

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І. І. МЕЧНИКОВА

Факультет гідрометеорології і екології

Кафедра океанології та морського природокористування

## Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

### ОСОБЛИВОСТІ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ МІНЛИВОСТІ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ ЧОРНОГО МОРЯ

### FEATURES OF SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY OF THE BLACK SEA SURFACE TEMPERATURE

Виконала студентка 4 курсу денної форми навчання  
спеціальності 103 «Науки про Землю»  
Освітньо-професійна програма Гідрометеорологія

Сриберко Анастасія Андріївна

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

Керівник д.геогр. н., професор Берлінський М. А.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент к. геогр. н., доц. Хоменко І. А.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

Рекомендовано до захисту:  
Протокол засідання кафедри  
океанології та морського  
природокористування  
№ \_\_\_\_ від \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . 2025 р.

Завідувач кафедри

БЕРЛІНСЬКИЙ Микола

(підпис)

(прізвище, ім'я)

Захищено на засіданні ЕК № 2  
протокол № \_\_ від \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . 2025 р.

Оцінка \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_  
(за національною шкалою/шкалою ECTS/ бали)

Голова ЕК

(підпис)

ОВЧАРУК Валерія

(прізвище, ім'я)

Одеса 2025

## ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	3
1 ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ЧОРНОГО МОРЯ.....	5
1.1 Географічне положення .....	6
1.2 Морфологія та рельєф дна .....	8
1.3 Температурні характеристики води в Чорному морі .....	11
1.4 Сучасні методи дослідження гідрофізичних параметрів Світового океану.....	15
2 МЕТОДИ ТА МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	23
2.1 Вихідні супутникові дані температури поверхні Чорного моря .....	23
2.2 Статистичні характеристики для оцінки розрахунків .....	24
3 АНАЛІЗ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ МІНЛИВОСТІ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ ЧОРНОГО МОРЯ.....	27
3.1 Внутрішньорічна мінливість температури поверхні Чорного моря за супутниковими даними у періоді 2000 – 2024 роки.....	27
3.2 Сезонна мінливість температури поверхні за супутниковими даними у періоді 2000 – 2024 роки.....	31
3.3 Міжрічна мінливість температури поверхні Чорного моря та її загальний просторовий розподіл за супутниковими даними у періоді 2000-2024 роки .....	33
ВИСНОВКИ .....	37
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	39

## ВСТУП

На тлі поточних глобальних змін клімату все більшої актуальності набувають дослідження, пов'язані з вивченням динаміки гідрофізичних характеристик морських басейнів. Однією з ключових складових гідрологічного режиму є температура води, особливо в поверхневому шарі, де її зміни найтісніше пов'язані з атмосферними процесами. Чорне море як замкнута напівізольована екосистема є вразливим як до глобальних кліматичних впливів, так і до локальних антропогенних чинників. У зв'язку з цим дослідження просторово-часових особливостей температури поверхні Чорного моря стає надзвичайно важливим. Температурний режим поверхні Чорного моря визначається взаємодією низки природних факторів: атмосферою циркуляцією, сонячною радіацією, вітровим впливом, вертикальним і горизонтальним теплообміном, конвективним перемішуванням, морськими течіями та апвелінговими процесами. Просторова неоднорідність температурного поля морської поверхні є наслідком як природних кліматичних градієнтів, так і складної циркуляційної структури моря. Часові зміни, у свою чергу, охоплюють широкий спектр масштабів — від добової до міжрічної мінливості, що вимагає комплексного аналізу довготривалих спостережень.

Завдяки розвитку дистанційних методів моніторингу, зокрема супутникової зйомки, з'явилася можливість систематичного аналізу температурних змін із високою просторовою та часовою розрізненістю. Ці дані дозволяють виявити як короткотривалі аномалії, так і довгострокові тренди, що пов'язані з потеплінням клімату. Особливий інтерес викликає аналіз температурної динаміки на фоні глобального потепління, яке значно впливає на фізичні, хімічні й біологічні процеси в морських екосистемах.

Таким чином, дослідження просторово-часової мінливості температури поверхні Чорного моря є важливим етапом у розумінні сучасних кліматичних змін та їх наслідків для регіональних морських систем, а також може бути

корисним для прогнозування майбутніх змін у морському середовищі та для ухвалення ефективних екологічних рішень.

Метою роботи є аналіз просторово-часової мінливості температури поверхні Чорного моря у періоді 2000 – 2024 роки на основі супутникових даних.

## 1 ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ЧОРНОГО МОРЯ

Чорне море є найбільш ізольованим від Світового океану, сполучене з Атлантичним океаном протоками Босфор, Дарданелли та Гібралтарський, а також Мармуровим, Егейським та Середземним морями. З Азовським морем воно з'єднується через Керченську протоку на північному сході моря. Чорне море розташоване між Східно-Європейським масивом на півночі та південними територіями Малої Азії, Кавказом зі сходу й Балканами із заходу. На даний момент узбережжя Чорного моря розділене між Україною, Румунією, Болгарією, Туреччиною, Грузією та Росією. Площа водної поверхні складає 432 000 км<sup>2</sup>. Чорне море дуже вразливе до тиску з боку наземної людської діяльності, та її здоров'я однаково залежить від прибережних і неприбережних країн його басейну [1, 2].

Морфометричні характеристики басейну і рельєф морського дна мають велике значення для океанографії, оскільки вони визначають особливості термохалинної структури і водної циркуляції. Глибина моря впливає на формування глибинних водних мас, а обсяг води визначає тепловий баланс басейну і ступінь його взаємодії з атмосферними процесами. Водобмін із сусідніми морями і ступінь ізольованості басейну залежать від глибини і ширини проток. Крім того, такі чинники, як форма берегової лінії, ширина шельфу і континентального схилу, профіль дна, підводні хребти, западини, долини і каньйони, впливають на розподіл водних мас, рух течій та інтенсивність топографічно зумовлених вихорів і прибережного апвелінгу. Райони з крутими схилами і межа шельфу служать природними хвилеводами для захоплених хвиль. Напрямок і стійкість великомасштабних течій багато в чому залежать від рельєфу морського дна, а їхня інтенсивність визначається ухилом дна в районі континентального схилу [3].

## 1.1 Географічне положення

Відомо [1, 3, 4], що географічні межі Чорного моря визначаються такими крайніми координатами: на півночі –  $46^{\circ}38'$  пн.ш. (вхід у Березанський лиман), на півдні –  $40^{\circ}54'$  пн.ш. (район міст Гіресун і Сюрмене в Туреччині), на заході –  $27^{\circ}27'$  сх.д. (Бургаська затока), на сході –  $41^{\circ}47'$  сх.д. (район міста Кобулеті, Грузія).

Згідно з традиційними і сучасними класифікаціями морів і океанів, межа між Чорним і Азовським морями проходить через Керченську протоку за лінією між мисом Такіль ( $45^{\circ}06'$  пн. ш.,  $36^{\circ}27'$  сх. д.) на південно-східному краї Керченського півострова та мисом Панагія ( $45^{\circ}08'$  пн. ш.,  $36^{\circ}38'$  сх. д.) на південно-західному краї Таманського півострова. Кордон між Чорним морем і Мармуровим морем проходить у північній частині протоки Босфор, з'єднуючи мис Румелі ( $41^{\circ}14'$  пн.ш.,  $29^{\circ}07'$  сх. д.) з мисом Анadolу ( $41^{\circ}13'$  пн.ш.,  $29^{\circ}09'$  сх. д.). Таким чином, протока Босфор належить до Мармурового моря, а Керченська протока – до Азовського.

Протяжність Чорного моря із заходу на схід від вершини Бургаської затоки до міста Кобулеті ( $42^{\circ}29'$  –  $41^{\circ}51'$  пн. ш.) становить 1180 км. Максимальна ширина моря в меридіональному напрямку ( $31^{\circ}10'$  сх.д.) сягає 615 км, а мінімальна – 264 км між мисами Сарич і Керемпе. Відстань по прямій лінії від мису Херсонес до протоки Босфор – 615 км, а від Ялти до Батумі – 685 км.

Берегова лінія моря становить 4340 км [4], з яких 1628 км належать Україні, 300 км – Болгарії, 310 км – Грузії, 225 км – Румунії, 1400 – Туреччині та 475 км – Росії.

Великих островів у Чорному морі немає. Найзначнішим є острів Зміїний (площа –  $1,5 \text{ км}^2$ ), що розташований за 35 км від гирла Дунаю. Серед дрібних островів виділяються Березань (біля входу в однойменний лиман) і Кефкен (за 93 км на схід від протоки Босфор).

Берегова лінія Чорного моря має слабо виражену порізаність. Найзначнішими формами суші, які мають вплив на циркуляцію водних мас, є

Кримський півострів і північна частина Анатолійського півострова між містами Ереглі та Гіресун. Менші географічні об'єкти, зокрема півострови Тарханкут, Інджебурун (Синопський), Ясун, Гераклеїський, дельти Кизил-Ірмак та Ешиль-Ірмак, а також мис Каліакра й Меганом, беруть участь у формуванні водообміну в прибережних районах.

Великі затоки, включно з Одеською, Каркінитською, Каламітською, Феодосійською, Синопською, Бургаською, Варненською, а також бухтами Самсун, Севастопольською, Новоросійською та Геленджицькою (рис. 1.1) мають специфічні гідрологічні та гідродинамічні особливості, зумовлені їхньою морфологією.

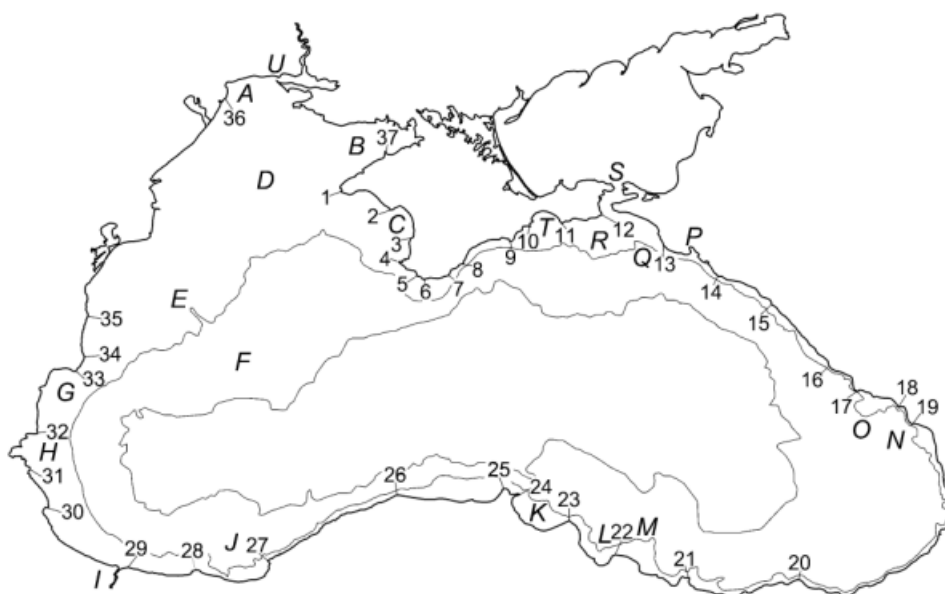


Рисунок 1.1 – На схемі Чорного моря позначено:

А – Одеська затока, В – Каркінитська затока, С – Каламітська затока, D – північно-західний шельф, Е – Дунайський каньйон, F – конус виносу палео-Дунаю, G – Варненська затока, H – Бургаська затока, I – протока Босфор, J – каньйон Сакар'я, K – Синопська затока, L – бухта Самсун, M – хребет Архангельського, N – каньйон Кодорі, O – Гудаутська банка, P – Новоросійська бухта, Q – каньйон Кубань, R – Керченсько-Таманський шельф, S – Керченський півострів, T – Феодосійська затока, U – Кінбурнська коса; 1 – м. Тарханкут, 2 – м. Євпаторійський, 3 – м. Лукул, 4 – м. Херсонес, 5 – м. Айя, 6 – м. Сарич, 7 – м. Ай-Тодор, 8 – м. Аю-Даг, 9 – м. Меганом, 10 – м. Кіік-Атлома, 11 – м. Чауда, 12 – м. Такиль, 13 – м. Утриш, 14 – м. Ідокопас, 15 – м. Кодош, 16 – м. Костянтинівський, 17 – м. Пісунда, 18 – м. Сухумський, 19 – м. Іскурія, 20 – м. Ішикли, 21 – м. Чам, 22 – м. Джива, 23 – м. Бафра, 24 – м. Бозтепе, 25 – м. Інджебурун, 26 – м. Керемпе, 27 – м. Олюдже, 28 – м. Пазарбаші, 29 – м. Анадолу, 30 – м. Кору, 31 – м. Маслен-Нос, 32 – м. Еміне, 33 – м. Каліакра, 34 – м. Шабла, 35 – м. Тузла, 36 – м. Великий Фонтан, 37 – м. Піщаний (тонкими лініями позначено ізобати 200 і 2000 м) [3]

## 1.2 Морфологія та рельєф дна

Рельєф дна Чорного моря ділиться на три основні області [4]:

- Шельф – прибережна зона з відносно невеликою глибиною.
- Континентальний схил – перехідна область між шельфом і глибокою частиною моря.
- Глибоководна улоговина – центральна частина дна, що характеризується найбільшими глибинами.

Схематичне відображення рельєфу дна наведено на рисунку 1.2.

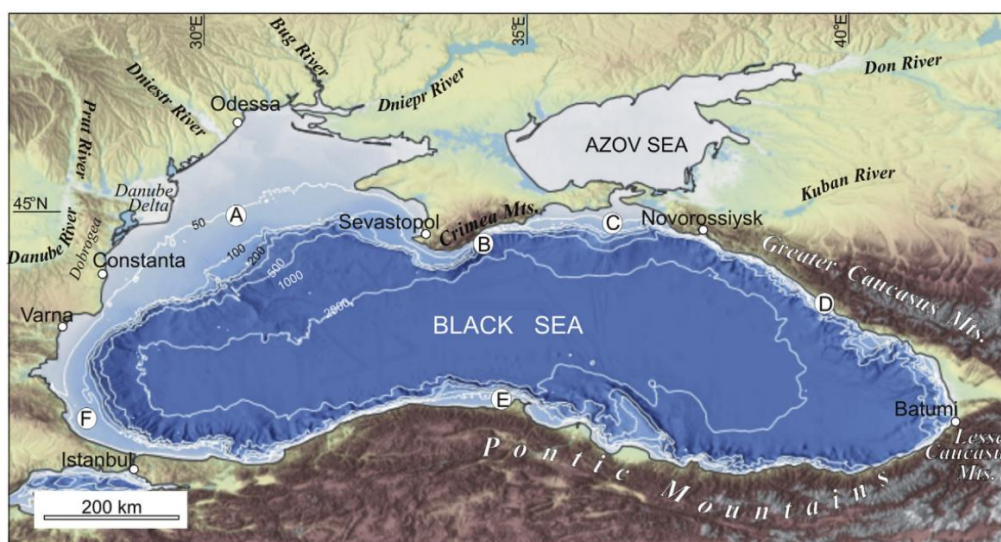


Рисунок 1.2 – Рельєф Чорного моря. А. Північно-Західний шельф. В. Кримський шельф. С. Керченсько-Таманський шельф. Д. Кавказький шельф. Е. Анатолійський шельф. F. Болгарсько-Західно-Турецький шельф [5]

У роботі [3] наведено, що шельф (або материкова мілина), будучи затопленою частиною прибережної суші, займає близько 25 % акваторії Чорного моря ( $112\,140\text{ км}^2$ ) і містить лише 1,5% обсягу вод ( $8\,190\text{ км}^3$ ). Межа шельфу традиційно визначається ізобатою 200 м, яку зазвичай приймають за межі шельфової зони для Світового океану.

Найширший шельф розташований на північному заході моря, де його максимальна ширина сягає 220 км. Північно-західний шельф (рис. 1.3) охоплює 16% акваторії моря (68 390 км<sup>2</sup>) і містить 0,7% обсягу вод (3 555 км<sup>3</sup>), простягаючись від мису Херсонес до мису Каліакра. У цій зоні:

- На мілководних ділянках глибиною 30-40 м дно відрізняється невеликим ухилом у межах 1'-2'.
- Ухил значно збільшується ближче до бровки мілини, досягаючи 10'-12'.

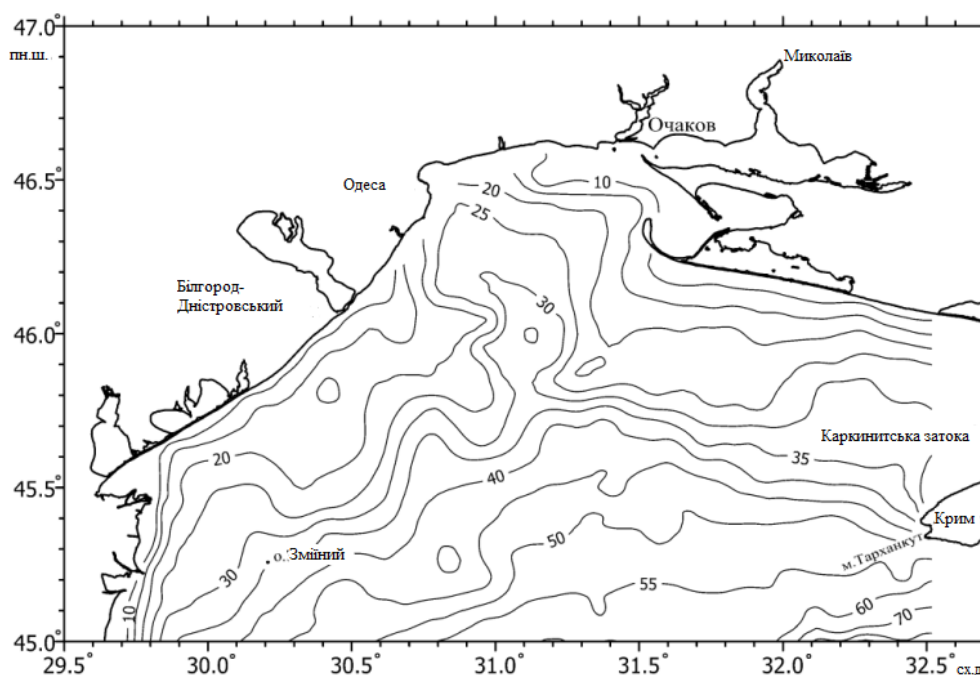


Рисунок 1.3 – Батиметрична карта північно-західного шельфу за даними морських навігаційних карт [3]

На рівній рівнинній поверхні шельфу виділяються великі пологі улоговини – долини давніх річок, розділені підводними височинами (рис. 1.3).

Інші шельфові зони Чорного моря включають:

- Узбережжя Болгарії та західної Туреччини – від мису Каліакра до міста Ереґлі, ширина шельфу сягає 50 км.
- Керченсько-Таманський шельф, ширина до 50 км.

- Центральна частина Анатолійського узбережжя – від мису Керемпе до міста Гіресун, ширина шельфу до 35 км.
- Південне узбережжя Криму – від мису Херсонес до мису Ай-Тодор, ширина шельфу до 30 км.
- Гудаутська банка (в районі міста Очамчира), ширина шельфу не перевищує 20 км.

Вздовж Кавказького та Анатолійського узбережжя, а також біля Південного берегу Криму, від Ялти до мису Меганом, ширина материкової мілини може досягати кількох кілометрів. Нахил дна на цих вузьких шельфах значно більший, ніж на широких, і варіюється від 5–6' до 30'. Бровка шельфу, тобто зона різкого збільшення нахилу дна, розташована на глибинах від 100 м до 200 м, з нахилом дна 1–2° (рис. 1.4). На ділянках із вузьким шельфом глибина бровки наближається до 100 м, іноді зменшуючись до 50 м, тоді як у районах із ширшими шельфами вона може перевищувати 200 м.

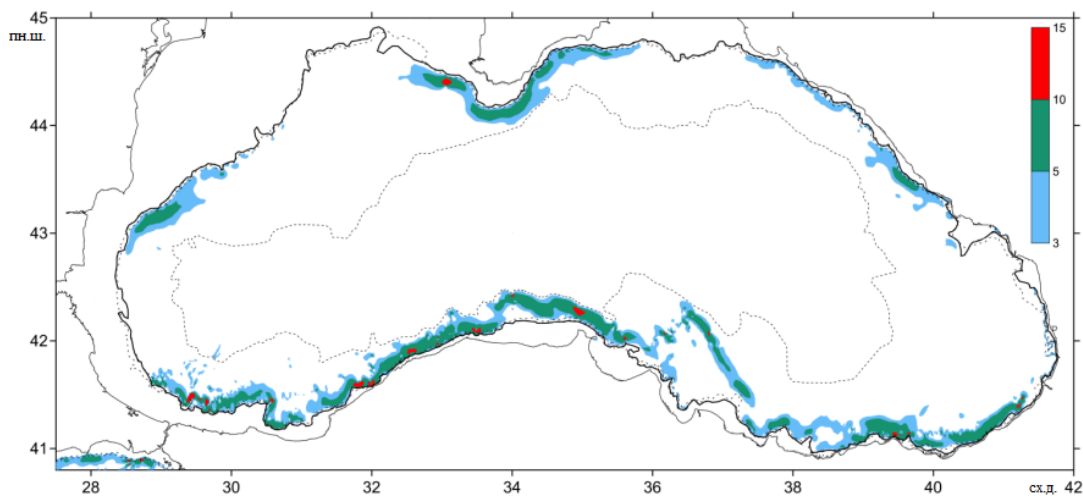


Рисунок 1.4 – Положення бровки шельфу в Чорному морі за даними масиву GEBCO 2008 (жирна лінія). Суцільною заливкою показано нахил дна з градаціями: 3 – 5°, 5 – 10° і 10 – 15°, пунктиром нанесено ізобати 200 і 2000 м [3]

У таблиці 1.1 наведено морфометричні характеристики, розраховані авторами [6] за даними масиву глибин 5'×5', створеного на основі морських навігаційних карт. Загальна площа поверхні моря (без лиманів, включаючи

Дніпровсько-Бузький) склала 416790 км<sup>2</sup>, а об'єм води – 535430 км<sup>3</sup>. Середня глибина моря, отримана шляхом ділення об'єму води на площу, дорівнює 1284 м. Різниця між новими морфометричними характеристиками та попередніми оцінками становить менш ніж 1%, попри використання карт більшого масштабу.

Таблиця 1.1 – Морфометричні характеристики Чорного моря

Шар, м	Площа верхнього горизонту, км <sup>2</sup>	%	Об'єм, км <sup>3</sup>	%
0 – дно	416790	100	535430	100
20 – дно	397590	95	527260	98
50 – дно	361390	87	515880	96
100 – дно	323270	77	498990	93
200 – дно	310340	74	467460	87
500 – дно	292840	70	377120	70
1000 – дно	265660	64	237410	44
1500 – дно	229190	55	113200	21
2000 – дно	139810	34	16860	3
2100 – дно	94720	23	4750	0,9

### 1.3 Температурні характеристики води в Чорному морі

Температура водних мас у Чорному морі має значні коливання: від значень, близьких до точки замерзання в північних прибережних районах (–0,97°C при солоності 18‰, –0,54°C при солоності 10‰), до максимумів 28°C – 29°C у період найвищого літнього прогріву. Середня температура води по всьому

об'єму моря складає  $8,96^{\circ}\text{C}$ , що значно вище середньої температури океанів, але нижче температури сусіднього Середземного моря. Середній показник температури на поверхні складає  $14,87^{\circ}\text{C}$ , в верхньому шарі 0 – 300 м вона дорівнює  $8,81^{\circ}\text{C}$ , а в глибинному шарі 400 – 2000 м підвищується до  $8,99^{\circ}\text{C}$ .

Вертикальна структура активного шару Чорного моря включає кілька ключових компонентів: верхній майже однорідний шар, що простягається приблизно від 5 до 130 м; сезонний термоклин, у якому в літній період максимум вертикального температурного градієнта фіксується на глибинах 15–20 м (до  $-5^{\circ}\text{C}$  на метр, у середньому — близько  $-1^{\circ}\text{C}$  на метр); а також холодний проміжний шар (ХПШ), що характеризується мінімумом температури на глибинах 30–100 м. Нижче осі ХПШ температура стабільно зростає з глибиною і досягає близько  $9,1^{\circ}\text{C}$  у придонних шарах (рис. 1.4). У товщі води між 50 і 100 м спостерігається постійний термоклин (іноді його називають антитермоклином) із вертикальним градієнтом температури до  $+0,2^{\circ}\text{C}$  на метр, при середньому значенні  $+0,02^{\circ}\text{C}$  на метр [3].

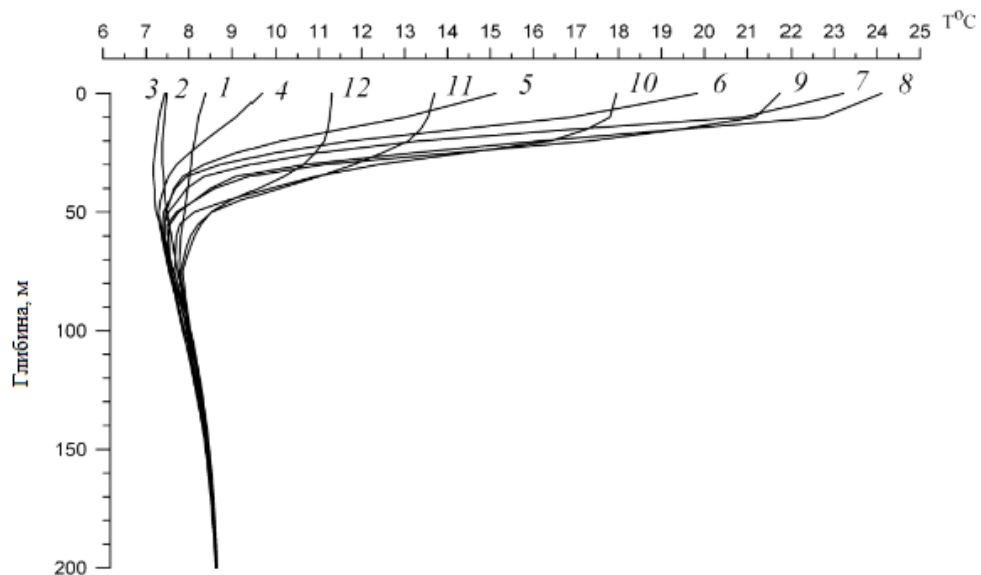


Рисунок 1.4 – Середньомісячні вертикальні профілі температури води в Чорному морі (цифри позначають місяці року) [3]

**Просторовий розподіл.** Кліматичні термохалінні поля Чорного моря, розраховані за даними різних періодів, представлені в численних кліматичних атласах: [7-9].

Найтипівішою рисою просторового розподілу температури на поверхні Чорного моря є її підвищення з північного заходу до південного сходу протягом року (рис. 1.5). Це пов'язано із загальними атмосферними умовами регіону:

- Північно-західна частина Чорного моря має помірний клімат,
- Східна половина моря – субтропічний.

У холодну пору року спостерігається значне зниження температур не лише в північному заході, але й у центральній частині моря внаслідок інтенсивного охолодження в зонах циклонічної активності. Максимальні температурні контрасти припадають на зиму, тоді як у весняно-літній період температурний фон стає більш однорідним. Локальний мінімум у центральній частині Анатолійського узбережжя, спричинений стійким апвелінгом, спостерігається з травня по жовтень, найбільш виражений у червні. Його виникнення пояснюється переважанням північно-східних вітрів або дивергенцією течій [3].

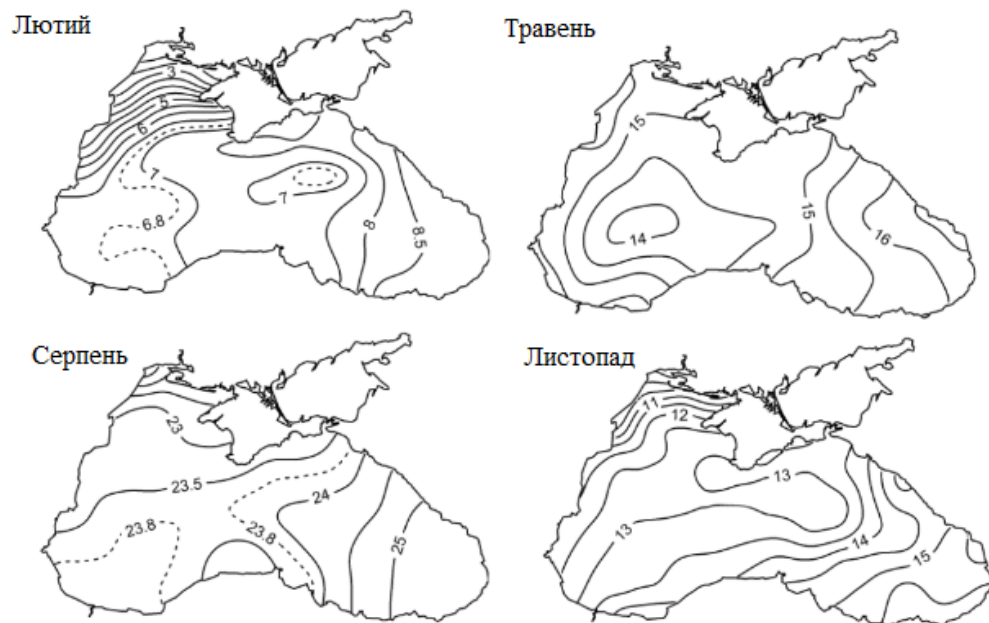


Рисунок 1.5 – Просторовий розподіл середньомісячних значень температури води, на поверхні моря (°C) [3]

**Фронтальні зони.** Система фронтальних зон і розподіл термохалінних характеристик у Чорному морі досі вивчена недостатньо.

У роботі [10] розглянуто сезонну мінливість температурних фронтів за супутниковими даними та запропоновано їхні назви. На основі цих же даних було створено атлас температури поверхні моря та її просторових градієнтів [8].

Термічні фронти у поверхневому шарі характеризуються значною просторово-часовою мінливістю, тому визначення загальних закономірностей їхнього розташування можливе лише за кліматичними полями.

Основними є дві фронтальні зони:

- На північно-західному шельфі,
- У східній частині моря (рис. 1.6),

які формуються через загальний горизонтальний градієнт температури з північного заходу на південний схід. У центральній частині моря цей градієнт зазвичай слабший.

Максимальної інтенсивності фронтальні зони досягають на початку зими – до  $0,5^{\circ}\text{C}$  на 10 км у січні на північному заході моря.

У літній період формується ще одна фронтальна зона вздовж центральної частини Анатолійського узбережжя, яка пов'язана з апвелінгом у цьому регіоні.



Рисунок 1.6 – Просторовий розподіл середньомісячних значень горизонтальних градієнтів температури води на поверхні моря ( $^{\circ}\text{C}/10$  км) [3]

Середній річний хід температури води (рис. 1.7) формується під дією багатьох фізичних процесів: сезонної мінливості теплового балансу, переносу тепла течіями, а також вертикального й горизонтального теплообміну. Для ХПШ ключовими є конвекційні зимові процеси, а для сталого термокліну – вертикальні рухи, пов’язані з морською циркуляцією [3].

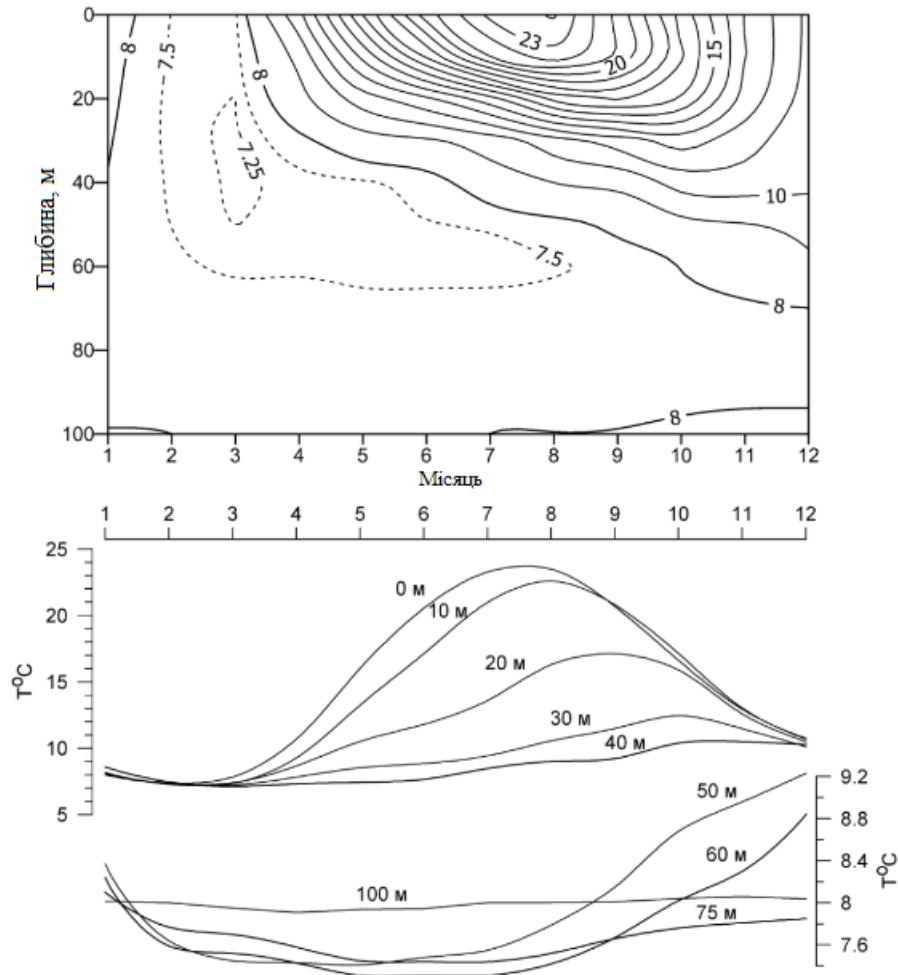


Рисунок 1.7 – Середній сезонний хід температури води в Чорному морі, у шарі 0–100 м (°C) [3]

#### 1.4 Сучасні методи дослідження гідрофізичних параметрів Світового океану

На сьогоднішній день методи дистанційного зондування є найбільш перспективними методами вивчення океанографічних параметрів морського

середовища. Супутниковий моніторинг Світового океану є одним з найпопулярніших методів дослідження в океанології.

Основними гідрофізичними параметрами, що вимірюються за допомогою супутників, є температура поверхні моря, концентрація хлорофілу [11], миттєва фотосинтетично доступна радіація, коефіцієнт відбиття дистанційного зондування, оптична товщина аерозолі, вміст частинок органічного/неорганічного вуглецю тощо [12]. Безперечно, найбільший інтерес для дослідження становлять дані вимірювань температури поверхні моря. Зміна цього параметра впливає на більшість інших гідрофізичних параметрів і може бути індикатором гідробіологічних, гідрометеорологічних процесів.

Однією з найбільших і найпопулярніших баз даних температури морської поверхні є дані, виміряні супутником NASA Terra. Супутник Terra (рис. 1.8) був запусканий NASA (Національним управлінням з аеронавтики і дослідження космічного простору) 18 грудня 1999 року з військово-повітряної бази Ванденберг (США). Супутник було виведено на навколополярну, сонячно-синхронну орбіту на висоту 705 км і нахилом  $98,2^\circ$ , з вузлом спуску о 10:30 ранку [13, 14].

На супутнику Terra встановлено п'ять типів датчиків (рис. 1.8), які здійснюють моніторинг атмосфери Землі, океану, суші, снігу та льоду, а також енергетичного балансу [13-15]. Ці датчики – американського, японського та канадського виробництва:

США:

- CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System);
- MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer);
- MODIS (Спектрорадіометр для отримання зображень з помірною роздільною здатністю).

Японія:

- ASTER (Удосконалений космічний радіометр теплової емісії та відбиття).

Канада:

- MOPITT (Вимірювання забруднення в тропосфері).

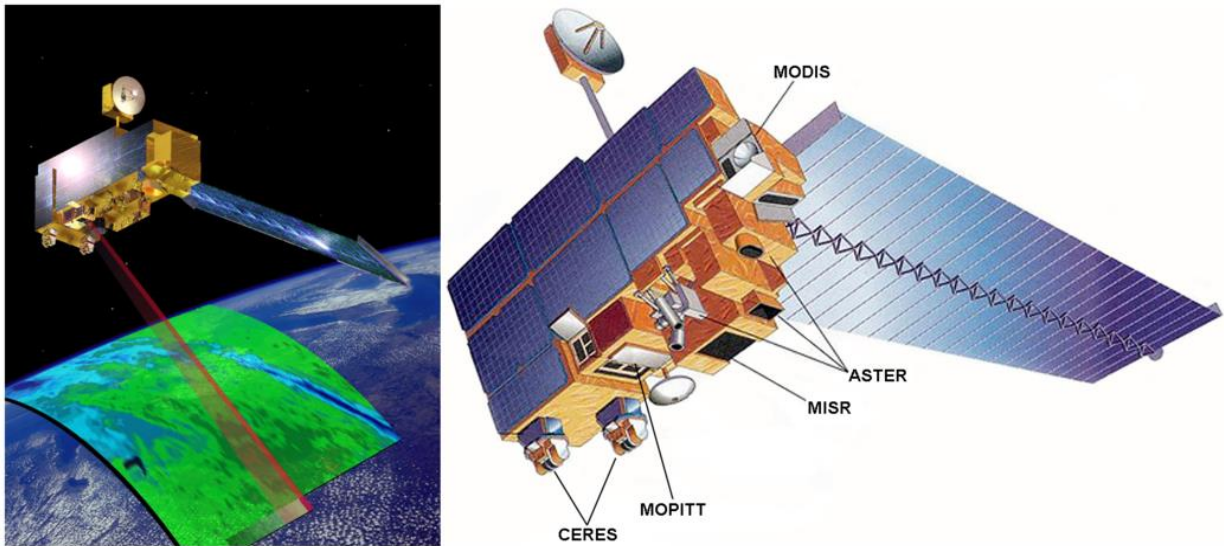


Рисунок 1.8 – Загальний вигляд супутника Terra та розташування датчиків на супутнику [15]

Температура поверхні моря вимірюється датчиком MODIS. Точність вимірювання температури поверхні моря датчиком MODIS становить від  $0,25^{\circ}\text{C}$  [16-19] до  $0,3^{\circ}\text{C}$  [20]. Дані про температуру поверхні моря можна вважати точними до  $0,4^{\circ}\text{C}$  відповідно до специфікації NASA [21].

Зображення, отримані з MODIS, можна безкоштовно переглянути на онлайн-ресурсі NASA – Ocean Color Web [22]. Цей ресурс — це наукова платформа, що спеціалізується на наданні супутникових даних щодо кольору океану. На ньому доступні різні рівні обробки інформації (від L0 до L4), зібрані різними супутниковими сенсорами: CZCS, OCTS, MODIS Terra/Aqua, SeaWiFS (дані віком понад 5 років вимагають реєстрації).

У межах нашого дослідження було використано щомісячні кліматичні та річні супутникові дані щодо температури поверхні Чорного моря (SST4 із довжиною хвилі 4 мкм), оброблені до рівня L3. Дані мали просторову розрізненість 4 км у широтному та довготному напрямках і були отримані зі супутника Terra MODIS, запущеного NASA [22]. Наведемо стислий узагальнений опис цих характеристик.

**Рівень обробки L3** – це похідні геофізичні дані, які були згруповані або перенесені на чітко визначену просторову сітку протягом заданого періоду часу.

NASA зберігає кілька типів даних цього рівня. У наших дослідженнях використовувалися архіви типу «Mapped» («Картографічні»). Це бази типових картографічних візуалізацій (SMI) 3-го рівня, які створюються з відповідних бінарних даних цього ж рівня. Кожен файл SMI вміщує піксельну сітку значень геофізичної змінної у проєкції Plate Carrée. У файлі також є таблиця кольорових відповідників, яка дає змогу створювати візуалізації з числових даних.

Серед доступних джерел даних варто виділити онлайн-платформу NASA Ocean Color Web, яка, зокрема, забезпечує доступ до інформації про температуру поверхні моря за параметром SST4. Температура поверхні моря SST4 (у °C) визначається на основі короткохвильового теплового випромінювання в діапазоні 3–4 мкм. Для її обчислення використовується короткохвильовий алгоритм, який застосовує спектральні канали MODIS 22 і 23 із довжинами хвиль 3,995 та 4,050 мкм відповідно. Методика розрахунку SST4 і система контролю її якості описані в [23] та знаходяться під науковим керівництвом Пітера Миннета (Peter Minnett), керівника групи MODIS SST при Школі морських та атмосферних наук ім. Розенштиля (RSMAS), Університет Майами.

Стандартна обробка й розповсюдження супутникових даних температури поверхні моря SST (SST4) NASA здійснюється за допомогою ПЗ, розробленого Групою з обробки океанографічних біологічних даних (OB.DAAC/OBPG). Генерація даних SST у системі OB.DAAC здійснюється за допомогою програмного інструменту Multi-Sensor Level-1 to Level-2 (l2gen). Яскравісна температура обчислюється шляхом інверсного перетворення (в логарифмічному масштабі) відношення випромінювання до температури чорного тіла. У l2gen ці відношення попередньо визначено для кожної спектральної смуги MODIS і збережено у таблицях формату netCDF або HDF для подальшого використання. У modsst ці значення обчислюються в режимі реального часу.

Бази даних температури поверхні моря, отримані з Інтернет-ресурсу NASA Ocean Color Web і використані у цьому дослідженні, характеризуються наступними основними властивостями:

1. **Статус даних:** Група OBPГ, серед іншого, присвоює даним третього рівня статус "Стандартні дані", що означає їхнє широке визнання у науковій спільноті.

2. **Типи даних:** Дані рівня 3 є комбінацією даних для різних періодів часу. Довші періоди часу допомагають заповнити природні пропуски в даних, які можуть бути викликані такими факторами, як хмари, сонячні відблиски, міжорбітальні пропуски, лід або слабке освітлення. Дані доступні у вигляді:

– **Щомісячні кліматичні:** сукупність усіх даних, зібраних протягом одного календарного місяця за всі роки вибраної місії.

– **Щорічні** – сукупність усіх даних температури поверхні моря за один окремих календарний рік;

– **Всі дані:** сукупність усіх даних температури поверхні моря, зібраних протягом періоду 2000-2024рр.

3. **Розрізненість даних:** Дані рівня 3 можуть мати різну номінальну розрізненість. У дослідженнях використовувались дані з розрізненістю 4 км.

4. **Колірна шкала:** Градація кольорів на картах дозволяє пов'язати відтінки з конкретними геофізичними значеннями, отриманими через дистанційне зондування. Області, де дані відсутні, позначаються чорним кольором.

5. **Типи даних:** Дані представлені у вигляді **картографічних зображень (Mapped)**, що є стандартними зображеннями (SMI), де дані зберігаються у двійковому форматі.

6. **Методи отримання даних:**

○ **Завантаження:** дозволяє отримати список необхідних глобальних даних у вигляді URL-адрес для негайного завантаження.

**Вилучення:** дозволяє вибрати і завантажити дані тільки для певного географічного регіону замість усієї Землі.

На основі даних про температуру поверхні моря вчені розраховують і моделюють її просторовий і вертикальний розподіл. Але розрахунки вертикального розподілу температури води не можуть бути проведені без даних

про температуру в глибинах морського середовища. Тому натурні вимірювання також є дуже важливими.

Сьогодні найпопулярнішими є дані, виміряні за допомогою буїв Арго. Арго – це глобальна ініціатива, в межах якої здійснюється збір інформації з глибин океану за допомогою автономних дрейфуючих приладів, що переміщуються під впливом течій і вертикально змінюють своє положення від поверхні до середніх глибин. Кожен прилад (поплавок) більшість часу проводить під водою. Поплавки Арго, виготовлені по всьому світу, мають відмінності як в апаратному, так і в програмному забезпеченні, але здебільшого працюють за схожим принципом (рис. 1.9).

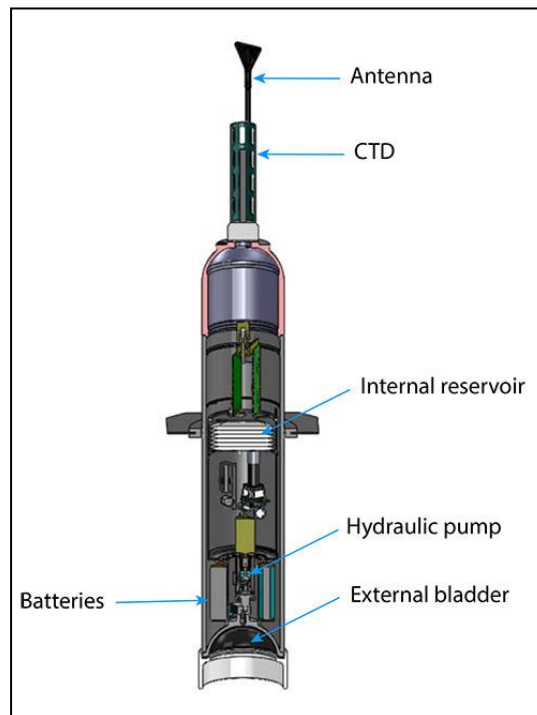


Рисунок 1.9 – Основні компоненти буя Арго [24]

З усіх компонентів поплавка Арго особливий інтерес представляє датчик STD. Датчик провідності, температури та глибини (STD). На верхній частині кожного поплавка Арго знаходиться STD, який вимірює температуру з точністю до  $0,001^{\circ}\text{C}$ , тиск (тісно пов'язаний з глибиною) з точністю до 0,1 дбар і розраховує солоність, використовуючи провідність, температуру і тиск з

точністю до 0,001 psu (практичні одиниці солоності) [24]. Це свідчить про дуже високу точність вимірювань температури і солоності в морському середовищі.

На рисунку 1.10 показано повний цикл вимірювання за допомогою буїв Арго [24]. Стандартна місія буя Арго – це 10-денний цикл, причому більшу частину часу буй дрейфує разом з глибоководними океанськими течіями, а потім проводить серію вимірювань, коли він повертається до поверхні океану (профілює). Як тільки поплавок опиняється на поверхні, він визначає своє місцезнаходження, часто за допомогою GPS, а потім зв'язується з супутником, щоб відправити свої дані і отримати нові інструкції для місії. Для більшості суден флоту Арго цей інтервал перебування на поверхні становить від 15 хвилин до однієї години. Після цього поплавок занурюється на глибину дрейфу 1000 метрів приблизно на 9 днів, а потім поплавок занурюється на профільну глибину 2000 метрів, після чого повільно піднімається на поверхню, вимірюючи провідність, температуру і тиск. Цей цикл повторюється до тих пір, поки поплавок не гине, зазвичай через 4-5 років.

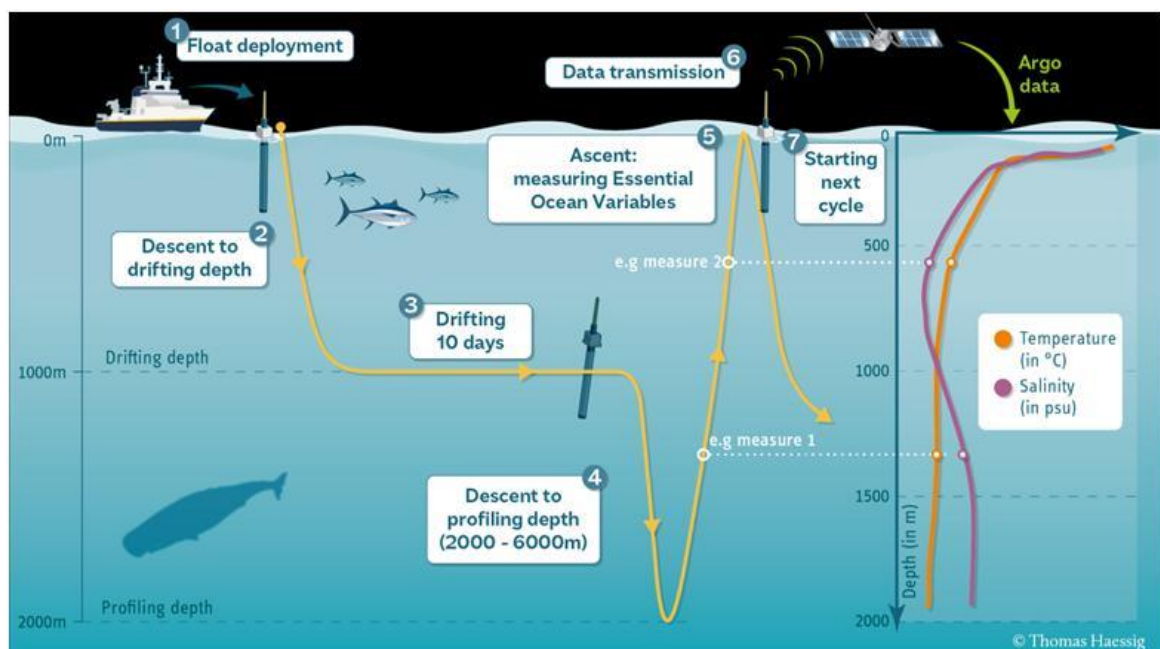


Рисунок 1.10 – Повний цикл вимірювання та передачі даних буями Арго [24]

Виходячи з вищесказаного, можна зробити висновок, що супутникові вимірювання гідрофізичних параметрів переважають у просторових масштабах

вимірювань поверхні Світового океану. З іншого боку, в глибинах океану переважають натурні вимірювання.

Таким чином, для більш детального вивчення мінливості гідрофізичних параметрів по всій товщі океану необхідні комплексні вимірювання цих характеристик на поверхні і в глибинах морського середовища.

## 2 МЕТОДИ ТА МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження просторового розподілу температури поверхні Чорного моря проводився на основі побудованих карт у різні місяці, сезони року та загальний її розподіл за 25 річний період. Побудова карт проводилася за допомогою програмного забезпечення ODV (Ocean Data View). Програмне забезпечення ODV розроблене для роботи з океанографічними даними у форматі профілів, траєкторій або часових рядів із можливістю візуалізації та аналізу [25].

Побудовані графіки внутрішньорічного та міжрічного розподілу температури поверхні Чорного моря дали можливість провести детальний аналіз мінливості цього параметру у цих періодах та визначити особливості у них.

### 2.1 Вихідні супутникові дані температури поверхні Чорного моря

Вихідними даними для проведення дослідження використовувалися супутникові дані температури поверхні моря з рівнем обробки L3 та просторовою роздільною здатністю 4 км (по широті та довготі) за період 2000–2024 років [22]. Архіви цих даних, отриманих зі сканерів кольору океану, мають формат netCDF із розширенням .NC і сформовані на основі спостережень супутника NASA — Terra (MODIS). Обробка таких файлів можлива як у ручному режимі (наприклад, через програмне середовище MatLab шляхом розархівування), так і в автоматичному — із застосуванням спеціалізованої платформи NASA — SeaDAS. Програмний пакет SeaDAS (SeaWiFS Data Analysis System) є багатофункціональним інструментом для обробки, візуалізації, аналізу та оцінки якості супутникових даних Землі. Розроблений і офіційно підтримуваний NASA, SeaDAS забезпечує роботу з інформацією з понад 15 супутникових місій США та інших країн [26]. У наших дослідженнях проводилася ручна (розархівування даних) обробка вихідних даних. Верифікація обробки супутникових даних концентрацій РОС виконувалася за допомогою спеціалізованого програмного

забезпечення SeaDAS, яка показала ідентичність розархівованих даних з візуалізацією оригінальних файлів даних у SeaDAS.

У наших дослідженнях були використані такі часові ряди супутникових даних [22]:

- Щомісячні (кліматологія) – набір середніх температур поверхні моря, зібраний для кожного календарного місяця в період 2000–2024 рр. (кількість даних близько 345180);
- Щорічні – сукупність усіх даних температури поверхні моря за один окремий календарний рік в періоді з 2000 – 2024 рр. (кількість даних близько 703550);
- Всі дані: сукупність усіх даних температури поверхні моря, зібраних протягом періоду 2000–2024рр. (кількість даних близько 29200).

## 2.2 Статистичні характеристики для оцінки розрахунків

Статистична характеристика ( $\beta_T$ ), яка характеризує температури поверхні моря у рік розраховувалась за відомим рівнянням [27, 28]:

$$\beta_T = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}, \quad (2.1)$$

де  $y_i$  – значення температури поверхні моря у багаторічному ряді спостережень, °С;

$x_i$  – одиниця часу у багаторічному ряді спостережень, рік;

$n$  – число членів багаторічного ряду.

Виявлення багаторічної тенденції міжрічної мінливості, а також внутрішньорічного розподілу температури поверхні Чорного моря проводилося на підставі побудованого графічного матеріалу за усередненими супутниковими даними. Графічний матеріал було створено за допомогою Microsoft Excel,

надійної програми для роботи з електронними таблицями, яка зазвичай використовується для аналізу та візуалізації даних.

Статистичні параметри, які характеризують розраховані середні значення температури поверхні Чорного моря визначалися за відомими рівняннями, описаними у [29-33]:

Середнє значення температури поверхні моря ( $\bar{T}$ ):

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i, \quad (2.2)$$

де  $T_i$  – значення температури поверхні Чорного моря у раді спостережень, °C;  $n$  – число членів ряду спостережень.

Середньоквадратичне відхилення ( $\sigma_{\bar{T}}$ ):

$$\sigma_{\bar{T}} = \sqrt{\frac{\sum (T_i - \bar{T})^2}{n-1}}, \quad (2.3)$$

Стандартна помилка середнього значення температури поверхні моря  $\delta\bar{T}$  :

$$\delta\bar{T} = \frac{\sigma_{\bar{T}}}{\sqrt{n}}, \quad (2.4)$$

Рівень надійності (при надійності 95%):

$$\text{Рівень надійності (95\%)} = t_{\frac{1-0,95}{2}} \times \delta\bar{T}, \quad (2.5)$$

де  $t_{\frac{1-0,95}{2}} = t_{0,025}$  – критичні значення  $t$ -розподілу Стюдента при рівні значущості  $\alpha = 0,05$  (або коефіцієнті довіри  $(1 - \alpha) = 0,95$ )

Двостороння інтервальна оцінка середнього значення ( $\bar{T}$ ) за рівня значущості  $\alpha = 0,05$  (або довірчої ймовірності  $\alpha = 0,95$ ):

Нижня межа ( $\bar{T}_n^H$ ):

$$\bar{T}_n^H = \bar{T} - t_{0,025} \times \delta\bar{T}, \quad (2.6)$$

Верхня межа ( $\bar{T}_n^B$ ):

$$\bar{T}_n^B = \bar{T} + t_{0,025} \times \delta\bar{T}, \quad (2.7)$$

Таким чином, із ймовірністю 0,95 значення середнього значення температури поверхні Чорного моря ( $\bar{T}$ ) знаходиться в інтервалі:

$$\bar{T}_n^H \leq \bar{T} \leq \bar{T}_n^B, \quad (2.8)$$

Для виявлення багаторічної тенденції будувався лінійний. Значущість лінійного тренду характеризував лінійний коефіцієнт кореляції ( $r$ ), а статистичної характеристики  $\beta_T$  – Р-значення з рівнем значущості  $\alpha = 0,05$ . Статистичні характеристики  $r$  та Р-значення розраховувались автоматично за допомогою надбудови Excel пакета Аналізу даних.

Статистична характеристика  $\beta_T$  вважається значущою якщо Р-значення  $\leq 0,05$ .

Перевірку значущості  $r$  проводили шляхом порівняння коефіцієнтів кореляції з критичним значенням коефіцієнтів кореляції  $r(\alpha)$  при рівні значущості  $\alpha = 0,05$  (або коефіцієнті довіри  $(1 - \alpha) = 0,95$ ).

Критичне значення коефіцієнтів кореляції  $r(\alpha)$  можна розрахувати за рівнянням [34]:

$$r(0,05) = \sqrt{\frac{t_{0,025}^2}{n-2+t_{0,025}^2}}, \quad (2.9)$$

де  $t_{0,025}$  – критичні значення  $t$ -розподілу Стьюдента при рівні значущості  $\alpha = 0,025$  (або коефіцієнті довіри  $(1 - \alpha) = 0,975$ ),  $n$  – кількість членів ряду.

Якщо  $r \geq r(\alpha)$ , то відповідна кореляція вважається значущою.

### **3 АНАЛІЗ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ МІНЛИВОСТІ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ ЧОРНОГО МОРЯ**

#### **3.1 Внутрішньорічна мінливість температури поверхні Чорного моря за супутниковими даними у періоді 2000 – 2024 роки**

Відомо [29], що реальне морське середовище характеризується високим рівнем неоднорідності, яка охоплює широкий спектр просторових та часових масштабів. З метою ефективного моніторингу морського середовища особливу увагу слід приділяти як квазістатичним, так і динамічним неоднорідностям, зокрема: термохалинним структурам (температурі й солоності), хімічним параметрам (складовим домішок, добавкам), течіям, різноманітним хвильовим явищам [35], а також біологічним характеристикам (угрупованням організмів у водній товщі). Усі ці неоднорідності є доступними для спостереження завдяки своїм фізичним властивостям.

Протягом останніх двадцяти років було досягнуто помітного прогресу в розумінні ключових фізичних і біогеохімічних процесів у Чорному морі [36, 37] завдяки реалізації передових наукових програм. У сфері морських наук і технологій сформувався й активно розвивається новий напрям — оперативна океанографія, яка широко використовує супутникові спостереження. EuroGOOS (European Global Ocean Observing System) надає такі визначення [38]: Оперативна океанографія – це систематичні та довгострокові регулярні виміри параметрів морів, океанів та атмосфери, а також їх швидка інтерпретація та поширення.

Для проведення аналізу внутрішньорічної мінливості температури поверхні Чорного моря у періоді 2000 – 2024 роки нами було побудовано щомісячні карти просторового її розподілу (рис. 3.1). Вихідними даними слугували усередненні щомісячні супутникові данні температури поверхні моря з просторовим розрізненням 4км×4км, які виміряні за допомогою супутника NASA Terra

MODIS [22]. Карти побудовано за допомогою програмного комплексу Ocean Data View (ODV), що спеціалізується на обробці океанографічних даних [25].

На всіх картах (рис.3.1) видно, що збільшення температури поверхні моря відбувається у напрямку від північного заходу на південний схід. Прохолодніша ділянка просторового розподілу температури поверхні моря спостерігається на північно-західному шельфі Чорного моря. Найтепліша – у південно-західній частині моря (район Батумської антициклонічної вихрової течії). Ця особливість просторового розподілу температури поверхні Чорного моря підтверджується також дослідженнями авторів [29].

На рис. 3.1 (а, б, в) можна чітко побачити прибережний циклонічний рух температури. Більш прохолодні води рухаються з північно-західного шельфу вздовж узбережжя до протоки Босфор. Більш теплі – з південно-західної частини моря до південного берегу Криму.

Локальні зниження температури поверхні моря, окрім північно-західного шельфу, чітко помітні: у Липні (рис. 3.1 (ж)) – вздовж центрального відрізка анатолійського узбережжя, на Керченсько-Таманському шельфі та в західній частині Кримського півострова; у Вересні, Жовтні та Листопаді (рис. 3.1 (к, л, м)) – вздовж широти  $44^{\circ}$  пн. ш. у північній центральній зоні Чорного моря.

З метою аналізу особливостей просторового розподілу середньої температури морської поверхні було побудовано графік внутрішньорічної динаміки температури поверхні Чорного моря, на основі щомісячних усереднених значень за період з 2000 до 2024 року (рис. 3.2, таблиця 3.1). Показники температури обчислювались як середнє значення по всій акваторії моря для кожного окремого місяця.

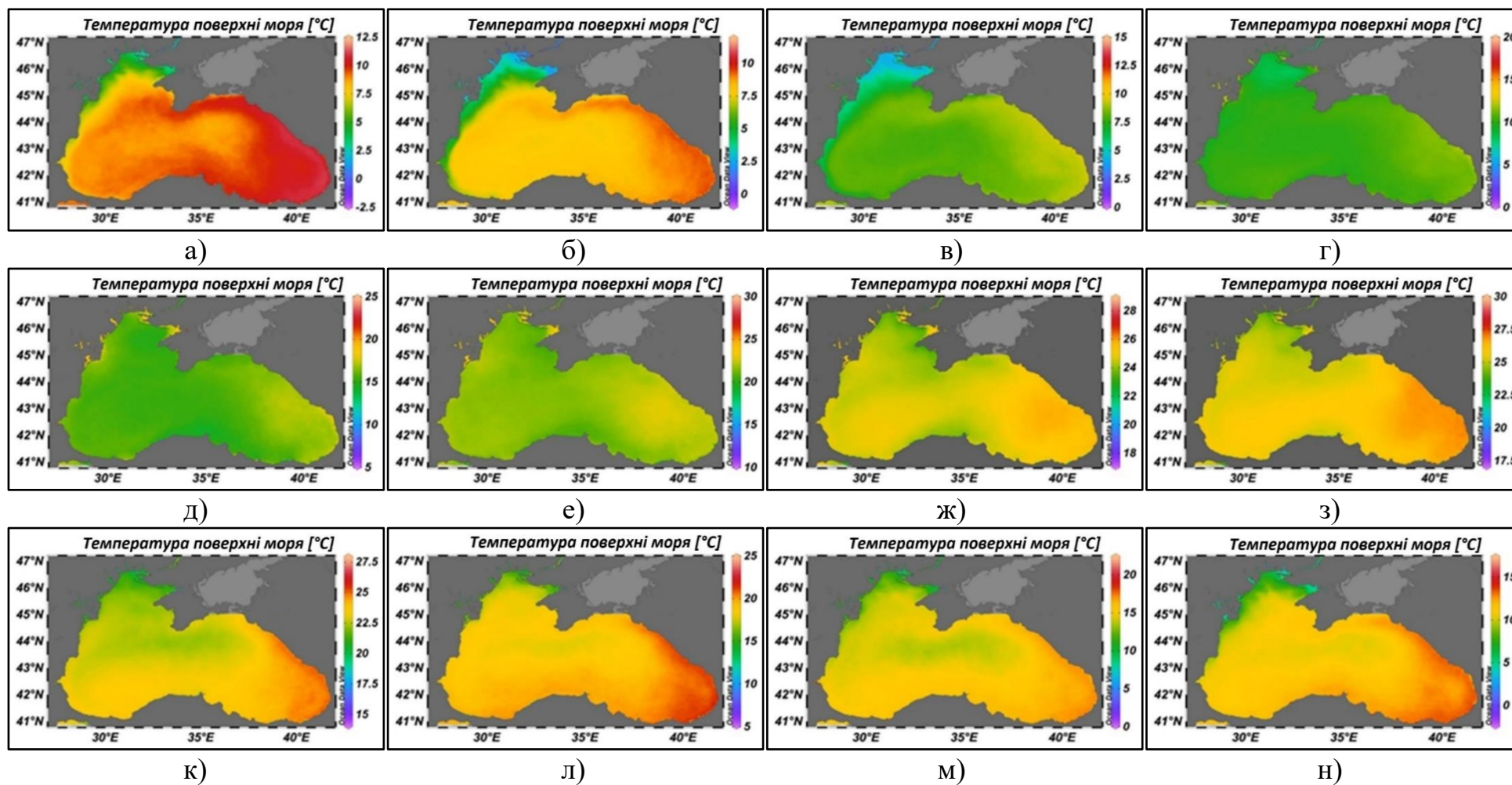


Рисунок 3.1 – Просторовий розподіл температури поверхні Чорного моря у періоді 2000 – 2024 за місяцями: а – Січень, б – Лютий, в – Березень, г – Квітень, д – Травень, е – Червень, ж – Липень, з – Серпень, к – Вересень, л – Жовтень, м – Листопад, н – Грудень [39]

Таблиця 3.1 – Розраховані середні значення температури поверхні Чорного моря у кожному місяці року у періоді із 2000 по 2024 роки

Місяць	Середня температура поверхні Чорного моря, °C	$\sigma_{\bar{T}}$ , °C	$\delta\bar{T}$ , °C	$n$	$t_{0,025}$	Рівень надійності (95,0%)	$\bar{T}_n^H$ , °C	$\bar{T}_n^B$ , °C
Січень	8,844	1,634	0,0097	28601	1,96	0,0189	8,825	8,863
Лютий	7,627	1,632	0,0096	28641	1,96	0,0189	7,609	7,646
Березень	7,908	1,204	0,0071	28661	1,96	0,0139	7,894	7,922
Квітень	10,238	0,752	0,0045	28408	1,96	0,0087	10,230	10,247
Травень	15,790	0,823	0,0049	28430	1,96	0,0096	15,781	15,800
Червень	21,671	0,636	0,0037	28838	1,96	0,0073	21,664	21,678
Липень	24,642	0,685	0,0040	29429	1,96	0,0078	24,634	24,650
Серпень	25,596	0,807	0,0047	29505	1,96	0,0092	25,587	25,605
Вересень	22,997	1,124	0,0066	28931	1,96	0,0130	22,984	23,010
Жовтень	18,915	1,337	0,0079	28574	1,96	0,0155	18,899	18,930
Листопад	14,808	1,436	0,0085	28676	1,96	0,0166	14,791	14,825
Грудень	10,994	1,671	0,0099	28488	1,96	0,0194	10,974	11,013

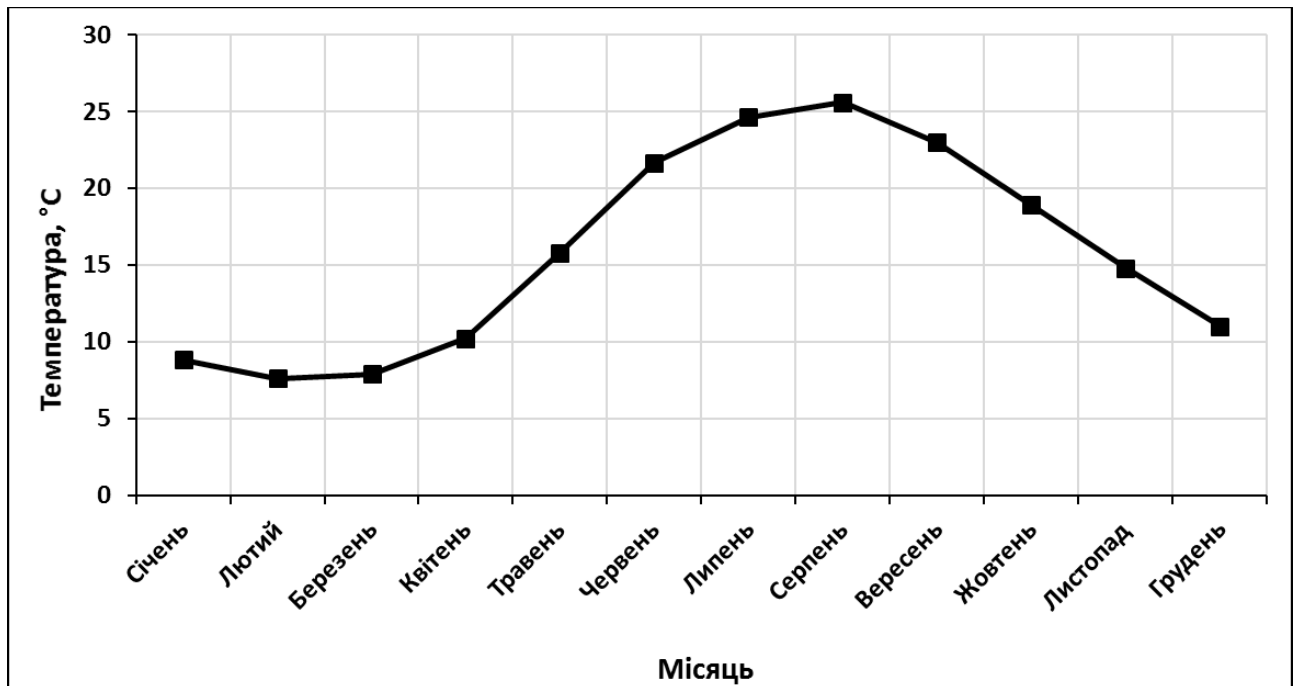


Рисунок 3.2 – Графік внутрішньорічного розподілу температури поверхні Чорного моря за усередненими місячними супутниковими даними за період з 2000 по 2024 роки [39]

З таблиці 3.1 та рисунка 3.2 та видно, що внутрішньорічний розподіл температури поверхні Чорного моря має чітко виражений річний цикл. Середня мінімальна температура поверхні Чорного моря спостерігається у Лютому та складає  $7,63^{\circ}\text{C}$ . Максимум середньої температури припадає на Серпень й становить  $25,60^{\circ}\text{C}$ .

### **3.2 Сезонна мінливість температури поверхні за супутниковими даними у періоді 2000 – 2024 роки**

Глобальні кліматичні зміни сьогодні вимагають більш глибокого вивчення як вертикального, так і горизонтального розподілу температури води Світового Океану, зокрема її сезонної мінливості.

Відомо [40], що характерною особливістю розподілу температури в верхніх шарах Чорного моря є сезонна сталість у значеннях: найнижча температура на північному заході, найвища – на південному сході. Найменша температура поверхні моря відмічається в середньому взимку (Лютий: від  $2^{\circ}\text{C}$  до  $9^{\circ}\text{C}$ ), а найбільша – наприкінці літа (Серпень: від  $21^{\circ}\text{C}$  до  $25^{\circ}\text{C}$ ).

Сьогодні супутникові вимірювання є найбільш ефективними для вивчення розподілу та мінливості температури поверхні морського середовища [41]. Також дані про температуру поверхні моря використовуються як вихідні дані для океанографічних розрахунків просторового розподілу гідрофізичних характеристик [34] та асиміляції даних для підвищення точності чисельних моделей океану [42].

Для візуалізації сезонної мінливості просторового розподілу температури поверхні Чорного моря побудовано карти (Рис. 3.3) за усередненими даними у період 2000 по 2024 рр.

З рисунку 3.3 можна побачити, що протягом року просторовий розподіл температури поверхні Чорного моря збільшується у напрямі з північного заходу на південний схід.

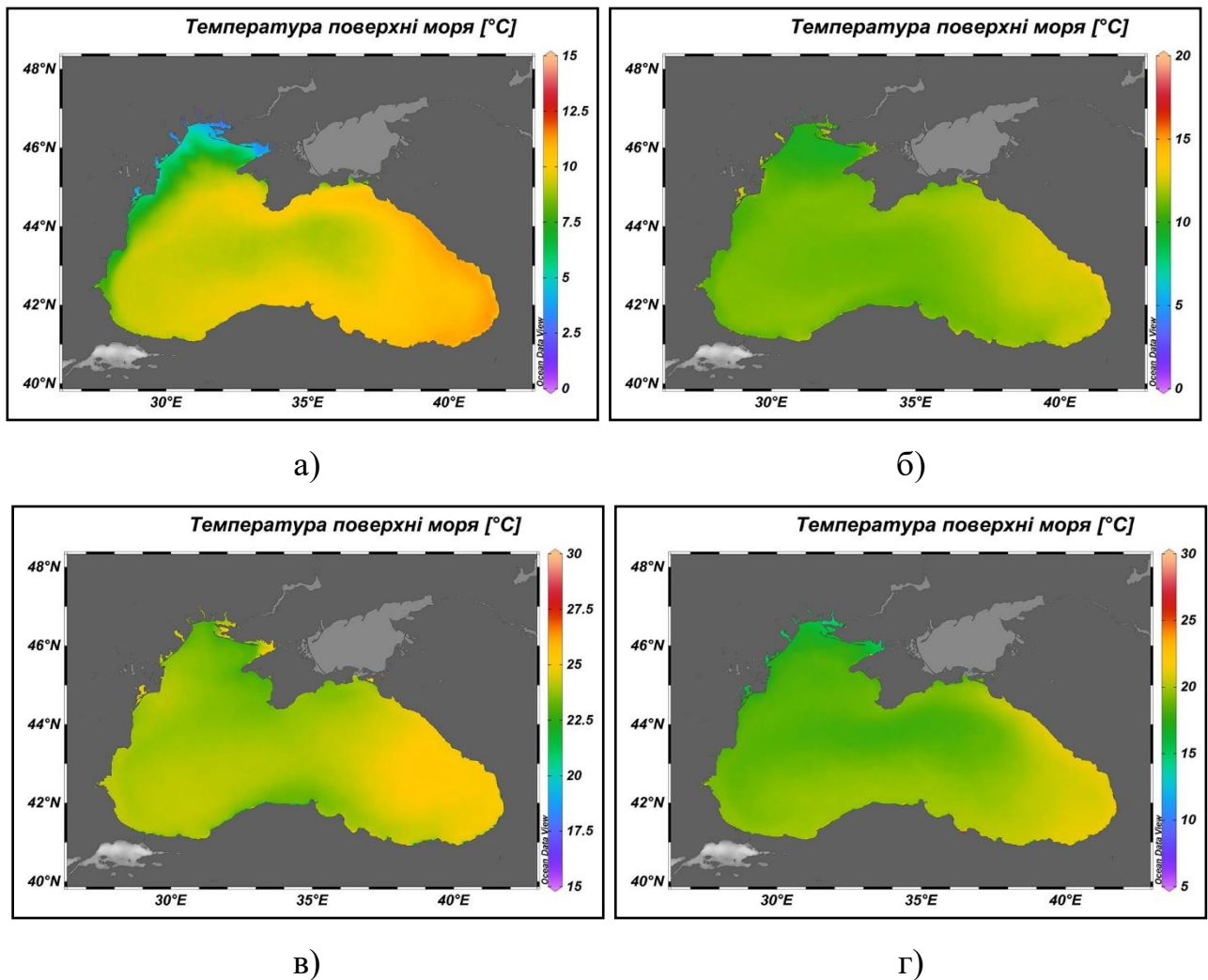


Рисунок 3.3 – Просторовий розподіл температури поверхні Чорного моря за усередненими даними у період 2000 по 2024 рр. за сезонами: а – зима, б – весна, в – літо, г – осінь

Аналіз вихідних даних та рисунку 3.3 вказує на те, що мінімуми спостерігаються у північно-західній частині моря, а максимум на південному сході моря, а саме:

- Взимку мінімум температури складає  $1,9^{\circ}\text{C}$ , а максимум –  $11,30^{\circ}\text{C}$ .
- Весною температурний мінімум складає  $14,65^{\circ}\text{C}$ , а максимум –  $13,05^{\circ}\text{C}$ .
- Літній мінімум температури складає  $22,50^{\circ}\text{C}$ , а максимум –  $25,03^{\circ}\text{C}$ .
- Восени мінімум температури складає  $13,5^{\circ}\text{C}$ , а максимум –  $21,20^{\circ}\text{C}$ .

### 3.3 Міжрічна мінливість температури поверхні Чорного моря та її загальний просторовий розподіл за супутниковими даними у періоді 2000-2024 роки

Для аналізу міжрічної мінливості температури поверхні Чорного моря було побудовано графік на основі усереднених супутникових даних температури поверхні моря (табл. 3.2) за кожен окремий календарний рік у періоді з 2000 по 2024 (Рис. 3.4).

На Рисунку 3.4 видно, що міжрічна мінливість температури поверхні Чорного моря має зростаючу тенденцію (лінійний тренд). Ця мінливість температури за 25 років збільшувалась на  $0,06^{\circ}\text{C}$  у рік ( $\beta_T = 0,06^{\circ}\text{C рік}^{-1}$ ) (Табл. 3.2). На графіку спостерігаються п'ять максимумів та три мінімуми. Максимум температури поверхні моря припадає на 2001 ( $19,00^{\circ}\text{C}$ ), 2010 ( $19,42^{\circ}\text{C}$ ), 2012 ( $19,63^{\circ}\text{C}$ ), 2018 ( $19,98^{\circ}\text{C}$ ) та 2024 ( $20,29^{\circ}\text{C}$ ) роки, а мінімум – на 2004 ( $17,80^{\circ}\text{C}$ ), 2017 ( $18,34^{\circ}\text{C}$ ) та 2021 ( $18,54^{\circ}\text{C}$ ) роки.

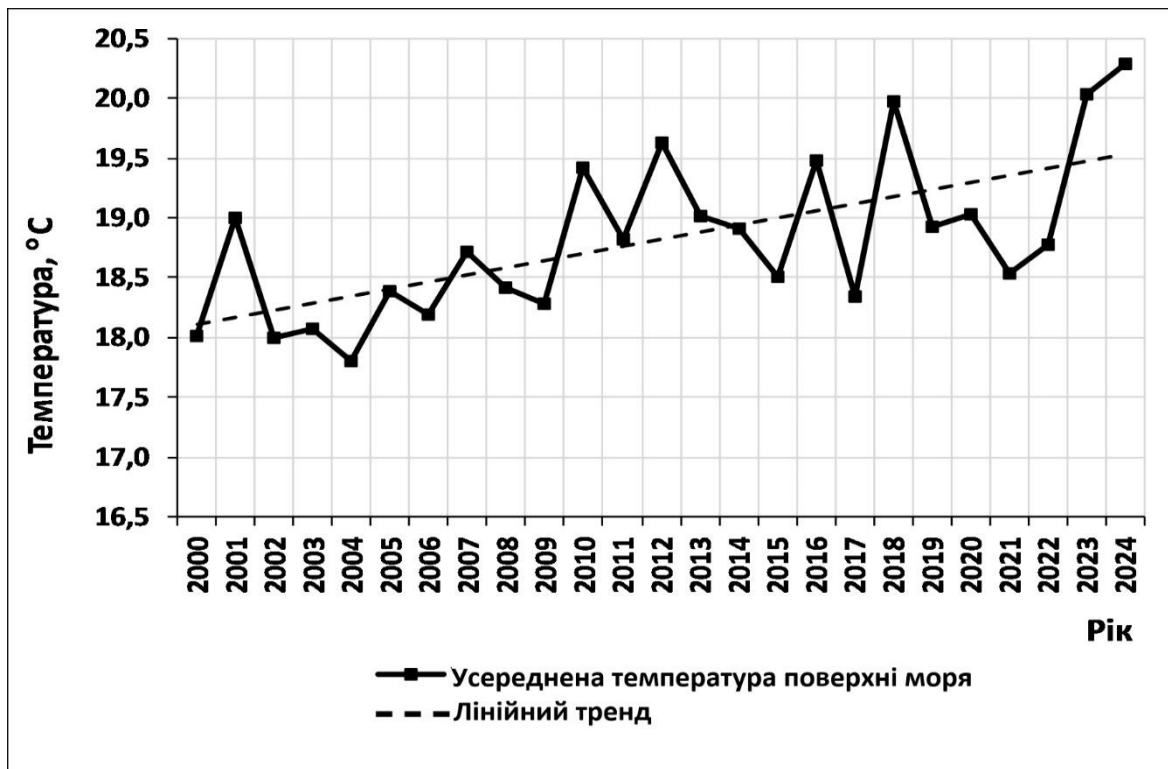


Рисунок 3.4 – Графік міжрічної мінливості температури поверхні Чорного моря за усередненими річними супутниковими даними у періоді з 2000 по 2024рр.

Таблиця 3.2 – Розраховані середні значення температури поверхні Чорного моря у кожному окремому році за період із 2000 по 2024 роки

Рік	Середня температура поверхні Чорного моря, °C	$\sigma_{\bar{T}}$ , °C	$\delta\bar{T}$ , °C	$n$	$t_{0,025}$	Рівень надійності (95,0%)	$\bar{T}_n^H$ , °C	$\bar{T}_n^B$ , °C
2000	18,015	1,170	0,0070	28044	1,96	0,0137	18,001	18,029
2001	18,998	1,152	0,0069	28105	1,96	0,0135	18,985	19,012
2002	18,000	1,300	0,0077	28141	1,96	0,0152	17,985	18,016
2003	18,074	1,354	0,0081	28042	1,96	0,0159	18,058	18,090
2004	17,801	1,333	0,0080	28095	1,96	0,0156	17,786	17,817
2005	18,385	1,250	0,0075	28102	1,96	0,0146	18,370	18,400
2006	18,187	1,424	0,0085	28120	1,96	0,0166	18,171	18,204
2007	18,723	1,190	0,0071	28126	1,96	0,0139	18,709	18,737
2008	18,414	1,247	0,0074	28071	1,96	0,0146	18,399	18,429
2009	18,284	1,046	0,0062	28034	1,96	0,0122	18,272	18,296
2010	19,416	1,176	0,0070	28130	1,96	0,0137	19,402	19,430
2011	18,827	1,448	0,0086	28038	1,96	0,0169	18,811	18,844
2012	19,632	1,166	0,0070	28144	1,96	0,0136	19,618	19,645
2013	19,018	1,076	0,0064	28070	1,96	0,0126	19,006	19,031
2014	18,911	1,163	0,0069	28082	1,96	0,0136	18,897	18,925
2015	18,501	1,284	0,0077	28086	1,96	0,0150	18,486	18,516
2016	19,483	1,249	0,0074	28097	1,96	0,0146	19,469	19,498
2017	18,342	1,168	0,0070	28103	1,96	0,0137	18,328	18,355
2018	19,980	1,359	0,0081	28031	1,96	0,0159	19,965	19,996
2019	18,931	1,122	0,0067	28086	1,96	0,0131	18,918	18,945
2020	19,037	1,343	0,0080	28056	1,96	0,0157	19,022	19,053
2021	18,536	1,219	0,0073	28125	1,96	0,0143	18,522	18,550
2022	18,770	1,346	0,0080	28146	1,96	0,0157	18,755	18,786
2023	20,029	1,406	0,0083	28688	1,96	0,0163	20,013	20,045
2024	20,293	1,458	0,0086	28786	1,96	0,0168	20,276	20,310

Статистичні показники щодо визначення значущості побудованого лінійного тренду міжрічної мінливості температури поверхні Чорного моря на основі супутникових даних у періоді 2000 – 2024 роки наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Статистичні показники щодо визначення значущості побудованого лінійного тренду міжрічної мінливості температури поверхні Чорного моря

Параметр	Результат розрахунків
$r$	0,65
$r(0,05)$	0,40
Коефіцієнт $\beta_T$	0,06
$P$ -value ( $\beta_T$ )	0,0005

З таблиці 3.3 видно, що коефіцієнт кореляції  $r > r(0,05)$  та  $P$ -value ( $\beta_T$ )  $< 0,05$ . Ці результати свідчать про те, що побудований лінійний тренд міжрічної мінливості температури поверхні Чорного моря на основі супутникових даних у періоді 2000 – 2024 роки (Рис. 3.4) є статистично значущим. Таким чином, на підставі результатів оцінки значущості лінійного тренду можна дійти висновку, що багаторічна мінливість температури поверхні Чорного моря періоді 2000 – 2024 роки є лінійною.

Для візуалізації загального 25 річного просторового розподілу температури поверхні Чорного моря у періоді з 2000 по 2024 рр. було побудовано відповідну карту на основі сукупності супутникових даних за весь досліджуваний період (рис. 3.5).

З рисунку 3.5 видно, що мінімальні значення температури поверхні моря (близько 16,45°C) за 25 річний період зосереджені на півночі північно-західної частини Чорного моря. Збільшення температури до 18°C спостерігається у центральній частині північно-західного шельфу, удовж узбережжя Румунії, Болгарії та центральної й східної частини Анатолійського узбережжя. Майже вся глибоководна західна й центральна, а також північно-східна частини Чорного моря, мають показник температури близько 19°C. Максимум температури

поверхні моря становить близько  $20^{\circ}\text{C}$  та спостерігається у східній частині Чорного моря. Загалом середня температура поверхні по всій акваторії Чорного моря за 25 річний період склала близько  $18,76^{\circ}\text{C}$ .

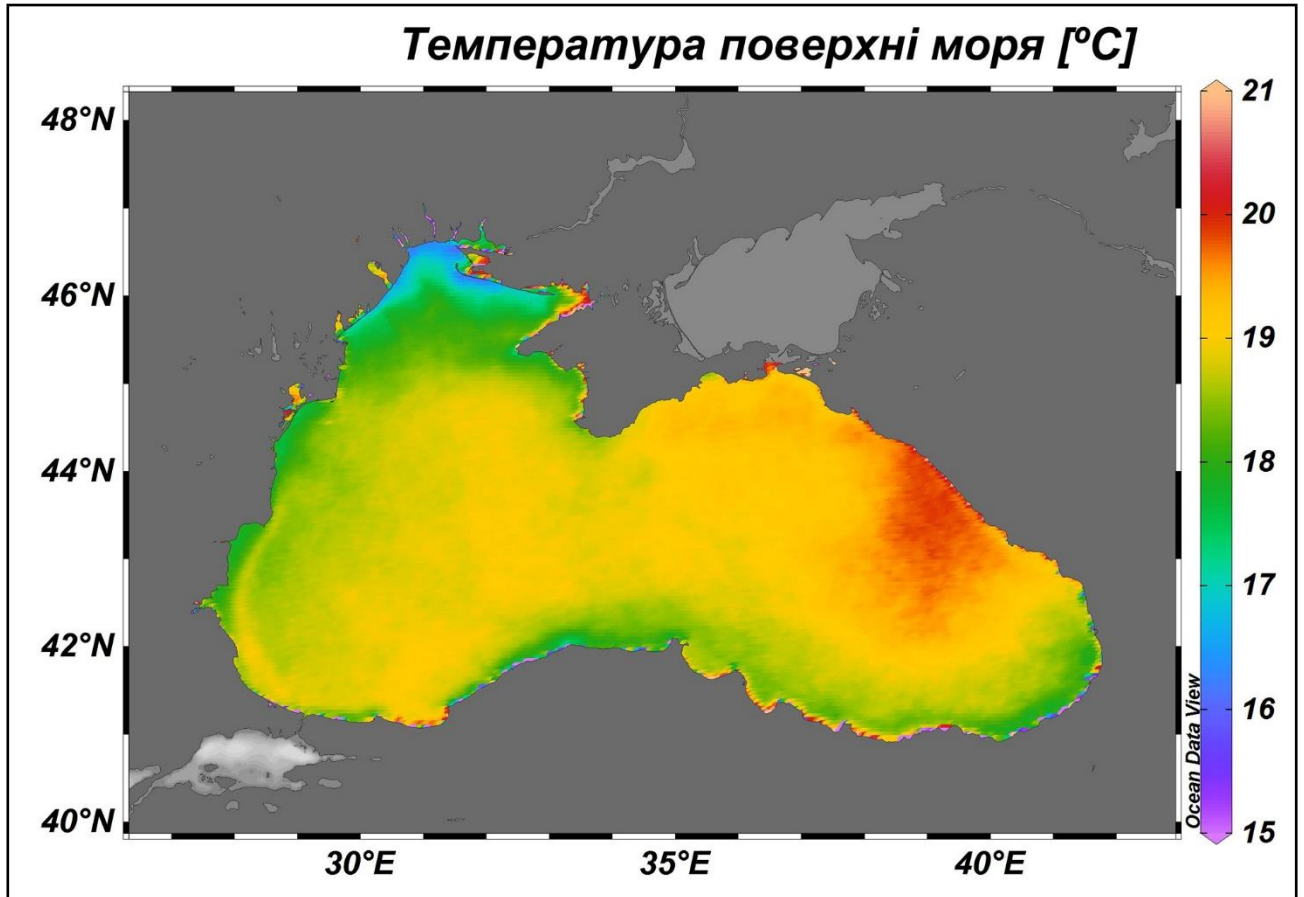


Рисунок 3.5 – Карта просторового розподілу температури поверхні Чорного моря у періоді 2000 – 2024рр. на основі усієї сукупності супутникових даних

## ВИСНОВКИ

На підставі отриманих результатів проведеного дослідження щодо особливостей просторово-часової мінливості температури поверхні Чорного моря у періоді 2000 – 2024 роки можна зробити наступні узагальнюючі висновки.

Температурний режим поверхні Чорного моря протягом року відзначається поступовим зростанням температури у напрямку від північного заходу до південного сходу, при цьому найхолодніші води зосереджені в районі північно-західного шельфу. Найтепліша – у південно-західній частині моря (район Батумської антициклонічної вихрової течії). Окрім північно-західного шельфу, до локальних температурних мінімумів належать зони: у Липні – вздовж центральної частини анатолійського узбережжя, на Керченсько-Таманському шельфі та в західній частині Криму; у вересні, жовтні та листопаді – поблизу 44° пн. ш. у північній частині центральної акваторії Чорного моря. Найнижча середня температура поверхні моря по всій акваторії фіксується в лютому і становить 7,63°C. Максимум середньої температури припадає на Серпень й становить 25,60°C.

Сезонні екстремуми становили: взимку мінімум температури складає 1,9°C, а максимум – 11,30°C; навесні температурний мінімум складає 14,65°C, а максимум – 13,05°C; влітку мінімум температури складає 22,50°C, а максимум – 25,03°C та восени мінімум температури складає 13,5 С, а максимум – 21,20°C.

Серед особливостей міжрічної мінливості температури поверхні Чорного моря у періоді з 2000 по 2024рр. можна виокремити те, що ця мінливість має зростаючу тенденцію. За 25 років середній показник температури поверхні Чорного моря збільшувався на 0,06°C у рік. Максимум температури поверхні моря припадає на 2001 (19,00°C), 2010 (19,42°C), 2012 (19,63°C), 2018 (19,98°C) та 2024 (20,29°C) роки, а мінімум – на 2004 (17,80°C), 2017 (18,34°C) та 2021 (18,54°C) роки. Розраховані статистичної показники свідчать про те, що

побудований лінійний тренд міжрічної мінливості температури поверхні Чорного моря на основі супутникових даних у періоді 2000 – 2024 роки є статистично значущим. Це дає підстави дійти висновку, що багаторічна мінливість температури поверхні Чорного моря періоді 2000 – 2024 роки є лінійною.

Мінімальні значення температури поверхні моря (близько  $16,45^{\circ}\text{C}$ ) за 25 річний період зосереджені на півночі північно-західної частини Чорного моря. Збільшення температури до  $18^{\circ}\text{C}$  спостерігається у центральній частині північно-західного шельфу, удовж узбережжя Румунії, Болгарії та центральної й східної частини Анатолійського узбережжя. Майже вся глибоководна західна й центральна, а також північно-східна частини Чорного моря, мають показник температури близько  $19^{\circ}\text{C}$ . Максимум температури поверхні моря становить близько  $20^{\circ}\text{C}$  та спостерігається у східній частині Чорного моря. Загалом середня температура поверхні по всій акваторії Чорного моря за 25 річний період склала близько  $18,76^{\circ}\text{C}$ .

Таким чином, методи дистанційного зондування Землі, зокрема супутникового, є ефективними джерелами безперервних багаторічних рядів даних для детального аналізу просторово-часової мінливості температури поверхні Чорного моря та для виявлення особливостей у її розподілі. Це сприяє як проведенню наукових досліджень, так і їх практичному застосуванню, наприклад, у сфері охорони морського середовища.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Black Sea Commission. (2019). The Commission on the Protection of the Black Sea Against Pollution. <http://www.blackseacommission.org/The%20Black%20Sea/Geography/>
2. University of Toronto. (2001). Black Sea. Internet Encyclopedia of Ukraine. Canada. <https://www.encyclopediaofukraine.com/display.asp?linkpath=pages%5CB%5CL%5CBlackSea.htm> .
3. Іванов В.А., Белокопитов В.М. Океанографія Чорного моря. Севастополь: Морський гідрофізичний інститут НАН України, 2011. С. 5–45.
4. Shaw D. P., et al. ESaTDOR: European Seas and Territorial Development, Opportunities and Risks, Final Report. Luxembourg: ESPON, the European Observation Network for Territorial Development and Cohesion, 2013., URL: [https://archive.espon.eu/sites/default/files/attachments/ESaTDOR\\_FR\\_Annex\\_5\\_Black\\_Sea\\_Profile.pdf](https://archive.espon.eu/sites/default/files/attachments/ESaTDOR_FR_Annex_5_Black_Sea_Profile.pdf)
5. Jira D. C., Panin N. Вузькі шельфові каньйони проти широких шельфових каньйонів: два різні типи підводних каньйонів Чорного моря. *Quaternary International*. 2020. Т. 540. С. 120–136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.08.00> .
6. Авдєєв А.І., Белокопитов В.М. Морфометричні характеристики та розчленованість рельєфу дна північної частини Чорного моря. *Морський гідрофізичний журнал*. 2011. № 4. С. 43–63.
7. Суворов А.М., Єремєєв В.Н., Белокопитов В.Н., Халіулін А.Х., Годін Е.А., Інгеров А.В., Палмер Д. Цифровий атлас «Фізична океанографія Чорного моря». Системи контролю навколишнього середовища. Севастополь: ЕКОСІ-Гідрофізика. 2004. С. 125–129.
8. Букатов А.Е., Бабий М.В., Станичний С.В. Атлас температури поверхні Чорного моря за супутниковими даними 1986–2002. Севастополь: МПІ НАН України, 2005. 265 с.

9. Океанографічний атлас Чорного та Азовського морів. Київ, ДУ «Держгідрографія», 2009. 365 с.

10. Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А., Бабій М.В. Сезонна змінність температурних фронтів на поверхні Чорного моря за супутниковими даними. Системи контролю навколишнього середовища. Севастополь: МГІ НАНУ. 2005. С. 234–236.

11. Sryberko A., Sryberko A. Spatio-temporal variability of chlorophyll–A concentration in the Azov-Black Sea basin during the period March–August 2023. *Grundlagen der modernen wissenschaftlichen Forschung: Proceedings of the 5th Int. Sci.-Pract. Conf*, (Zürich, October 27, 2023). Zürich–Vinnytsia: Boleswa Publishers; European Scientific Platform, 2023. P. 289–291. DOI: 10.36074/logos-27.10.2023.89

12. NASA's OceanColor Web. Ocean Science Data Product Format Specification. 2017. Retrieved from [https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/docs/format/Ocean\\_Data\\_Product\\_Users\\_Guide.pdf](https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/docs/format/Ocean_Data_Product_Users_Guide.pdf) (accessed January 2025).

13. NASA MODIS. 2025. Retrieved from <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php> (Accessed January 2025).

14. N2YO.com system, TERRA. 2025. Retrieved from <https://www.n2yo.com/satellite/?s=25994> (Accessed January 2025).

15. NASA Terra. 2014. Retrieved from <https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/services/missions/earth/Terra.html> (Accessed January 2025).

16. Kilpatrick K. A., Podestá G., Walsh S. et al. A decade of sea surface temperature from MODIS. *Remote Sensing of Environment*. 2015. Vol. 165. pp. 27-41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.04.023>.

17. NASA Goddard Space Flight Center. 2025. Retrieved from [https://eosps.nasa.gov/sites/default/files/publications/2002\\_MODIS\\_sst\\_Jason.pdf](https://eosps.nasa.gov/sites/default/files/publications/2002_MODIS_sst_Jason.pdf) (Accessed January 2025).

18. Terra measures sea surface temperature with unprecedented detail. Public release: 27.02.2002. Retrieved from [https://www.eurekaalert.org/pub\\_releases/2002-02/nsfc-tms022702.php](https://www.eurekaalert.org/pub_releases/2002-02/nsfc-tms022702.php) (Accessed May 2022).

19. Terra measures sea surface temperature with unprecedented detail. Science Daily. Public release: 05.03.2002. Retrieved from <https://www.sciencedaily.com/releases/2002/02/020228072457.htm> (Accessed May 2022).
20. NASA MODIS brochure. Retrieved from [https://modis.gsfc.nasa.gov/about/media/modis\\_brochure.pdf](https://modis.gsfc.nasa.gov/about/media/modis_brochure.pdf) (Accessed January 2025).
21. MODIS Sea Surface Temperature (SST) Products. Retrieved from [https://podaac-ools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/modis/L3/docs/modis\\_sst.html#10](https://podaac-ools.jpl.nasa.gov/drive/files/allData/modis/L3/docs/modis_sst.html#10) (Accessed May 2022).
22. NASA's OceanColor Web. National Aeronautics and Space Administration, OceanColor Web. 2025. Retrieved from: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/l3/> (Accessed 10.02.2025).
23. A decade of sea surface temperature from MODIS / Kilpatrick, K. A., Podestá, G., Walsh, S. et al. Remote Sensing of Environment. 2015. Vol. 165. pp. 27-41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.04.023> .
24. Argo. 2022. Retrieved from <https://argo.ucsd.edu> (Accessed April 2022).
25. Schlitzer, Reiner. Ocean Data View. 2025. Retrieved from: <https://odv.awi.de> (Accessed 17 April 2025).
26. NASA's SeaDAS. 2025. Retrieved from: <https://seadas.gsfc.nasa.gov/about>
27. Devore J. L. Probability and Statistics for Engineering and the Sciences. 8th ed. Cengage Learning. 2011. 768 p. [https://faculty.ksu.edu.sa/sites/default/files/probability\\_and\\_statistics\\_for\\_engineering\\_and\\_the\\_sciences.pdf](https://faculty.ksu.edu.sa/sites/default/files/probability_and_statistics_for_engineering_and_the_sciences.pdf) .
28. Kiernan D. Natural resources biometrics. State University of New York. 2014. 251p. <https://digitalcommons.humboldt.edu/oer/1/> .
29. Сриберко А.В., Андрианова О.Р., Тучковенко Ю.С. Термохалинна структура та методика розрахунків її просторового розподілу в діяльному шарі Чорного моря. Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2024. 249с.
30. Deep R. Probability and Statistics: with Integrated Software Routines. Elsevier Academic Press Publications, USA. 2006. 686 p.

31. Hogg Robert V., Tanis Elliot A., Zimmerman D. Probability and Statistical Inference. 9th ed. Pearson Education, Inc., USA, 2015. 548 p.
32. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. 2006. 816 с.
33. Ahn H. Probability and Statistics for Science and Engineering with Examples in R Second Edition. California, Cognella Inc. & University Readers, 2018. 361 p.
34. Sryberko A. Calculation of the vertical distribution of water temperature in the Black Sea by satellite data. *Geographia Technica*, 2019. Vol. 14. Issue 2. pp. 97–111. [https://doi.org/10.21163/GT\\_2019.142.09](https://doi.org/10.21163/GT_2019.142.09).
35. Чорне море як полігон для відпрацювання дистанційних методів контролю: монографія / О. Р. Андріанова, А. А. Батирєв, Р. Р. Белевич та ін. Київ: Наукова думка, 2018. 176 с.
36. Оцінка можливості розрахунку вертикального розподілу температури води в Чорному морі за супутниковими даними / О. Р. Андріанова, М. І. Скіпа, А. В. Сриберко та ін. *Вісник Одеського національного університету. Серія: Географічні та геологічні науки*, 2015. Т. 20, Вип. 4. С. 9–21.
37. Oguz T., Tugrul S., Kideys A. E., Ediger V., Kubilay N. Physical and biogeochemical characteristics of the Black Sea (28, S). *The sea*. 2005. Vol. 14. Chapter 33. pp. 1333-1371.
38. EuroGOOS. Retrieved from: <https://eurogoos.eu/about-eurogoos/what-is-operational-oceanography/> (Accessed 14 May 2024).
39. Sryberko A.A. Spatio-temporal variability of the Black Sea surface temperature based on satellite data in the period 2000–2024. Scientific review of the actual events, achievements and problems: collection of scientific papers «SCIENTIA», with Proceedings of the II International Scientific and Theoretical Conference, May 31, 2024. Berlin: International Center of Scientific Research, 2024. pp. 298–301. DOI: <https://doi.org/10.36074/scientia-31.05.2024>.
40. Берлінський М.А., Гаврилюк Р.В., Даниленко О.О. Тенденції довготермінових змін полів температури, солоності та рівня вод в північно-

західній частині Чорного моря. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2019. Т. 23. С. 84-94. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.23.2019.08> .

41. Sryberko A. Analysis of the thermohaline structure in the active layer of the marine environment according to the calculated hydrophysical characteristics based on remote measurements (on the example of the Black Sea), European vector of development of the modern scientific researches: collective monograph. 1st ed. Riga, Latvia: “Baltija Publishing”, 2021. pp. 103-123. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-077-3-6> .

42. Copernicus. Architecture of an Ocean Monitoring and Forecasting System. 2025. URL: <https://marine.copernicus.eu/explainers/operational-oceanography/monitoring-forecasting> .