

© Монюшко М.М., Васалатій Н.В., Черой Л.І.

## АНАЛІЗ ШВИДКОСТЕЙ ТЕЧІЙ В ОКРЕМИХ РАЙОНАХ СЕРЕДЗЕМНОГО МОРЯ: РОЗРАХУНКИ ТА ЇХ ЗНАЧЕННЯ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО СУДНОВОДІННЯ

**Анотація.** Проведені дослідження, пов'язані з системою циркуляції вод та водообміном Середземного моря з океаном. На основі даних натурних експедиційних досліджень (температури та солоності морської води) Національного управління океанічних і атмосферних досліджень (NOAA) на різних розрізах розраховані та побудовані карти просторового розподілу швидкостей течій в акваторії Гібралтарської протоки та окремих районах Середземного моря. За допомогою рівняння водного балансу, використовуючи дані з атмосферного реаналізу ERA5 за опадами і випаровуванням, проведена оцінка об'ємів водних мас, які надходять з Північної Атлантики в море та витікають в океан з моря. Показано, що така двошарова система течій впливає на інтенсивність поверхневих течій в Гібралтарській протоці. Розглянута дія траверзної течії на судно у самій вузькій частині Гібралтарської протоки, де швидкості течії досягають максимальних значень.

**Ключові слова.** Середземне море, Гібралтарська протока, швидкості течій, водний баланс, океан, водні маси.

**Вступ.** Середземне море являє собою не тільки унікальний за гідрологічними властивостями басейн, а також має дуже важливе стратегічне значення, оскільки об'єднує Європу, Азію та Африку. Через Середземне море проходять найважливіші морські канали та протоки, такі як Суецький канал, Гібралтарська протока, Босфор та Дарданелли. Ці водні шляхи поєднують Атлантичний океан з Індійським і Тихим океанами. Це робить його ключовим регіоном для міжнародної торгівлі та морського судноплавства. Вивчення морських шляхів, зокрема гідрологічного режиму окремих районів Середземного моря є важливим для забезпечення безпечного та ефективного руху суден. Дана стаття присвячена дослідженню циркуляції вод в Гібралтарській протоці та окремих районах Середземного моря, а саме аналізу розрахунків швидкостей течій, що має важливе значення для оцінки впливу течії на маневрені характеристики судна. Також течії можуть відігравати важливу роль у поширенні забруднюючих речовин. Такі дослідження течій дозволяють мінімізувати негативний вплив судноплавства для запобігання або мінімізації екологічних збитків екосистеми моря. Дослідження гідрологічного режиму Середземного моря, зокрема течій мають ключове значення для забезпечення безпеки, ефективності та стійкості судноплавства.

**Аналіз останніх досліджень.** Сучасний аналіз літератури гідрологічного режиму Середземного моря включає вивчення різних аспектів гідрофізичних, гідрохімічних процесів, включаючи динаміку течій, температурні зміни, солоність морської води та інші параметри, які впливають на екосистему моря. Існує велика кількість досліджень, присвячених цим питанням, у тому числі роботи, засновані на даних з 60-х років, коли розпочалася активна розробка гідрологічних досліджень у Середземному морі, основну роль цих досліджень відігравали іноземні вчені. Сьогодні активно вивчають вплив глобального потепління на екосистему моря. Сучасні роботи в цій галузі активно використовують дані супутникового моніторингу, моделі течій та екологічні дослідження, що дозволяє отримувати більш точні та актуальні результати. Однак, незважаючи на велику кількість досліджень, існує необхідність подальшого вивчення більш вузьких аспектів гідрологічного режиму Середземного моря, таких як локальні течії, вплив погодних умов, судноплавства на екологію моря з метою забезпечення безпеки, ефективності та економічності судноплавної діяльності, а також для прогнозування та управління екологічними ризиками.

**Мета роботи** – на різних розрізах розрахувати на основі даних натурних експедиційних досліджень (температури та солоності морської води) швидкості течій та побудувати карти просторового розподілу швидкостей течій в акваторії Гібралтарської протоки та окремих районах Середземного моря. На підставі рівняння водного балансу Середземного моря оцінити водообмін моря з океаном крізь Гібралтарську протоку. Розрахунки об'ємів води, що надходять в поверхневу шарі з Атлантики в Середземне море та витікають в придонному шарі Гібралтарської протоки з моря в океан є невід'ємною частиною безпечного, ефективного та екологічно збалансованого судноплавства, що дозволяє оптимізувати маршрути, враховувати вплив течій на маневрування суден та мінімізувати ризики для навколишнього середовища та морських екосистем.

**Основна частина.** Відомо, що течія впливає на швидкість судна, поворотливість, викликає бічний знос. Взагалі, слід пам'ятати про те, що маса води, яка рухається, у 800-1000 разів щільніша за повітря і, отже, вона може генерувати сили величезної величини. Тому дуже важливо враховувати швидкість і напрямок течії на кожному курсі судна, та пам'ятати, що елементи течії – напрям і швидкість — схильні до значних змін. При плаванні на течії слід контролювати своє місце всіма доступними способами, оскільки на течії значно змінюються інерційні характеристики судна та спотворюється крива циркуляції на поворотах.

У якості вихідних матеріалів для розрахунку швидкостей течій в Гібралтарській протоці та окремих районах Середземного моря використані дані Національного управління океанічних і атмосферних досліджень (NOAA) [6]. Вихідними матеріалами є дані натурних експедиційних досліджень розподілу температури та солоності морської води на різних розрізах в окремих акваторіях Середземного моря (рис.1). В якості альтернативного джерела інформації для оцінки обміну водними масами між Середземним морем та Атлантичним океаном використані дані з атмосферного реаналізу ERA5 [7] за опадами і випаровуванням за період 2002-2020 роки.

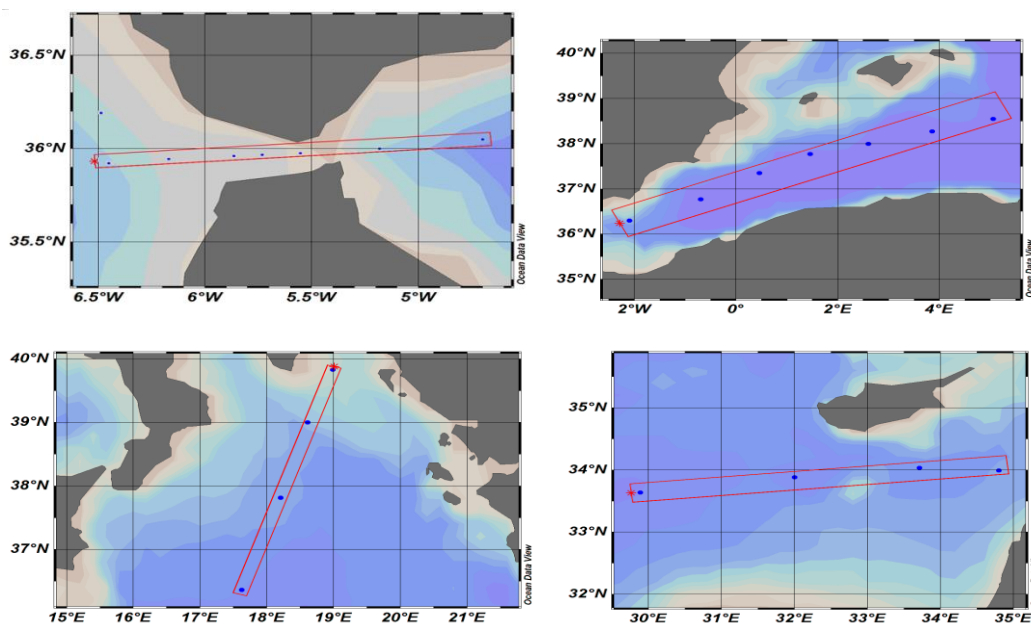


Рисунок 1 – Розташування розрізів в акваторії Середземного моря.

Середземне море з'єднане з Атлантичним океаном через вузьку Гібралтарську протоку. Гідрологічний режим системи обумовлений обміном прісною водою між атмосферою, континентами та океанами, а також обміном солоною водною масою між океанічними басейнами. У протоці, яка з'єднує море з океаном утворюється двохшарова система течій, з яких придонна є термохалінною, а поверхнева - стічною, тобто існує певний водообмін між морем та океаном [1,2]. Моніторинг таких потоків води, необхідний для розуміння водного циклу в регіоні, який дуже чутливий до глобальних кліматичних змін і впливає на мінливість Атлантичної меридіональної

циркуляції, яка у свою чергу, впливає на глобальний клімат [3,4]. Крім того така двохшарова система течій впливає на структуру та інтенсивність поверхневих течій в Гібралтарській протоці, що чинить дію на судноплавство, оскільки така система створює особливості руху води, які можуть бути як корисними так і складними для суден, тобто впливати на маневреність судна, особливо при підході до протоки.

Середземне море – напівзамкнене море площею  $2,5 \times 10^6$  км<sup>2</sup>, де випаровування ( $V_{вип}$ ) перевищує опади ( $V_{оп}$ ) та надходження річкового стоку ( $V_{р.с.}$ ), а дефіцит водної маси повинен заповнюватися горизонтальними потоками води, а саме, надходженням континентальних прісних вод та припливом солоних вод з Атлантичного океану та Чорного моря. Зв'язок з Атлантикою здійснюється через Гібралтарську протоку (ширина у найвужчому місці – 14 км, глибина на фарватері 338м). Рівняння водного балансу для Середземного моря можна записати як:

$$V_{вип} \cdot S_{вип} = V_{вт} \cdot S_{вт} \quad (1),$$

де  $V_{вип}$  - об'єм води, який витікає з моря крізь протоку;

$V_{вт}$  - об'єм води, який поступає в море крізь протоку;

$S$  – солоність води, яка витікає та поступає крізь протоку.

$$V_{вип} = V_{вт} + V_{оп} + V_{р.с.} - V_{вип} \quad (2),$$

де  $V_{оп}$  - об'єм вод, що надходить від опадів за рік,

$V_{р.с.}$  - об'єм річкового стоку, що надходить за рік,

$V_{вип}$  - об'єм води, що випаровується за рік.

Середньорічна кількість опадів у Середземному морі за період 1991-2020 рр. становить у середньому від 337 до 480 мм на рік. Випаровування оцінюється в діапазоні від 920 до 1190 мм на рік. Перевищення випаровування над опадами дає середньорічну втрату води Середземним морем, що варіюється в межах від 583 до 710 мм на рік. Середньорічний річковий стік становить  $502 \pm 27$  км<sup>3</sup>/рік. Розрахунки обчислених річних об'ємів водообміну крізь Гібралтарську протоку на підставі використаних рівнянь (1,2) показали, що об'єми води, які витікають з Середземного моря в Атлантику в придонному шарі Гібралтарської протоки складають від 12400 до 16549 км<sup>3</sup>/рік. Оскільки придонна течія посилює падіння рівня в морі, з цієї причини у верхньому шарі протоки утворюється течія з океану в море (внаслідок нахилу рівня). Середньорічний потік води, що потрапляє з океану в поверхневому шарі протоки в Середземне море коливається в межах від 13355,5 до 17822 км<sup>3</sup>/рік. Таким чином річковий стік і приплив атлантичних вод відновлюють водний баланс в Середземному морі, але цей баланс не досягається миттєво, і вносить сезонну мінливість у всіх потоках. Зокрема, надходження води з Атлантичного океану збільшується до  $4200 \pm 200$  км<sup>3</sup>/рік у серпні/вересні місяці та зменшується у квітні/травні. Така двохшарова система течій впливає на інтенсивність поверхневих течій в Гібралтарській протоці. Потужний потік води (до 17822 км<sup>3</sup>/рік), що надходить з північної частини Атлантичного океану в Середземне море проходить по середині протоки. Тому при плаванні по протоці в західному напрямку, судна повинні триматися ближче до його берегів, але при цьому потрібно мати на увазі, що біля берегів багато небезпек, а у мисів, що виступають у протоку, бистрини і суло. Виходячи з вище зазначеного доцільно було розрахувати швидкості течій та побудувати карти просторового розподілу швидкостей течій в акваторії Гібралтарської протоки та окремих районах Середземного моря (рис. 2,3,4,5). Швидкості течій розраховані за даними натурних експедиційних досліджень температури та солоності морської води на розрізах (рис.1) за допомогою програмного продукту OCEAN DATA VIEW (Version 4.7.10 - 2017). На рис. 2 показано, що поверхнева течія транспортує води з Атлантичного океану в Середземне море, в найвужчій частині Гібралтарської протоки охоплюючи шар води до 150-175 м. Швидкості течії у найвужчій ділянці протоки досягають максимальних значень і складають 100-120 см/с.

Нижче розглянута дія бічної течії на судно у Гібралтарській протоці, у самій вузькій її частині, де швидкості течії досягають максимальних значень (рис.2), і дорівнює 1,9 вузлів (100 см/с) і траверзного вітру 12 вузлів на танкер дедвейтом 90 тис.т.

$$C = f \cdot L \cdot d \cdot v_T^2 \quad (3)$$

де  $C$  – навантаження, що створюється течією, виражене в "коротких" тонах (907,2 кг);

$f$  – фактор, що залежить від запасу води під кілем, який змінюється від 0,0015, коли глибина в 3 рази більше осадки, до 0,0036, коли глибина дорівнює 1,1 осадки; якщо глибина в 2 рази більша за осадку, фактор дорівнює 0,0018;

$L$  – довжина судна по ватерлінії, фути;

$d$  – середня осадка, фути;

$v_T$  – швидкість течії, у вузлах.

На судно в порожньому стані із середнім осадом 20 фут (довжина судна по ватерлінії 810 фут) при глибині моря, що більше осадки в три рази, течія в 1,9 вузлів розвиває навантаження 88 тс, а 12-вузловий вітер створює навантаження 9 тс, що в сумі становить поперечне зусилля, що дорівнює 97 тс. У випадку, якщо танкер підійде з частиною вантажу, що дорівнює 35000 т, із середнім осадом 35 фут (глибина в два рази більше за осадку), течія докладатиме силу 105 тс, а вітер - 6 тс, внаслідок чого поперечна сила збільшиться до 111 тс. Таким чином, при таких високих значень швидкостей течій особливо необхідно враховувати бічний знос судна при плаванні фарватерами. Особливо небезпечний бічний знос на крутих поворотах фарватера під час руху судна за течією. Бічне знесення посилюється відцентровою силою інерції, що виникає при повороті судна, що може призвести до різкого закидання корми судна на зовнішній бік повороту.

По мірі просування від Гібралтарської протоки до західної частини Середземного моря швидкість поверхневих течій зменшується від 50 до 10 см/с (рис. 2,3). У східному районі Середземного моря переважає односпрямований по глибині рух вод. Величини швидкостей течій у поверхневому шарі досягають в середньому 5-10 см/с, а на глибинах 200- 300 м 2-5 см/с (рис.5).

Карти просторового розподілу швидкостей течій у Середземному морі показують, що течії не проникають глибше 400 м на всіх чотирьох розрізах (рис. 2, 3, 4, 5) при найбільшій глибині моря 5267 м.

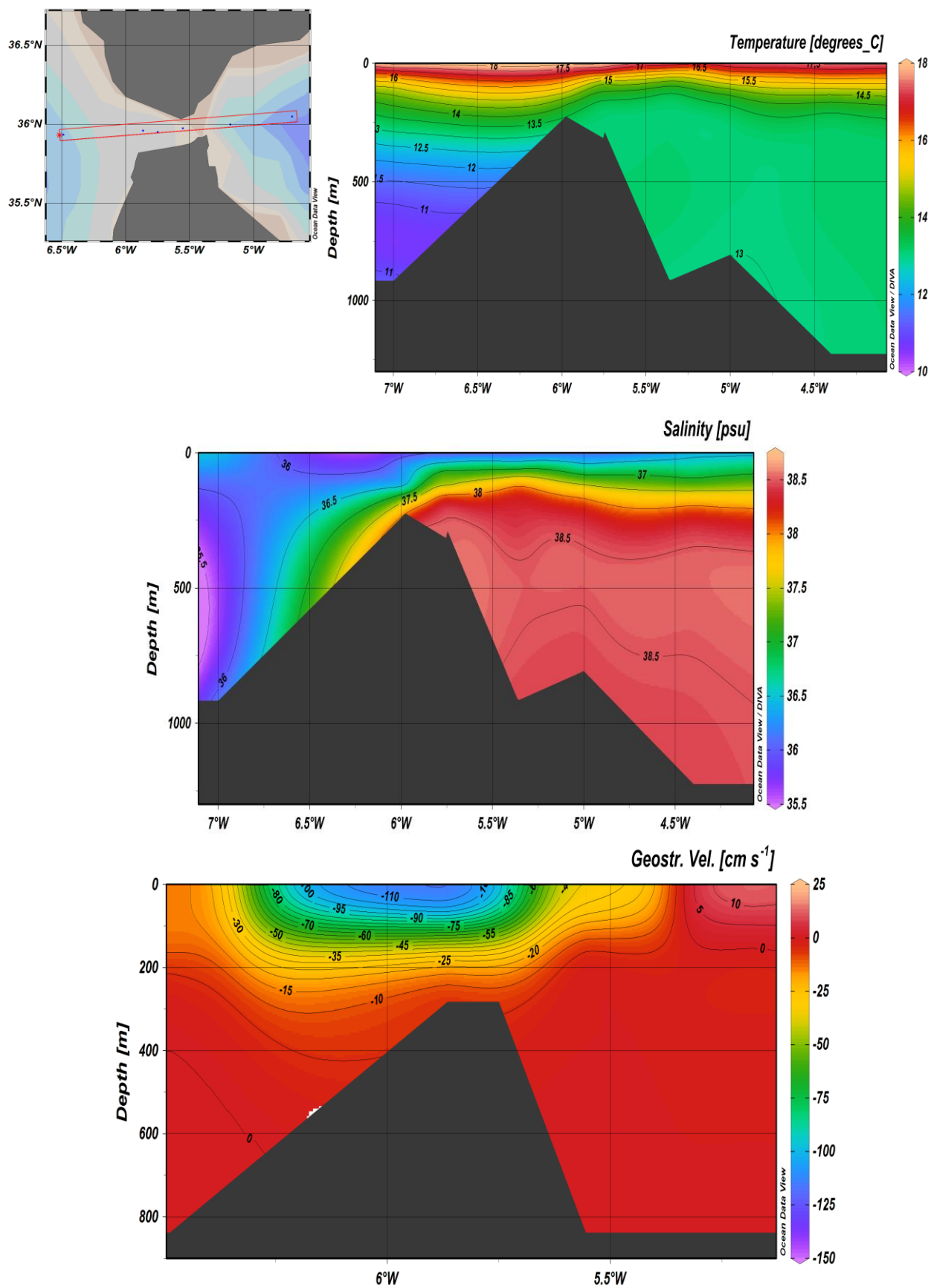


Рисунок 2 – Карта просторового розподілу температури, солоності морської води та швидкостей течій на розрізі в Гібралтарській протоці (травень 2011 р)

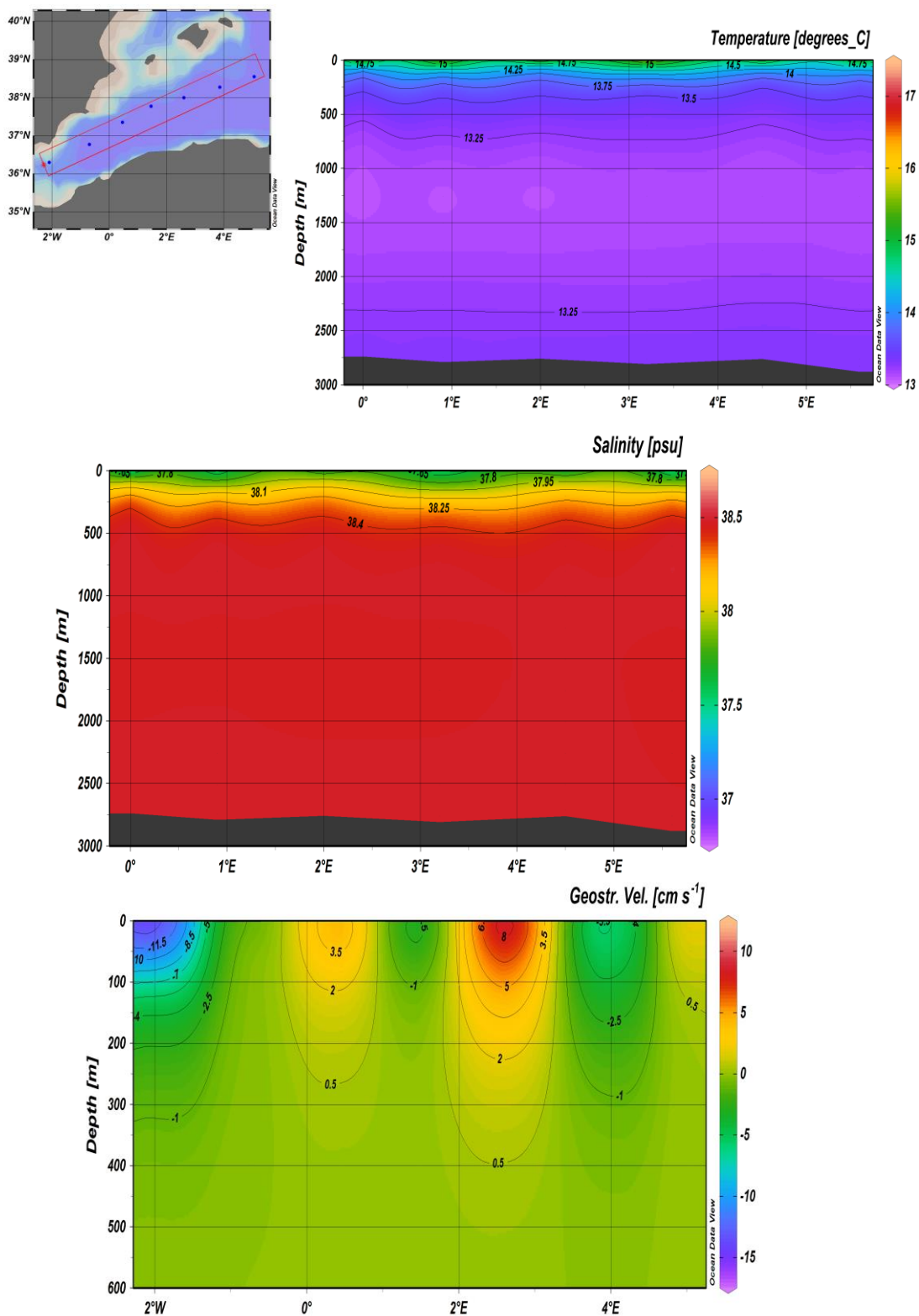


Рисунок 3 – Карта просторового розподілу температури, солоності морської води та швидкостей течій на розрізі в західній частині Середземного моря (квітень 2011 р)

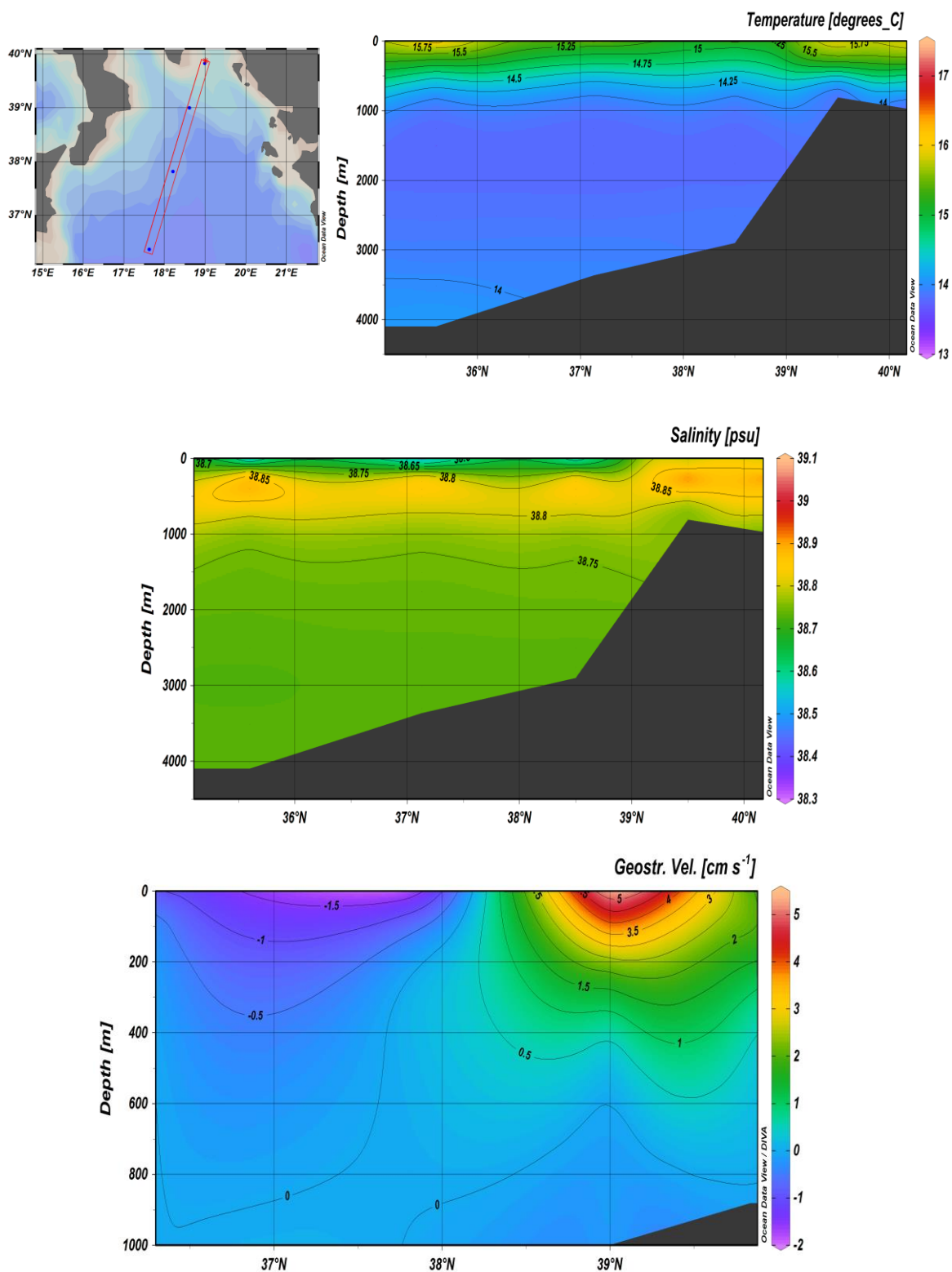


Рисунок 4 – Карта просторового розподілу температури, солоності морської води та швидкостей течій на розрізі в акваторії Іонічного моря (квітень 2011 р)

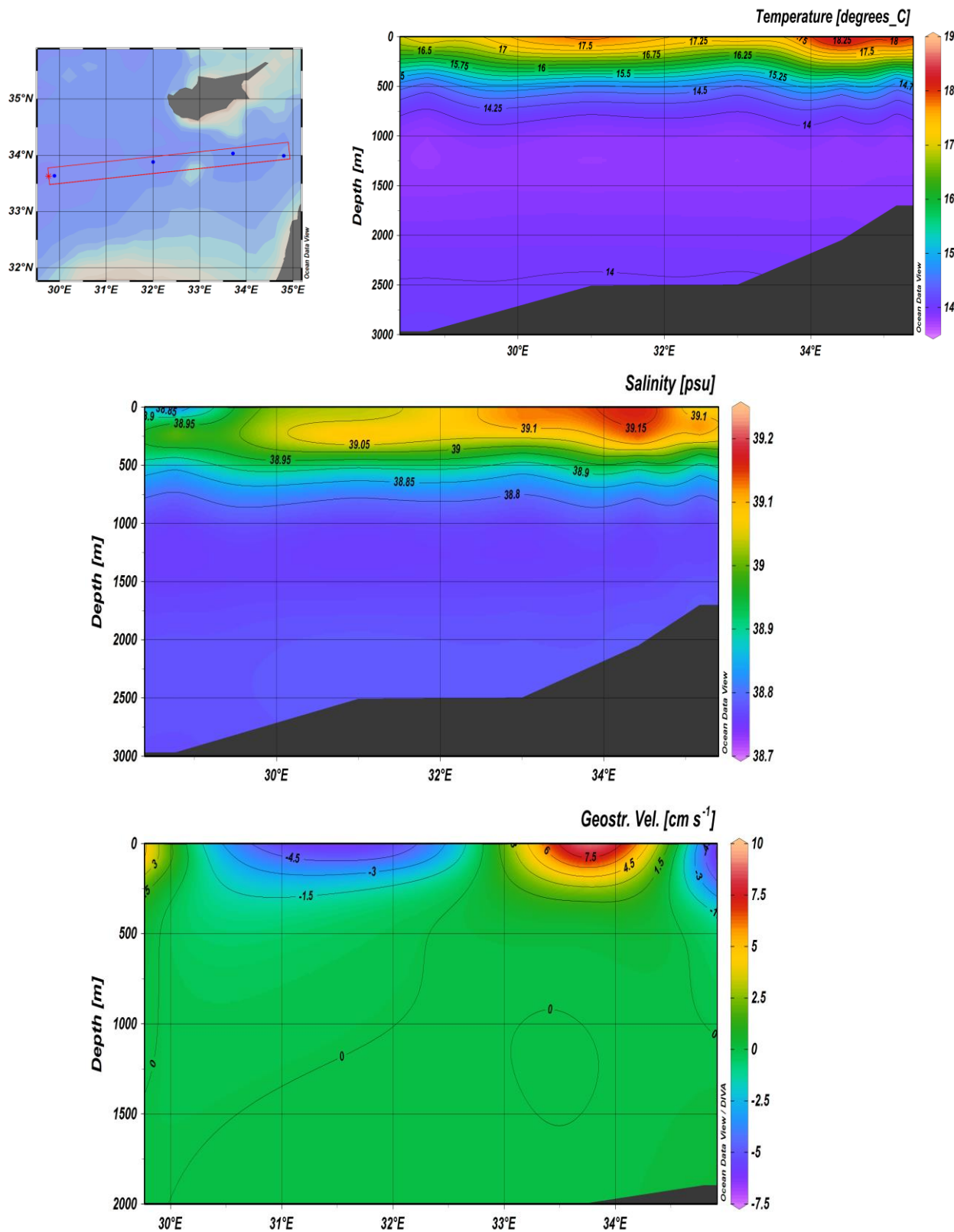


Рисунок 5 – Карта просторового розподілу температури, солоності морської води та швидкостей течій на розрізі в східній частині Середземного моря (квітень 2011 р)

**Висновки.**

1. Розраховані швидкості та побудовані карти просторового розподілу швидкостей течій, температури і солоності морської води в акваторії Гібралтарської протоки та окремих районах Середземного моря. Визначено, що швидкості течії зростають у самій вузькій частині протоки і досягають максимальних значень, що дорівнюють 100-120 см/с. По мірі просування від Гібралтарської протоки до західного басейну Середземного моря швидкості течій на поверхні зменшуються від 50 до 10 см/с. У східному басейні Середземного моря домінує односторонній по глибині рух вод. Величини швидкостей течій у поверхневому шарі досягають в середньому 5-10 см/с, а на горизонтах 200-300 м 2-5 см/с. Побудовані карти просторового розподілу швидкостей течій у Середземному морі показують, що течії не проникають глибше 400 м на всіх досліджуваних розрізах при глибині моря 5267 м.

2. Розглянута дія траверсної течії на судно у самій вузькій частині Гібралтарської протоки, де швидкості течії досягають максимальних значень (100-120 см/с): розраховане навантаження, що створюється течією на судно у порожньому стані із середнім осадом 20 фут становить 97 тс., якщо танкер підійде з частиною вантажу, що дорівнює 35000 т, поперечна сила збільшиться до 111 тс.

3. За допомогою рівняння водного балансу для Середземного моря розраховані об'єми водних мас, які надходять з Північної Атлантики в море та витікають з моря в океан: об'єм водної маси, що поступає з Північної Атлантики в Середземне море у поверхневому шарі протоки коливається в межах від 13355,5 до 17822 км<sup>3</sup>/рік; середньорічний потік води, який витікає з моря в океан в придонному шарі Гібралтарської протоки складає від 12400 до 16549 км<sup>3</sup>/рік. Така двохшарова система течій впливає на інтенсивність поверхневих течій в Гібралтарській протоці.

Проведені в роботі дослідження, пов'язані з системою циркуляції вод та водообміном моря з океаном мають важливе значення для оцінки впливу течії на маневрені характеристики судна. Отримані результати швидкостей течій можуть бути використані при управлінні судами та при дослідженнях пов'язаних з переносом системою течій розливів нафти, хімічних речовин та інших забруднювачів з метою мінімізувати негативний вплив судноплавства на екосистему моря.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. В.І. Михайлов, Н.В. Кучеренко. Спеціальні розділи фізичної океанології. Одеса: Екологія, 2011. - 238 с.
2. Суховій В.Ф. Фізична океанологія. Одеса: АО БАХВА, 2001. – 315 с.
3. Bouraoui F, Grizzetti B, Aloe A. Estimation of water fluxes into the Mediterranean Sea. Journal of Geophysical Research, Volume 115, D21116, 2010.
4. Katrin Schroeder, Jacopo Chiggiato. Oceanography of the Mediterranean Sea. An Introductory Guide. Elsevier, 2023, 561 p.
5. Poulain, P.-M., Menna, M., Mauri, E., 2012. Surface geostrophic circulation of the Mediterranean Sea derived from drifter and satellite altimeter data. Journal of Physical Oceanography, Volume 42 (6), p. 973-990.
6. National Centers for Environmental Information. World Ocean Database [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ncei.noaa.gov/access/world-ocean-database-select/dbsearch.html>
7. Copernicus [Climate Data Store](https://cds.climate.copernicus.eu/datasets) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets>

**REFERENCES**

1. V.I. Mikhailov, N.V. Kucherenko. *Special sections of physical oceanology*. Odesa: Ecology, 2011. - 238 p.
2. Sukhovii V.F. *Physical oceanology*. Odesa: AO BAKHVA, 2001. – 315 p.
3. Bouraoui F, Grizzetti B, Aloe A. *Estimation of water fluxes into the Mediterranean Sea*. Journal of Geophysical Research, Volume 115, D21116, 2010.

4. Katrin Schroeder, Jacopo Chiggiato. *Oceanography of the Mediterranean Sea. An Introductory Guide*. Elsevier, 2023, 561 p.
5. Poulain, P.-M., Menna, M., Mauri, E., 2012. *Surface geostrophic circulation of the Mediterranean Sea derived from drifter and satellite altimeter data*. Journal of Physical Oceanography, Volume 42 (6), p. 973-990.
6. National Centers for Environmental Information. World Ocean Database [Electronic resource]. – Available at: <https://www.ncei.noaa.gov/access/world-ocean-database-select/dbsearch.html>
7. Copernicus [Climate Data Store](https://cds.climate.copernicus.eu/datasets) [Electronic resource]. – Available at: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets>

***Monyushko M.M., Vasalatiy N.V., Cheroi L.I.***

**ANALYSIS OF CURRENTS' VELOCITIES IN CERTAIN AREAS OF THE MEDITERRANEAN SEA: CALCULATIONS AND THEIR SIGNIFICANCE FOR EFFICIENT NAVIGATION**

*Studies related to the water circulation system and water exchange of the Mediterranean Sea with the ocean were conducted. Based on data from field expedition studies (temperature and salinity of seawater) of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) at different sections, maps of the spatial distribution of current velocities in the Strait of Gibraltar and certain areas of the Mediterranean Sea were calculated and constructed. Using the water budget equation, using data from the ERA5 atmospheric reanalysis for precipitation and evaporation, the volumes of water masses entering the sea from the North Atlantic and flowing into the ocean from the sea were estimated. It was shown that such a two-layer current system affects the intensity of surface currents in the Strait of Gibraltar. The effect of the transverse current on a ship in the narrowest part of the Strait of Gibraltar, where the current velocities reach maximum values, was considered.*

**Keywords:** *Mediterranean Sea, Strait of Gibraltar, current velocities, water budget, ocean, water masses.*

*Стаття прийнята 28.02.2025*