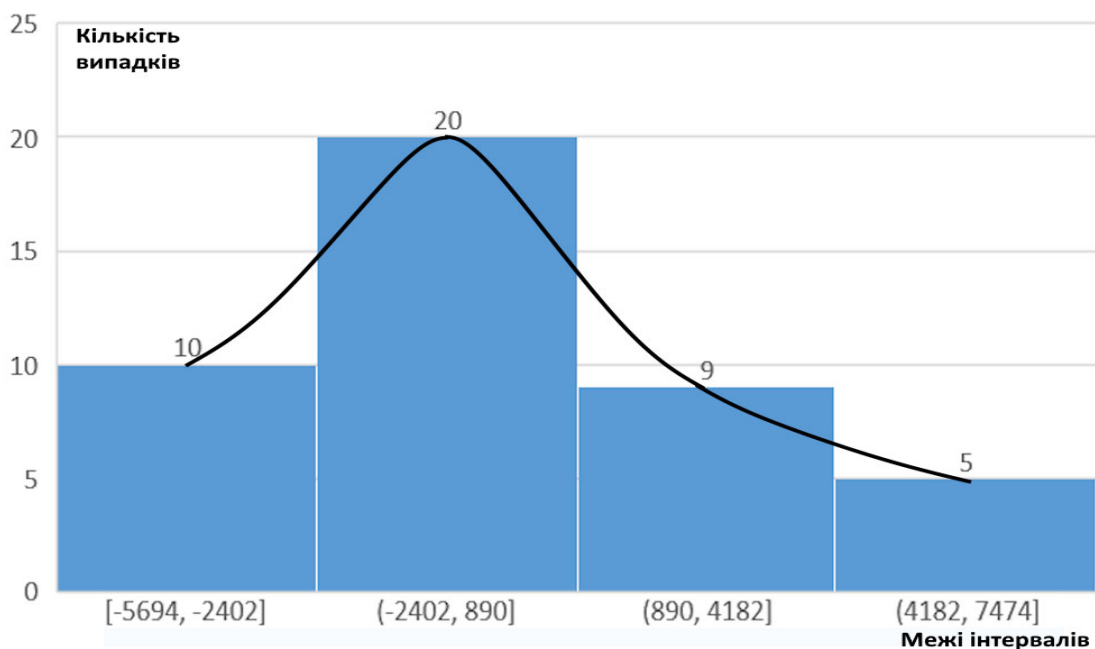
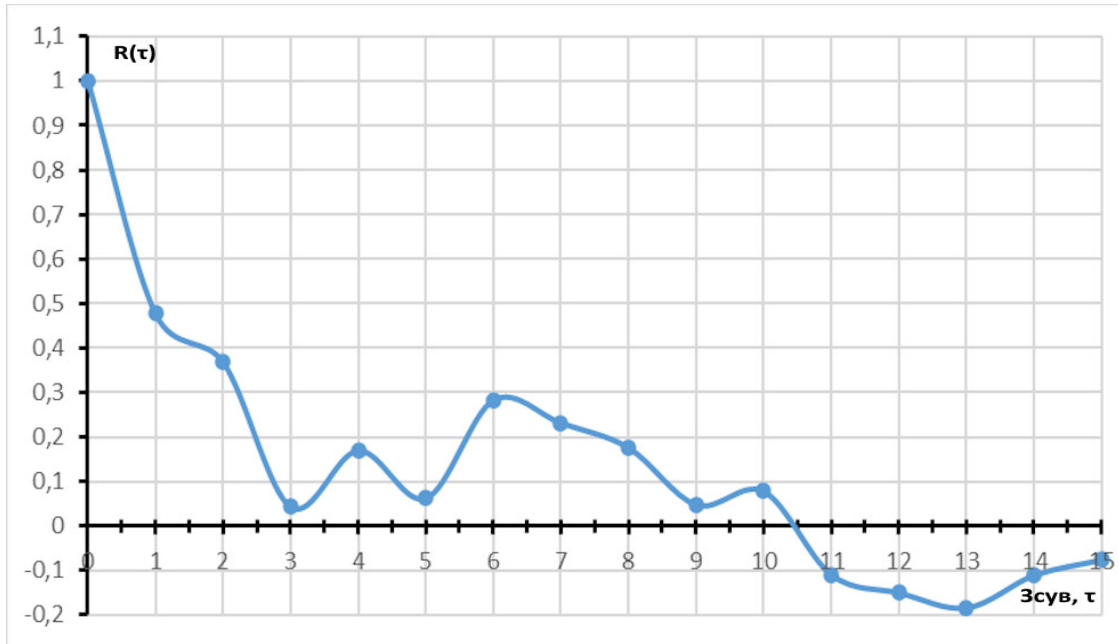


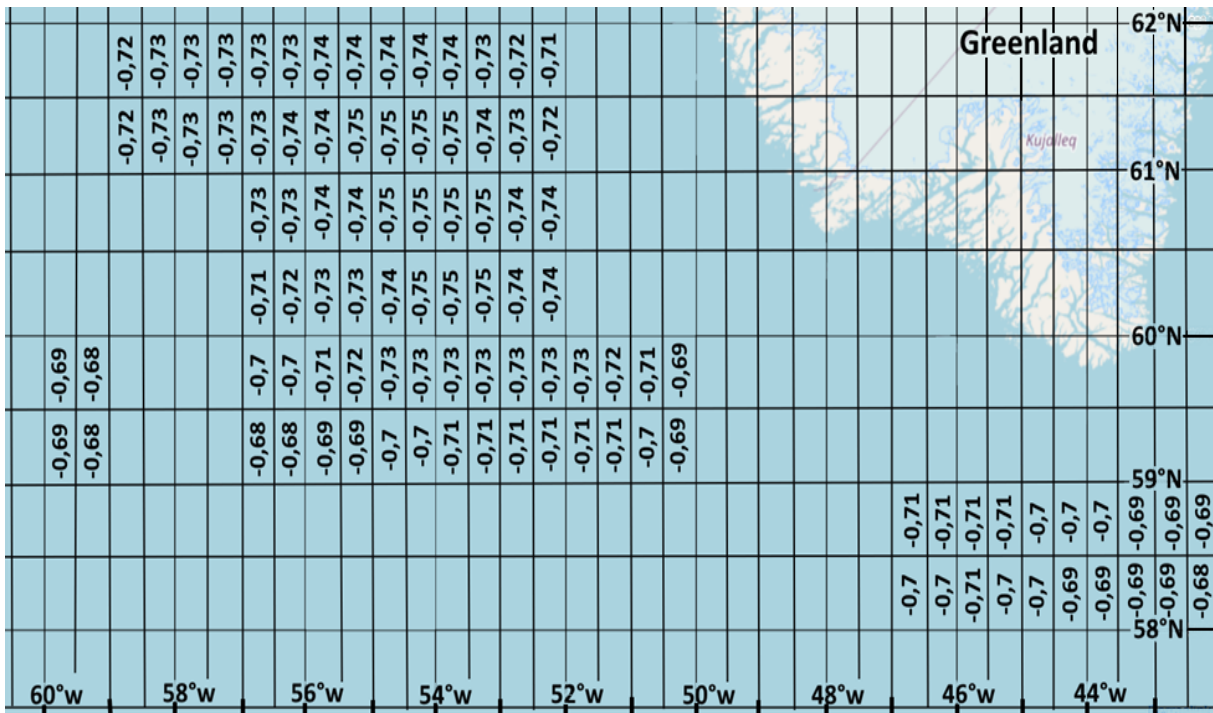
Рис. 7 – Гістограма отриманого ряду річного приросту  
Fig. 7 – Histogram of the obtained series of annual growth





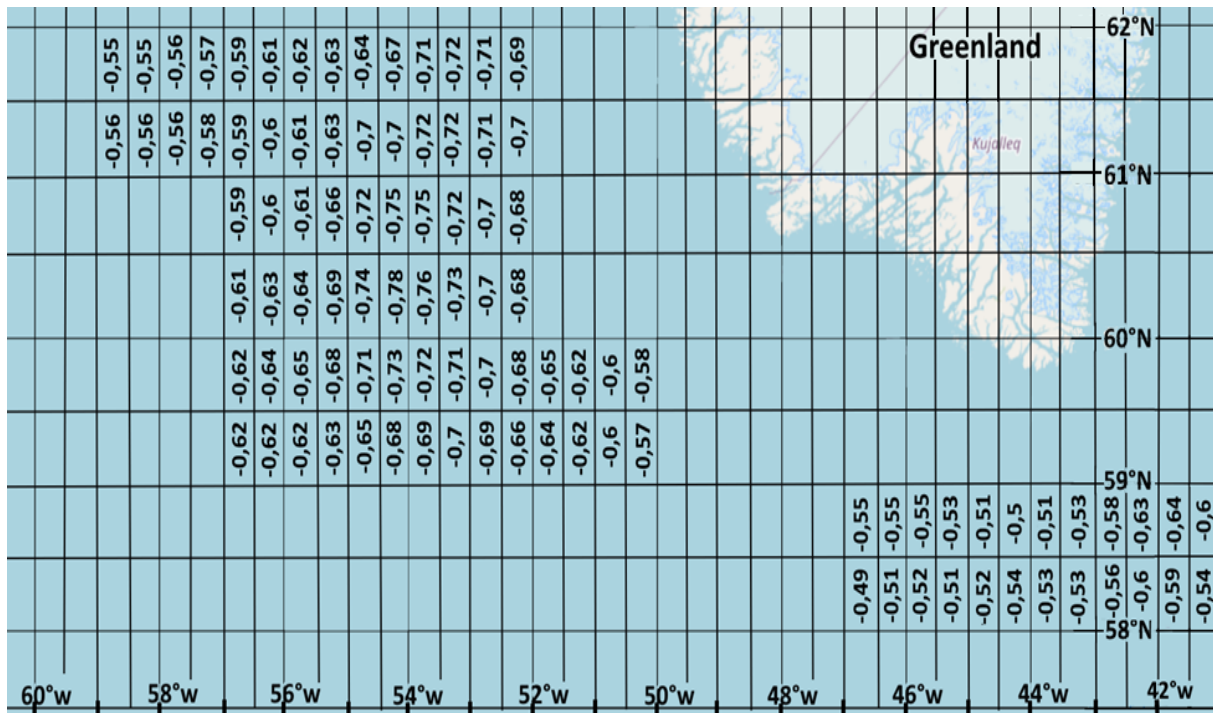
**Рис. 8** – Графік автокореляційної функції ряду відхилень льодового покриття від середньої межі на 15 квітня за період 1979-2023 рр.

**Fig. 8** – Graph of the autocorrelation function of a series of deviations of the ice cover from the average limit on April 15 for the period 1979-2023



**Рис. 9** – Максимальні за рік значущі коефіцієнти кореляції між рядом річного приросту аномалій і середньомісячними значеннями SAT на квадратах 0,5×0,5°

**Fig. 9** – The maximum annual significant correlation coefficients between the series of annual growth of anomalies and average monthly SAT values on 0.5×0.5° squares



**Рис. 10** – Максимальні за рік значущі коефіцієнти кореляції між рядом річного приросту аномалій і середньомісячними значеннями SST на квадратах  $0,5 \times 0,5^\circ$

**Fig. 10** – Maximum annual significant correlation coefficients between the series of annual growth of anomalies and average monthly SST values in  $0.5 \times 0.5^\circ$  squares

**Таблиця 3** – Максимальні значення значущих коефіцієнтів кореляції ряду річного приросту аномалій на 15 квітня з середньомісячними SST на протязі року

**Table 3** – Maximum values of significant correlation coefficients of the series of annual growth of anomalies on April 15 with average monthly SST throughout the year

Межі району	Розмір квадратів	Межі/значення максимальних коефіцієнтів кореляції			
		Грудень	Січень	Лютий	Березень
№1 50 – 60° N 40 – 50° W	5×5°	-0,55	-0,61		
	2,5×2,5°	-0,54	-0,62		-0,52
	1×1°	-0,53 – -0,55	-0,58 – -0,62	-0,52	-0,54 – -0,56
	0,5×0,5°	-0,51 – -0,55	-0,6 – -0,64		
	Точки	-0,53 – -0,57	-0,6 – -0,65	-0,51	
№2 50 – 60° N 50 – 60° W, виключаючи сушу	5×5°	-0,52			-0,54
	2,5×2,5°	-0,54 – -0,55		0,52	-0,61 – -0,65
	1×1°	-0,54 – -0,58	-0,51	-0,61 – -0,64	-0,69 – -0,72
	0,5×0,5°	-0,55 – -0,59	-0,51	-0,6 – 0,64	-0,69 – -0,73
	Точки	-0,55 – -0,6	-0,5 – -0,55	-0,59 – -0,64	-0,7 – -0,76
№3 60 – 70° N 50 – 60° W, виключаючи сушу	5×5°				-0,63
	2,5×2,5°	-0,64		-0,62	-0,76
	1×1°	-0,51 – -0,53		-0,57 – -0,63	-0,7 – -0,76
	0,5×0,5°	-0,51 – -0,54	-0,52	-0,59 – -0,64	-0,7 – -0,78
	Точки	-0,5 – -0,55	-0,5 – -0,53	-0,6 – 0,64	-0,7 – -0,77

**Таблиця 4** – Максимальні значення значущих коефіцієнтів кореляції ряду річного приросту аномалій на 15 квітня з середньомісячними SAT на протязі року

**Table 4** – Maximum values of significant correlation coefficients of the series of annual growth of anomalies on April 15 with average monthly SAT throughout the year

Межі району	Розмір квадратів	Межі/значення максимальних коефіцієнтів кореляції			
		Грудень	Січень	Лютий	Березень
№1 50 – 60° N 40 – 50° W	5×5°	-0,66 – -0,68			-0,58
	2,5×2,5°	-0,68 – -0,7			-0,64
	1×1°	-0,67 – -0,71			-0,6 – -0,66
	0,5×0,5°	-0,69 – -0,71			-0,55 – -0,6
	Точки	-0,68 – -0,71			-0,58 – -0,61
№2 50 – 60° N 50 – 60° W, виключаючи сушу	5×5°	-0,67			-0,62
	2,5×2,5°	-0,65 – -0,69			-0,65 – -0,68
	1×1°	-0,65 – -0,69			-0,68 – -0,72
	0,5×0,5°	-0,68 – -0,69		-0,5	-0,69 – -0,73
	Точки	-0,68 – -0,69		-0,5 – -0,51	-0,69 – -0,74
№3 60 – 70° N 50 – 60° W, виключаючи сушу	5×5°	-0,63		-0,52	-0,72
	2,5×2,5°	-0,61 – -0,67		-0,5 – -0,51	-0,69 – -0,74
	1×1°	-0,63 – -0,68	-0,5	-0,5 – -0,51	-0,7 – -0,75
	0,5×0,5°	-0,64 – -0,68	-0,5	-0,5 – -0,51	-0,72 – -0,75
	Точки	-0,64 – -0,69	-0,5	-0,5 – -0,51	-0,71 – -0,75

Розповсюдження льодового покриву в протоці Дейвіса та морі Лабрадор має досить різноманітний характер з року в рік, але, тим не менш, можливо об'єднати деякі роки за різними спільними ознаками. По-перше, це класифікація за розповсюдженням крижаного покриву відносно середньої межі. Згідно цього розглянемо три групи: розповсюдження більше за середнє (рис. 1), розповсюдження менше за середнє (рис. 11б, 11в) і розповсюдження близько до середнього (рис. 11а). До першої групи відносяться 1980, 1982 – 1985, 1987, 1989 – 1995, 1997, 2003, 2008 – 2009 і 2014 – 2017 роки, що складає 47% випадків за період. До другої – 1979, 1981, 1986, 1988, 1996, 1998 – 2001, 2004 – 2007, 2010, 2011, 2013, 2018 – 2023 роки, або 49% випадків. Хоча в якості точки відліку ми беремо середнє за 1981 – 2010 роки, але і за наш, значно більший розглядуваний період, кількість членів обох груп майже однакова. Третя група найменша. В першому наближенні туди можна віднести 2002 і 2012 роки, або 4% випадків.

По-друге, середню межу вздовж меридіану можна поділити приблизно на три однакові відрізки: 65° – 60°, 60° – 55° і 55° – 50° N, та на них розглядати розташування льодового поля відносно межі. На першому відрізку розповсюдження криги, більше за середнє,

спостерігалось у 1981 – 1985, 1987, 1989 – 1991, 1993 – 1995, 2009, 2012, 2014, 2015, 2017 і 2022 роках (у 11 випадках – значне), що складає 40% випадків за період (рис. 1). Менше за середнє було у 1979, 1980, 1986, 1988, 1996, 1998 – 2001, 2003 – 2007, 2010, 2011, 2013, 2016, 2018 – 2021 і 2023 роках (у 7 випадках – значне), або у 51% випадків (рис. 11б, 11в). У цьому районі перші 17 років (1979 – 1995 рр.) значно переважала додатна аномалія – 12 випадків, лише одного разу – середнє розповсюдження, і 4 рази спостерігалась від'ємна. Наступні 13 років (1996 – 2008 рр.) її не було зовсім, а останні 15 років (2009 – 2023 рр.) трохи переважала від'ємна (8 проти 6). Розповсюдження близько до середнього спостерігалось у 1992, 1997, 2002 і 2008 роках, або у 9% випадків (рис. 11а).

На другому відрізку розповсюдження криги, більше за середнє, спостерігалось у 1980, 1983, 1984, 1987 – 1991, 1993 – 1995, 2009, 2012, 2014 – 2017 роках (у 7 випадках – значне), що складає 38% випадків за період (рис. 1). Менше за середнє було у 1979, 1981, 1996 – 1999, 2003 – 2006, 2008, 2010, 2011, 2013, 2018 – 2021 і 2023 роках (у 2 випадках – значне), або у 42% випадків (рис. 11б, 11в). Розповсюдження близько до середнього спостерігалось у 1982, 1985, 1986, 1992, 2000 – 2002, 2007 і 2022 роках, або у 20% випадків (рис. 11а). Тут у перші 17

років (1979 – 1995 рр.) переважала додатна аномалія – 11 випадків, досить часто було середнє розповсюдження криги – у 4 випадках, і лише 2 рази спостерігалася від’ємна. Наступні 13 років (1996 – 2008 рр.) додатної аномалії не було зовсім, а останні 15 років (2009 – 2023 рр.) трохи переважала від’ємна аномалія (8 проти 6).

Як бачимо, розповсюдження криги на першому і другому відрізках майже аналогічне одне одному. Коли більш детально порівняти ці два відрізки, то можна помітити, що на першому значних відхилень (як додатних, так і від’ємних) було у два рази більше, ніж на другому. Також, на другому відрізку за 45 років спостерігалася лише два випадки значних від’ємних аномалій (2004, 2006 рр.) (рис. 11б).

На третьому відрізку розповсюдження криги, більше за середнє, спостерігалася у 1980, 1982 – 1985, 1989 – 1994, 1998, 2003, 2008, 2009, 2014 – 2017 роках (у 15 випадках – значне), що складає 42% випадків за період (рис. 1). Менше за середнє було у 1979, 1981, 1986 – 1988, 1995 – 1997, 1999, 2000, 2001, 2004 – 2007, 2010 – 2013, 2019 – 2023 роках (у 15 випадках – значне), або у

53% випадків (рис. 11б). Розповсюдження близьке до середнього спостерігалася у 2002 і 2018 роках, або у 5% випадків (рис. 11а). Таким чином, третій відрізок виявився чемпіоном по кількості значних аномалій. Крім того, на цій ділянці середньої межі в одному місці могла бути досить велика додатна аномалія, у другому – від’ємна, а при складанні розподіл міг опинитися близьким до середнього (рис. 11а). Якщо на інших відрізках спостерігалися значні аномалії, то вони були тільки одного знаку.

Також, часом біля острова Ньюфаундленд з’являється великий крижаний «язик», спрямований частіше на південний схід або на схід (рис. 1). Він спостерігався у 1985, 1989 – 1995, 2003, 2008, 2009, 2014 – 2016 роках, що складає 31% випадків за період, а його широтне положення могло дещо змінюватись з року в рік. По-третє, можна розглядати крижане поле за наявністю або відсутністю льоду в Дейвісовій протоці вздовж південно-західного узбережжя Гренландії, від мису Фарвел до місця примикання середньої межі. Тут теж можна виділити три групи: коли криги немає (рис. 11а),

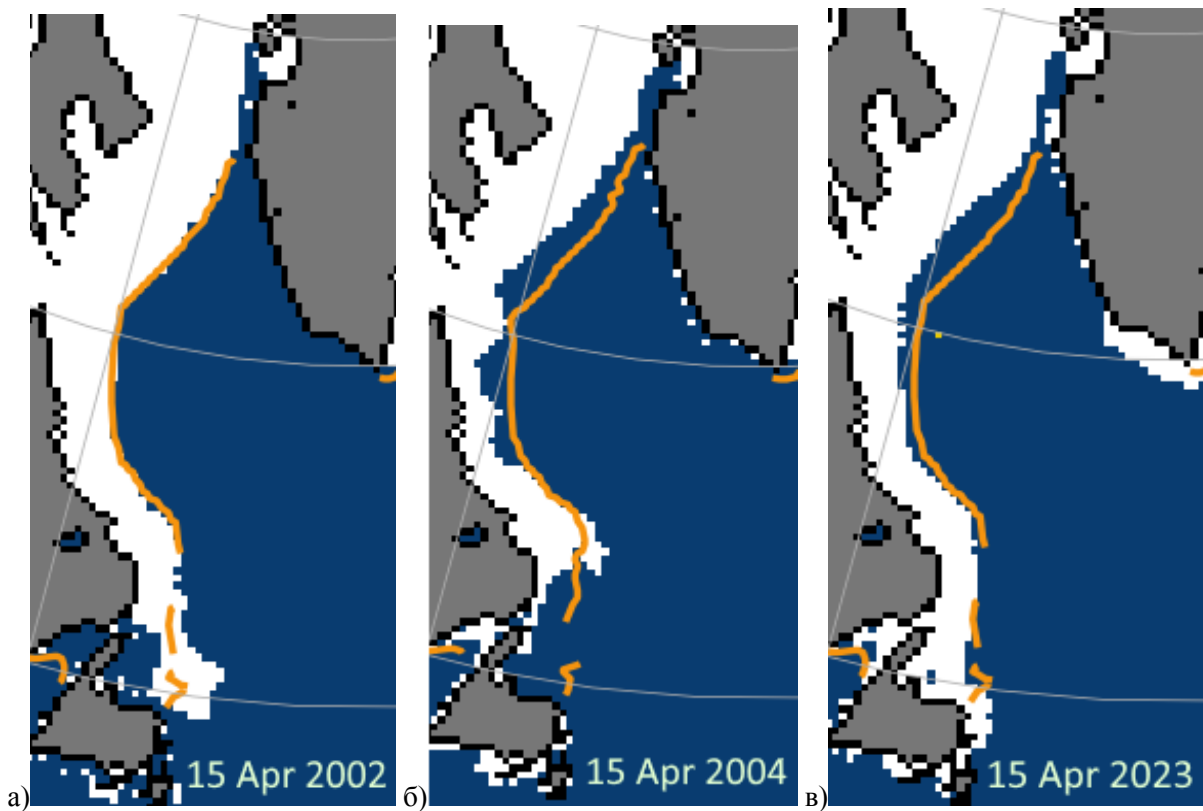


Рис. 11 – Розповсюдження морської криги в протоці Дейвіса та морі Лабрадор на 15 квітня 2002 (а), 2004 (б) і 2023 (в) роки [18]

Fig. 11 – Distribution of sea ice in Davis Strait and the Labrador Sea on April 15, 2002 (a), 2004 (b) and 2023 (c) [18]

коли криги дуже мало (рис. 1, 11б) і коли крига присутня (рис. 11в). Зрозуміло, що перша група буде найменшою, туди входять лише 2002, 2011, 2014 і 2017 роки, що складає 9% випадків за період. Друга група значно більша: 1986, 1988 – 1994, 1997, 1998, 2003 – 2007, 2010, 2013, 2015, 2016, 2018 – 2021 роки, або 51% випадків. Вісімнадцять років, що залишилися (40% випадків), відносяться до третьої групи. Тобто, більшу частину досліджуваного періоду (27 випадків проти 18) вздовж південно-західного узбережжя Гренландії льоду або було дуже мало, або він був взагалі відсутнім.

Таким чином, зрозуміло, що розповсюдження льодового покриву у досліджуваному районі можна розглядати, як ряд типових ситуацій. Кожна з них має свої індивідуальні особливості викликані багатьма факторами, наприклад, пануючими вітрами, температурою води і повітря, течіями, тощо. Виявлення і вплив цих факторів на крижане поле потребує подальшого поглибленого вивчення.

#### 4 ВИСНОВКИ

В міжрічній мінливості льодового покриву в Дейвісовій протоці та морі Лабрадор за період 1979-2023 рр. спостерігається суттєвий статистично значущий від'ємний тренд, а також присутні циклічні коливання з періодами 3-6,9, 10 і 13 років.

У виконаній роботі знайдено кілька районів / точок у Північній Атлантиці, де показники температур приземного повітря і поверхневої води у грудні та березні суттєво впливають на розповсюдження льодового покриву на 15 квітня в Дейвісовій протоці та морі Лабрадор.

Найбільш стабільним за досліджуваний період виявилось розповсюдження криги між 60° – 55° північної широти, де воно найчастіше було близьким до середнього та мало найменше значних аномалій. Самим нестабільним льодовий покрив виявився на ділянці нижче 55° північної широти, де кількість значних аномалій максимальна, крім того одночасно можуть спостерігатись досить великі додатні і від'ємні аномалії і час від часу з'являються чималі крижані «язики». Вздовж південно-західного узбережжя Гренландії більшу частину періоду з 1979 по 2023 рік льоду або було дуже мало, або він був взагалі відсутнім.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Divergent consensuses on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather / Cohen J. et al. *Nature Climate Change*. 2020. 10. Pp. 20-29. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0662-y>
2. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Summary for policymakers / The Intergovernmental Panel on Climate Change. 2021. URL: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/> (Accessed: 20.08.2023)
3. Version 2 of the EUMETSAT OSI SAF and ESA CCI sea-ice concentration climate data records / Laverigne T. et al. *Cryosphere*. 2019. 13(1). Pp. 49-78. <https://doi.org/10.5194/tc-13-49-2019>
4. Notz D. Arctic sea ice in CMIP6 / SIMIP Community. *Geophysical Research Lett.* 2020. Vol. 47 (10). <https://doi.org/10.1029/2019GL086749>
5. Historical Changes in the Davis Strait Baffin Bay Surface Winds and Waves, 1979–2016 / Xiaolan L. Wang et al. *Journal of Climate*. 2021. 10 (22). Pp. 8879-8896. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0054.1>
6. Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Chapter 3: Polar Regions / The Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019. URL: <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-3-2/> (Accessed: 10.06.2023)
7. Docquier D., Koenigk T. A review of interactions between ocean heat transport and Arctic sea ice. *Environmental Research Lett.* 2021. 16 (12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac30be>
8. The influence of declining sea ice on shipping activity in the Canadian Arctic / Pizzolato L. et al. *Geophysical Research Lett.* 2016. 43 (23). Pp. 12,146-12,154. <https://doi.org/10.1002/2016GL071489>
9. Compendium of Arctic Ship Accidents / Protection of the Arctic Marine Environment. Borgir, v. Nordurslod, Akureyri, Iceland, 2021. URL: <https://www.pame.is/document-library/pame-reports-new/pame-ministerial-deliverables/2021-12th-arctic-council-ministerial-meeting-reykjavik-iceland/799-compendium-of-arctic-ship-accidents-casa-final-report/file> (Accessed: 12.06.2023)
10. Sea ice – ocean interactions in the Barents Sea modeled at different resolutions / Docquier D. et al. *Front. Earth Sci.* 2020. 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00172>
11. Volume, Freshwater, and Heat Fluxes through Davis Strait, 2004–05 / Curry B. et al. *J. Phys. Oceanogr.* 2011. 41 (3). Pp. 429-436. <https://doi.org/10.1175/2010JPO4536.1>
12. Poleward ocean heat transports, sea ice processes, and Arctic sea ice variability in NorESM1-M simulations / Sandø A. B. et al. *J. Geophys. Res. Ocean.* 2014. 119 (3). Pp. 2095-2108. <https://doi.org/10.1002/2013JC009435>
13. Dynamics of the sea ice edge in Davis Strait / Heide-Jørgensen M. P. et al. *Journal of Marine Systems*. 2007. 67(1-2). Pp. 170-178. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2006.10.011>
14. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system / Smedsrud L. H. et al. *Reviews of Geophys.* 2013. 51 (3). Pp. 415-449. <https://doi.org/10.1002/rog.20017>
15. Arctic sea ice area in CMIP3 and CMIP5 climate model ensembles – variability and change / Semenov V. A. et al. *Cryosphere*. 2015. 9. Pp. 1077-1131. <https://doi.org/10.5194/tcd-9-1077-2015>

16. Changes in Sea Surface Temperature and Sea Ice Concentration in the Arctic Ocean over the Past Two Decades / Meng Yang et al. *Remote Sensing*. 2023. 15 (4). <https://doi.org/10.3390/rs15041095>
17. Arctic sea ice variation in the Northwest Passage in 1979–2017 and its response to surface thermodynamics factors / Xin-Yi Shen et al. *Advances in Climate Change Research*. 2021. 12 (4). Pp. 563-580. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.08.004>
18. National Snow and Ice Data Center. URL: [https://masie\\_web.apps.nsidc.org/pub/DATASETS/NOAA/G02135/north/daily/images/](https://masie_web.apps.nsidc.org/pub/DATASETS/NOAA/G02135/north/daily/images/) (Accessed: 12.03.2023)
19. Admiralty sailing direction. Arctic Pilot. Vol. III. NP 12. Eight Edition / The United Kingdom Hydrographic Office, 2007. 566 p.
20. Admiralty sailing direction. Newfoundland and Labrador Pilot. NP 50. Eleventh Edition. / The United Kingdom Hydrographic Office, 2003. 588 p.
21. Climate Reanalyzer. URL: [https://climatereanalyzer.org/reanalysis/monthly\\_tseries/](https://climatereanalyzer.org/reanalysis/monthly_tseries/) (Accessed: 10.03.2023)
22. Абузяров З. К., Думанская И. О., Нестеров Е. С. Оперативное океанографическое обслуживание. Обнинск: «ИГ-СОЦИН», 2009. 287 с.
8. Pizzolato, L. et al. (2016). The influence of declining sea ice on shipping activity in the Canadian Arctic. *Geophysical Research Lett.*, 43 (23), pp. 12,146-12,154. <https://doi.org/10.1002/2016GL071489>
9. Protection of the Arctic Marine Environment. (2021). *Compendium of Arctic Ship Accidents*. Borgir, v. Nordurslod, Akureyri, Iceland. Available at: <https://www.pame.is/document-library/pame-reports-new/pame-ministerial-deliverables/2021-12th-arctic-council-ministerial-meeting-reykjavik-iceland/799-compendium-of-arctic-ship-accidents-casa-final-report/file> (Accessed: 12.06.2023)
10. Docquier, D. et al. (2020). Sea ice – ocean interactions in the Barents Sea modeled at different resolutions. *Front. Earth Sci.* 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00172>
11. Curry, B. et al. (2011). Volume, Freshwater, and Heat Fluxes through Davis Strait, 2004–05. *J. Phys. Oceanogr.*, 41 (3), pp. 429-436. <https://doi.org/10.1175/2010JPO4536.1>
12. Sandø, A.B. et al. (2014). Poleward ocean heat transports, sea ice processes, and Arctic sea ice variability in NorESM1-M simulations. *J. Geophys. Res. Ocean.*, 119 (3), pp. 2095-2108. <https://doi.org/10.1002/2013JC009435>
13. Heide-Jørgensen, M.P. et al. (2007). Dynamics of the sea ice edge in Davis Strait. *Journal of Marine Systems*, 67(1-2), pp. 170-178. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2006.10.011>
14. Smedsrud, L.H. et al. (2013). The role of the Barents Sea in the Arctic climate system. *Reviews of Geophys.*, 51 (3), pp. 415-449. <https://doi.org/10.1002/rog.20017>
15. Semenov, V.A. et al. (2015). Arctic sea ice area in CMIP3 and CMIP5 climate model ensembles – variability and change. *Cryosphere*, 9, pp. 1077-1131. <https://doi.org/10.5194/tcd-9-1077-2015>
16. Meng Yang et al. (2023). Changes in Sea Surface Temperature and Sea Ice Concentration in the Arctic Ocean over the Past Two Decades. *Remote Sensing*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/rs15041095>
17. Xin-Yi Shen et al. (2021). Arctic sea ice variation in the Northwest Passage in 1979–2017 and its response to surface thermodynamics factors. *Advances in Climate Change Research*, 12 (4), pp. 563-580. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.08.004>
18. National Snow and Ice Data Center. URL: [https://masie\\_web.apps.nsidc.org/pub/DATASETS/NOAA/G02135/north/daily/images/](https://masie_web.apps.nsidc.org/pub/DATASETS/NOAA/G02135/north/daily/images/) (Accessed: 12.03.2023)
19. The United Kingdom Hydrographic Office (2007). *Admiralty sailing direction. Arctic Pilot*, vol. III, NP 12.
20. The United Kingdom Hydrographic Office (2003). *Admiralty sailing direction. Newfoundland and Labrador Pilot*, NP 50.
21. *Climate Reanalyzer*. Available at: [https://climatereanalyzer.org/reanalysis/monthly\\_tseries/](https://climatereanalyzer.org/reanalysis/monthly_tseries/) (Accessed: 10.03.2023)
22. Абузяров, З., Думанская, И. & Нестеров, Е. (2009). *Оперативное океанографическое обслуживание [Operational oceanographic service]*. Обнинск: «ИГ-СОЦИН» Publ. (in Russ).

## REFERENCES

1. Cohen, J. et al. (2020). Divergent consensus on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather. *Nature Climate Change*, 10, pp. 20-29. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0662-y>
2. The Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Summary for policymakers*. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/> (Accessed: 20.08.2023)
3. Lavergne T. et al. (2019). Version 2 of the EUMETSAT OSI SAF and ESA CCI sea-ice concentration climate data records. *Cryosphere*, 13, pp. 49-78. <https://doi.org/10.5194/tc-13-49-2019>
4. Notz, D. & SIMIP Community. (2020). Arctic sea ice in CMIP6. *Geophysical Research Lett.*, 47 (10). <https://doi.org/10.1029/2019GL086749>
5. Xiaolan, L. Wang et al. (2021). Historical Changes in the Davis Strait Baffin Bay Surface Winds and Waves, 1979–2016. *Journal of Climate*, 10 (22), pp. 8879-8896. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0054.1>
6. The Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Chapter 3: Polar Regions*. Available at: <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-3-2/> (Accessed: 10.06.2023).
7. Docquier, D. & Koenigk, T. (2021). A review of interactions between ocean heat transport and Arctic sea ice. *Environmental Research Lett.*, 16 (12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac30be>

## **INTERANNUAL VARIABILITY OF ICE COVER ACROSS DAVIS STRAIT AND THE LABRADOR SEA FOR THE PERIOD FROM 1979 TO 2023**

**E. Maliuha<sup>1</sup>, R. Gavruluk<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*National University «Odessa Maritime Academy»,  
Didrihsona St., 8, 65000, Odesa, Ukraine, [eduard241965@gmail.com](mailto:eduard241965@gmail.com)  
<http://orcid.org/0009-0005-0039-9837>*

<sup>2</sup>*Odessa State Environmental University,  
15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine, [RAIISAGAVR@gmail.com](mailto:RAIISAGAVR@gmail.com)  
<http://orcid.org/0009-0002-9129-3293>*

In conditions of rapid development of trade and transport communications, the issue of navigation through ice regime zones became of greater importance. In particular, reduction of the area of ice cover in the Canadian Arctic because of global warming opens up favourable prospects for further development of maritime shipping in this zone. Considering that the routes through the Northwest Passage are the shortest ones of all the routes connecting the Atlantic and Pacific oceans, it is clear that all aspects of this topic are of great importance and relevance. This especially applies to the aspects dedicated to studying the characteristics of appearance, formation, concentration, physical characteristics, trajectory of ice movement and forecasting the area of the ice cover in a given zone, i.e. the characteristics affecting the conditions of ice navigation and serving as determining factors in terms of navigation safety.

The research examines some of these issues, namely the spread of the ice cover during the period of its maximum formation across Davis Strait and the Labrador Sea (where the routes through the Northwest Passage start) and the establishment of statistical relations between the ice spread and the temperatures of surface water and surface air. The research method to be used: synoptic-climatic and statistical analysis of numerical series of ice cover deviations from its average limit as of April 15 over the period of 1979-2023 within the zone in study.

Based on the set goal, the study processed raw data on distribution of ice cover across Davis Strait and the Labrador Sea for the period of 1979-2023 and completed its statistical analysis. The results of the analysis showed presence of a statistically significant negative trend and cyclical fluctuations with periods of 3-6, 9, 10 and 13 years in relation to the interannual variability of ice cover distribution for the studied period. Positive trends are also observed in the interannual variability of surface water temperature and surface air temperature. After bringing the original series to a quasi-stationary form, a correlation analysis of the relationships between the ice cover distribution and the temperature of water and air was carried out. The results of the analysis determined zones and points with statistically significant correlation coefficients between them during the year. It turned out that the highest values of coefficients are observed from December to March, and the maximum one occurs in March.

Systematization and analysis of the ice field across Davis Strait and the Labrador Sea during the period of maximum development made it possible to establish that the spread of ice between 60° and 55° north parallels was the most stable during the studied period, and the least stable was observed in the area below 55° north parallel.

The results of the conducted research open up prospects for development of methods for forecasting the distribution of ice cover across Davis Strait and the Labrador Sea. This will make ice navigation in this area safer.

**Keywords:** ice cover; Davis Strait; the Labrador Sea; Northwest Passage; spread of ice

*Подання до редакції : 16. 10. 2023  
Надходження остаточної версії : 07. 12. 2023  
Публікація статті : 21. 12. 2023*