

© Васалатій Н.В., Монюшко М.М.

ОСОБЛИВОСТІ ГІДРОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ ТЕЧІЇ КУРОСІО В ПЕРІОД ФОРМУВАННЯ ТА РОЗВИТКУ ВЕЛИКОГО МЕАНДРУ LM2017

Проведені дослідження просторово-часової мінливості течії Куросіо на основі супутникових даних рівня моря (SSH) та геострофічних швидкостей, а також даних натурних експедиційних досліджень (температури та солоності морської води) Національного управління океанічних і атмосферних досліджень (NOAA). На різних розрізах в районі течії Куросіо розраховані та побудовані карти просторового розподілу геострофічних швидкостей течій та розраховані витрати води. Виявлено двоядерну структуру течії, яка може бути зумовлена меандруванням основного потоку та впливом підводного рельєфу. Показано, що течія Куросіо характеризується стійким існуванням меандрів, географічне положення яких зберігається в часі, тоді як їх конфігурація є змінною. Отримані результати узгоджуються з супутниковими даними та можуть бути використані для подальших досліджень океанічної циркуляції та прикладних задач, зокрема в галузі морської навігації.

Ключові слова. Течія Куросіо, акваторія, геострофічні швидкості течій, меандри, вихори.

Вступ. Течія Куросіо є однією з найпотужніших західних прикордонних течій Світового океану та відіграє ключову роль у формуванні гідродинамічних умов на значній акваторії північно-західної частини Тихого океану. Її висока швидкість, просторово-часова мінливість, а також здатність до формування складних меандрів і вихрових структур безпосередньо впливають на безпеку судноплавства та ефективність морських перевезень. У районах, де швидкість Куросіо у поверхневому шарі може перевищувати 100 см/с, а в ядрі течії сягати до 200 см/с, судна зазнають суттєвих поперечних і поздовжніх гідродинамічних впливів, що позначається на їх керованості, курсостійкості та навігаційних характеристиках. З огляду на інтенсивність торговельних та енергетичних транспортних потоків у Тихому океані, а також стратегічне значення регіону Японського архіпелагу, дослідження впливу течії Куросіо на планування морських маршрутів є критично важливим. Неврахування або неточна оцінка гідродинамічних умов може призводити до значних відхилень від заданого курсу, збільшення витрат палива, небезпечного зближення з береговою лінією та підвищення ризику аварійних ситуацій. Крім того, великі меандри та вихрові структури, характерні для Куросіо, суттєво ускладнюють прогнозування умов плавання та потребують використання високоточної океанографічної інформації. Таким чином, систематичне дослідження динаміки течії Куросіо, її поперечних компонент, просторової структури та короточасної мінливості є необхідною передумовою для формування безпечних і оптимальних маршрутів морських суден, зниження навігаційних ризиків та підвищення ефективності морських перевезень у Тихому океані.

Аналіз останніх досліджень. Останні дослідження течії Куросіо зосереджені на її багатомасштабній мінливості, ролі великих меандрів та вплив на взаємодію океану та атмосфери північно-західної частини Тихого океану. Особливу увагу в сучасній літературі приділено довготривалому епізоду великого меандру, що розпочався у 2017 році (LM2017), який суттєво змінив уявлення про динаміку цієї західної прикордонної течії.

У комплексному огляді Н. Hirata et al. (2025) показано [2,3,4], що великий меандр Куросіо є стійким режимом циркуляції, який призводить до значної перебудови просторового розподілу

швидкостей, температури та структури водних мас як у поверхневому, так і в підповерхневому шарі океану. Автори підкреслюють [2,3,4], що LM2017 є найдовшим зареєстрованим епізодом такого типу, що дозволило виявити нові механізми взаємодії між океаном і атмосферою, а також впливу на екосистеми та рибні ресурси.

Дослідження, присвячені мезомасштабній мінливості, демонструють, що головними факторами змінності Куросіо є взаємодія сезонних процесів і вихрової активності [1]. Зокрема, радіолокаційні спостереження показують, що підхід антициклонічних і циклонічних вихорів істотно змінює швидкість течії та положення її осі, що призводить до чергування прямолінійних і нестабільних фаз потоку. Це підтверджує ключову роль вихрової динаміки у формуванні просторово-часової структури Куросіо.

Окремий напрям сучасних досліджень стосується взаємодії великих меандрів з атмосферними процесами. Показано, що під час фази великого меандру змінюється інтенсивність турбулентних теплових потоків між океаном і атмосферою, що впливає на регіональні кліматичні умови в районі Японського архіпелагу та прилеглих акваторій. Крім того, довготривала стабільність LM2017 дозволила встановити його вплив на формування субтропічних водних мас і зміну циркуляції у системі Kuroshio–Kuroshio Extension (K–KE) system. У сучасних роботах також широко застосовуються лагранжеві методи аналізу та супутникові дані висотної альтиметрії, які дозволяють відстежувати транспортні шляхи водних мас і структуру динамічних бар'єрів у потоці. Ці підходи показують, що Куросіо не є стаціонарним струменем, а формує складну систему взаємопов'язаних течій, меандрів і вихрових структур, що визначають його загальну поведінку як нелінійної динамічної системи.

Таким чином, сучасні дослідження узгоджуються в тому, що течія Куросіо є високодинамічною західною прикордонною течією з вираженою мезомасштабною та субмезомасштабною мінливістю. Ключовими факторами її мінливості виступають великі меандри, вихрова активність та взаємодія океану з атмосферою. Водночас відкритими залишаються питання точного прогнозування тривалості меандрів, їх впливу на навігаційні умови та кількісної оцінки поперечних компонент швидкості для задач морської навігації.

Мета роботи. Дослідити особливості гідрологічного режиму течії Куросіо в період формування та розвитку великого меандру 2017 року (LM2017), зокрема зміни структури течії, швидкісного поля та просторово-часової мінливості гідрологічних характеристик.

Основна частина. У якості вихідних матеріалів у даній роботі використано дані Національного управління океанічних і атмосферних досліджень (NOAA) [6]. Основу інформаційної бази становлять результати натурних експедиційних спостережень розподілу температури та солоності морської води на різних розрізах в акваторії течії Куросіо.

Сучасні дослідження глобальних і регіональних процесів у Світовому океані значною мірою орієнтовані на поєднання та калібрування супутникових даних із результатами судових вимірювань, що дозволяє підвищити точність оцінок океанографічних параметрів. У зв'язку з цим для аналізу просторово-часових характеристик меандрування течії Куросіо були використані щоденні сіткові дані рівня моря над геоїдом (SSH), аномалій рівня моря (SLA) та поверхневої геострофічної швидкості з просторовою роздільною здатністю $0,25^\circ$ з CMEMS (<https://data.marine.copernicus.eu/>; Global Ocean Gridded L 4 Sea Surface Heights And Derived Variables Nrt. E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS); Copernicus Marine Service)) [5].

Куросіо (як і Гольфстрім) є яскравим прикладом інтенсифікації течій, що проходять уздовж західних берегів океану в низьких широтах. Доказом постійного існування меандрів може вважатися той факт, що вони зберігаються не лише під час побудови карт динамічної топографії за матеріалами окремих зйомок, але й при осередненні океанографічних характеристик за багаторічний період. Слід зазначити, що постійним є лише географічне положення цих меандрів, тоді як їх конфігурація безперервно змінюється.

Нижче представлені карти горизонтального розподілу висоти морської поверхні (SSH) та векторів поверхневої геострофічної океанічної течії зі швидкістю понад 0,3 м/с (стрілки) з квітня 2017 по квітень 2023 року, отримані на основі супутникових спостережень (рис.1) [2].

Подія великого меандру Куросіо (LM2017) розпочалася у серпні 2017 року і тривала до березня 2025 р.

Формування LM2017 почалося з невеликого меандру, що виник на південний схід від о. Кюсю, який потім змістився на схід, пройшовши через полуострів Кіі, і сформував великий меандр. Це відповідає механізму формування інших великих меандрів, проте LM2017 має низку унікальних особливостей.

Формування LM зазвичай пов'язане з трьома факторами: позитивними аномаліями висоти морської поверхні на схід від Тайваню, західним поширенням негативних аномалій у районі Куросіо та стабільним станом Куросіо над хребтом Ідзу. Для LM2017 перші два фактори були виконані, проте Куросіо в момент формування LM2017 перебував у нестабільному стані, що робить його винятком серед попередніх подій.

Однією з унікальних характеристик LM2017 є його тривалість. Починаючи з 1950 року було зафіксовано вісім великих меандрів, і саме LM2017 виявився найдовготривалішим серед них. Таке тривале існування меандру пояснюється низьким рівнем транспортування Куросіо та стабільністю системи течії на схід від хребта Ідзу після 2018 року. Це, в свою чергу, зменшило вплив західних збурень і сприяло стабілізації положення Куросіо (рис. 1).

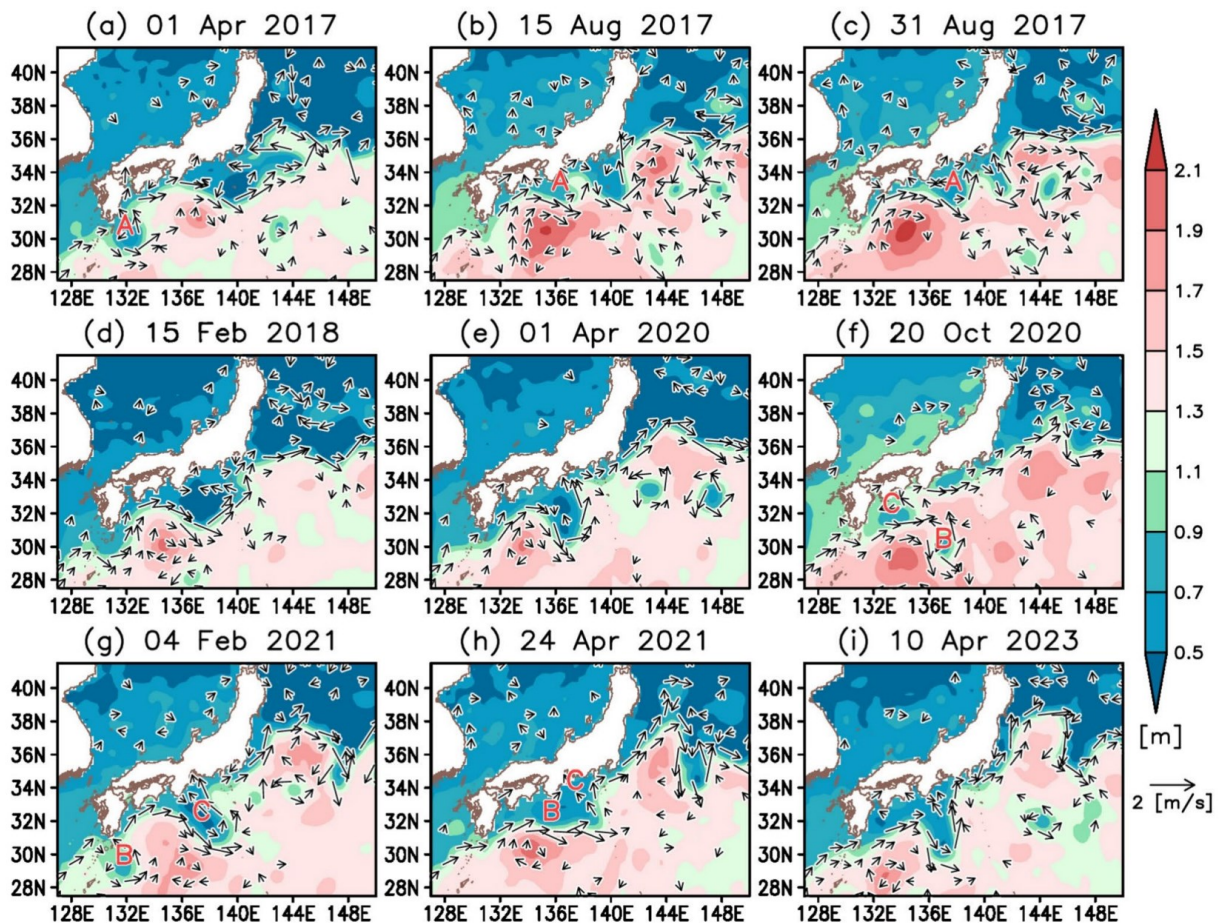


Рисунок 1 – Горизонтальний розподіл SSH та векторів поверхневої геострофічної течії за період квітень 2017-квітень 2023 Global Ocean Gridded L4 provided by the CMEMS) [2]

Також унікальні варіації шляху та структури течії. Слід зазначити, що відносно сталим залишається географічне положення меандру, тоді як його конфігурація безперервно змінюється.

Взагалі, меандри або хвилі, що утворюються потоком Куросіо, мають амплітуду близько 100-150 км при довжині їх близько 300-500 км. Окремі хвилі мають дуже крутий вигин і відокремлюються від основного потоку у вигляді вихорів. Як і в Гольфстрімі, ліворуч від потоку утворюють антициклонічні вихори, а справа - циклонічні. Окрім утворення великих меандрів у прикордонних шарах Куросіо (тобто праворуч і ліворуч від потоку) постійно формуються вихори різних розмірів (рис.1). Ці прикордонні вихори мають антициклонічний напрям обертання на правій межі Куросіо та циклонічний — на лівій. Особливістю цих вихорів є те, що на правій (океанічній) межі Куросіо вони є більш масштабними за розмірами та поширюються вглиб до 500 м. Вихори на лівій (прибережній) межі є меншими, а глибина їх поширення не перевищує 100 м.

Від'єднання циклональних вихорів також є унікальним явищем для LM2017. Вихори відокремлювалися від S-образного шляху течії і потім знову поглиналися Куросіо, що призводило до тимчасової редукції амплітуди меандру та його подальшого швидкого відновлення. Аналогічні процеси раніше спостерігалися лише наприкінці 1970-х років. Таким чином, LM2017 характеризується значною тривалістю, нестабільним раннім шляхом течії, S-подібною кривизною на пізніх етапах, а також унікальними процесами від'єднання та повторного приєднання вихорів, що відрізняє його від попередніх великих меандрів Куросіо.

З метою аналізу просторової структури та мінливості течії Куросіо виконані розрахунки швидкостей течії на основі даних натурних експедиційних досліджень температури та солоності морської води. Обробку та візуалізацію даних здійснено за допомогою програмного пакету OCEAN DATA VIEW на різних гідрологічних розрізах (рис. 2 – 4).

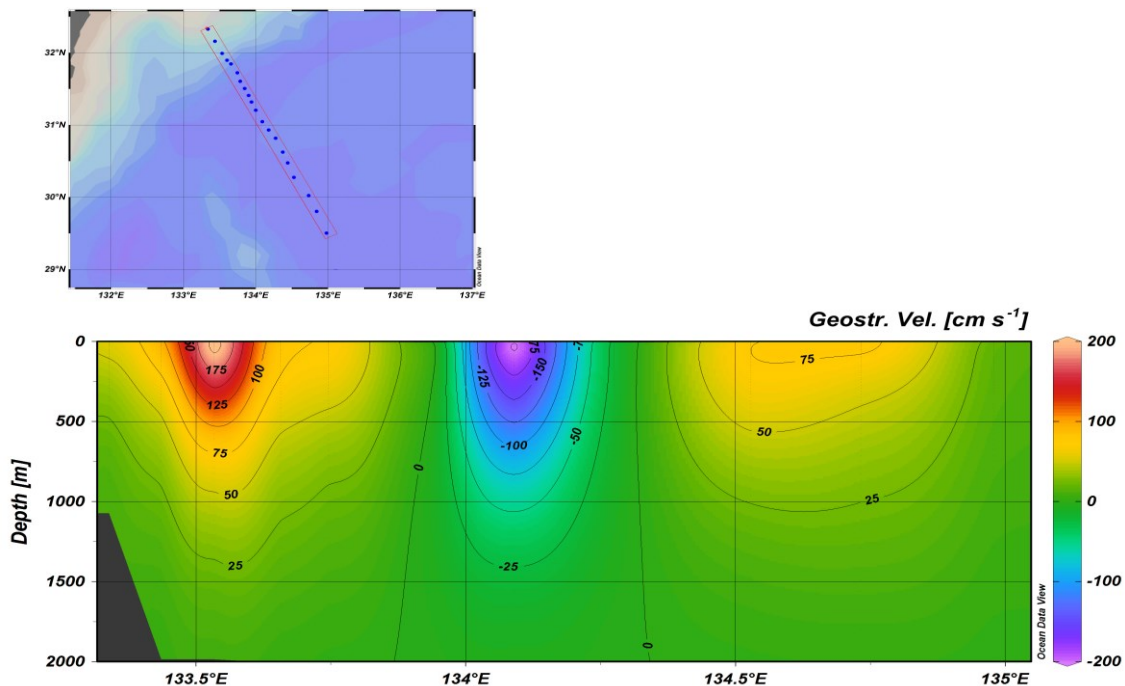


Рисунок 2 – Карта просторового розподілу геострофічних швидкостей течій на розрізі (29,6-32,5°пн.ш.;133,3-135°сх.д., серпень 2017р.)

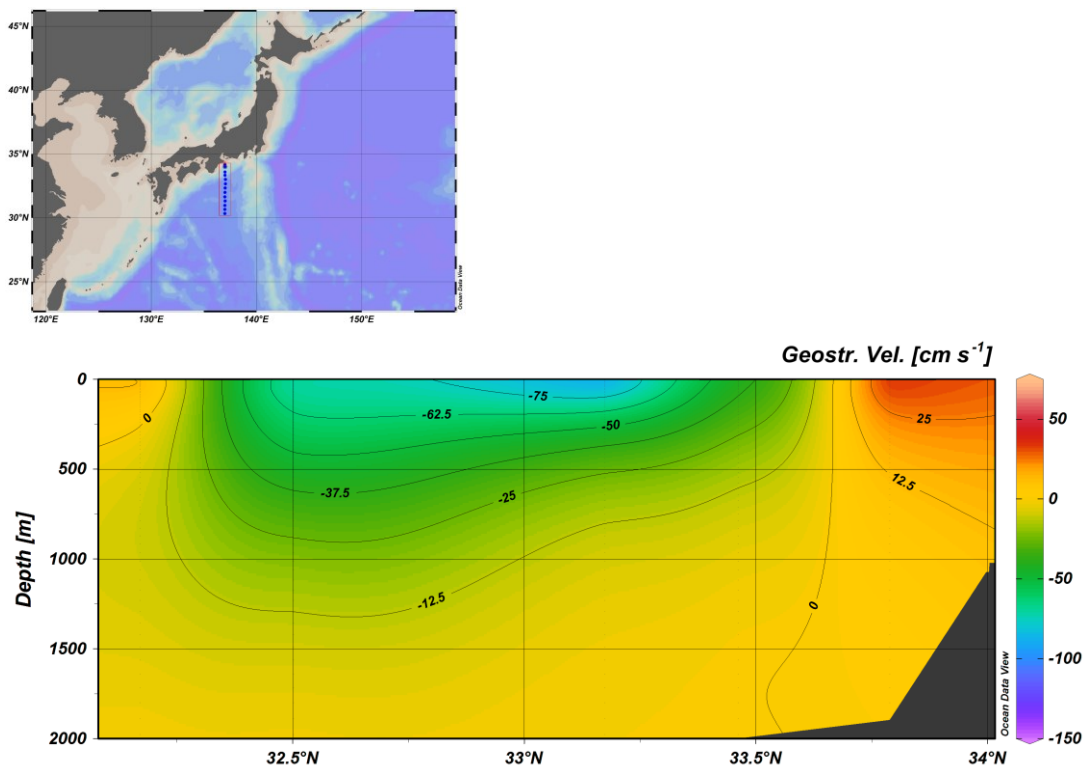


Рисунок 3 – Карта просторового розподілу геострофічних швидкостей течій на розрізі по 137°сх.д. (жовтень 2022р.)

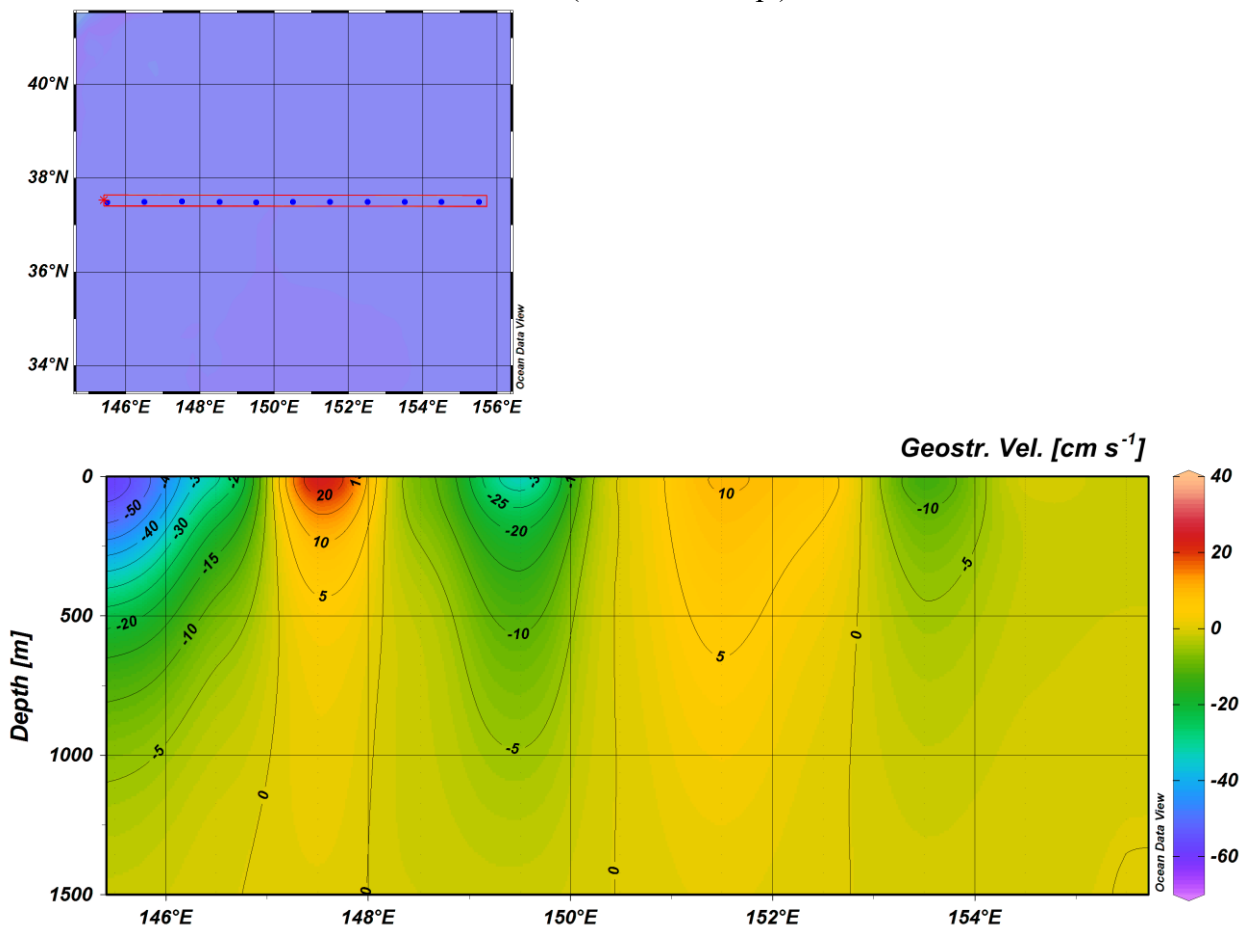


Рисунок 4 – Карта просторового розподілу геострофічних швидкостей течій на розрізі по 37,5°пн.ш.

На основі побудованих карт просторового розподілу геострофічних швидкостей течій (рис. 2-4), встановлено, що максимальні значення швидкостей (до 200 см/с) спостерігаються в південній частині досліджуваного району (рис. 2). Це може бути пов'язано з тим, що в даній області проходить основна струя течії Куросіо на вході в район акваторії на широті Японських островів. На цій ділянці течія ще не повністю стабілізована і може зміщуватися як на південь, так і на північ. Крім того, тут часто спостерігаються ярко виражені градієнти та фронтальні зони, у яких геострофічні швидкості досягають максимальних значень. Крім того, у досліджуваному районі виявлено двоядерну структуру течії, яка характеризується наявністю двох яскраво виражених максимумів геострофічних швидкостей (рис.2). Подібна особливість може бути пов'язана з меандруванням основної струмені течії Куросіо, а також із впливом підводного рельєфу, який може сприяти деформації та розщепленню струмені течії. Розрахунки швидкостей течій, виконані з використанням ODV, добре узгоджуються з даними про горизонтальний розподіл SSH та векторами поверхневої геострофічної течії за період серпень 2017 р (рис.1, 2).

З динамікою Куросіо пов'язані специфічні особливості розподілу океанографічних характеристик: великі горизонтальні градієнти, нахил ізотерм і ізогалін на розрізах поперек течії (рис.5), наявність ізольованих областей холодної води праворуч і теплої води ліворуч від струменя течії, що відповідають відокремленим меандрам.

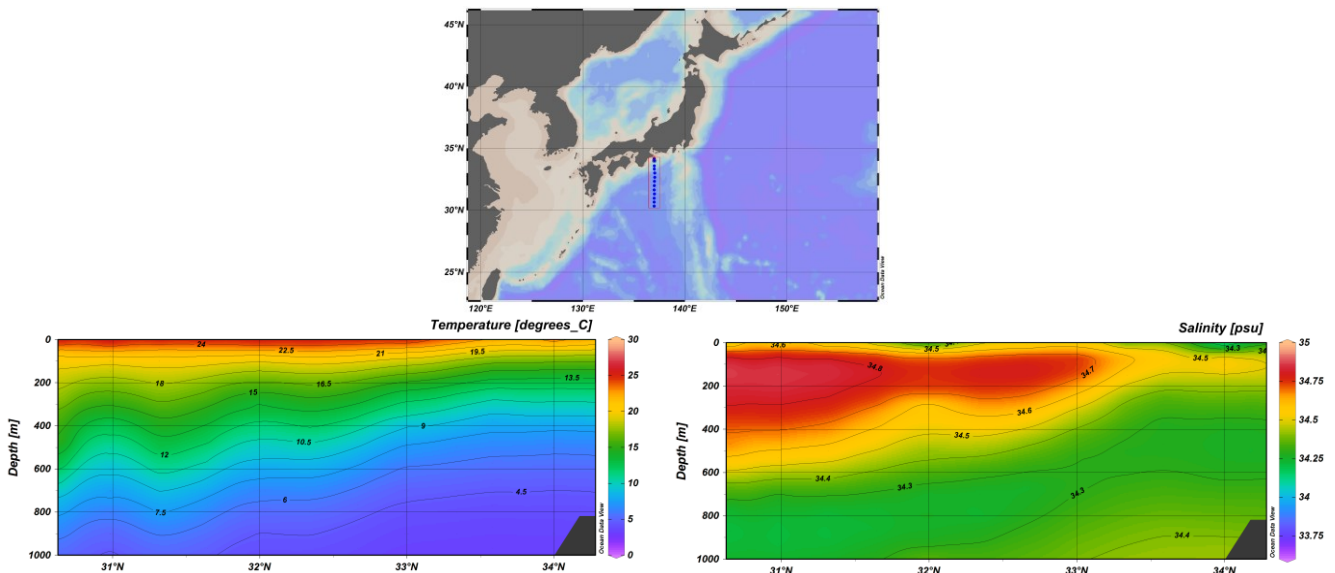


Рисунок 5 - Карта просторового розподілу температури та солоності морської води на розрізі по 137°сх.д (жовтень 2022р.)

Східніше 140° сх.д. Куросіо відходить від берегів Японії. Його струмінь розширюється, а швидкості поступово зменшуються і становлять 10–50 см/с (рис. 4). Між 148 і 154° сх.д. від Куросіо відокремлюється гілка, яка повертає на південь, а потім на південний захід і, отже, має напрямок, протилежний основному потоку Куросіо. Ця гілка має назву протитечії Куросіо. Напрямок протитечії та її положення відносно основного струменя приблизно аналогічні напрямку і положенню південної гілки Гольфстриму відносно основного струменя Гольфстриму в Атлантичному океані. Згідно з оцінкою, виконаною на основі динамічного методу, витрата води протитечії Куросіо в шарі 1500 м становить $25 \cdot 10^6$ м³/с, тобто приблизно одну третину витрати Куросіо, оскільки витрата води на розрізі 29,6–32,5° пн. ш.; 133,3–135° сх. д. становила $70 \cdot 10^6$ м³/с (рис. 2).

Висновки

1. Показано, що Куросіо є типовим прикладом західної інтенсифікації течій. Аналіз багаторічних даних свідчить про стійке існування меандрів: їх географічне положення залишається відносно

постійним, тоді як форма та конфігурація зазнають безперервних змін. На основі карт SSH та полів геострофічних швидкостей за період 2017–2023 рр. встановлено особливості розвитку події великого меандру Куросіо (LM2017), яка тривала з серпня 2017 р. та простежувалась до 2023 року в межах даного дослідження, тоді як за літературними даними тривалість LM2017 охоплює період до березня 2025 р. Виявлено, що формування LM2017 відбувалося за класичним сценарієм (зародження меандру поблизу о. Кюсю та його подальше зміщення на схід), однак мало і суттєві відмінності. Зокрема, LM2017 сформувався за умов нестабільного стану течії над хребтом Ідзу, що відрізняє його від попередніх випадків, де важливу роль відігравала стабільність потоку. При цьому ключові чинники — позитивні аномалії рівня моря на схід від Тайваню та західне поширення негативних аномалій у районі Куросіо — зберігалися. Показано, що LM2017 є найдовшою подією великого меандру з середини ХХ століття. Його тривале існування пов'язане зі зниженим транспортом течії Куросіо та підвищеною стабільністю циркуляції на схід від хребта Ідзу після 2018 року, що обмежило вплив збурень і сприяло фіксації положення меандру.

2. На основі даних натурних експедиційних досліджень температури та солоності морської води, за допомогою програми ODV, розраховано геострофічні швидкості течії Куросіо та проаналізовано її просторову структуру. Встановлено, що максимальні швидкості течії (до 200 см/с) спостерігаються в південній частині досліджуваного району, що пов'язано з проходженням основного струменя Куросіо на вході до акваторії на широті Японських островів. Для цієї області характерні значні горизонтальні градієнти температури та солоності морської води і наявність фронтальних зон, що зумовлює підвищені значення геострофічних швидкостей течії. Виявлено двоядерну структуру течії, яка проявляється у вигляді двох максимумів швидкості. Це може бути наслідком меандрування основного струменя, а також впливу підводного рельєфу, що сприяє деформації та розщепленню потоку. Показано, що результати розрахунків добре узгоджуються з супутниковими даними про розподіл рівня моря та геострофічних течій.

Отримані в роботі результати щодо просторової структури та мінливості течії Куросіо, а також розраховані поля геострофічних швидкостей на основі натурних і супутникових даних дозволяють більш детально охарактеризувати динаміку досліджуваного району. Виявлені особливості, такі як наявність зон підвищених швидкостей, фронтальних структур, двоядерної будови течії та формування протитечій, можуть бути використані для подальшого аналізу океанографічних умов у регіоні. Отримані дані мають потенційне прикладне значення, зокрема можуть бути використані для врахування океанографічних умов при плануванні маршрутів водного транспорту, оскільки просторово-часова мінливість течій суттєво впливає на швидкість руху суден, витрати пального та безпеку мореплавства. Крім того, результати можуть бути корисними для вдосконалення чисельних моделей океанічної циркуляції та подальших досліджень взаємодії течій із підводним рельєфом.

ЛІТЕРАТУРА

1. В.І. Михайлов, Н.В. Кучеренко. Спеціальні розділи фізичної океанології. Одеса: Екологія, 2011. - 238 с.
2. Hidetaka Hirata, Hatsumi Nishikawa, · Norihisa Usui, · Toru Miyama, · Shusaku Sugimoto, · Akira Kusaka, Takashi Seto. The Kuroshio large meander and its various impacts: a review./ *Journal of Oceanography* (2025) 81:165–185, p. 165-185.
3. Hirata H, Kawamura R, Kato M, Shinoda T (2018) A positive feedback process related to the rapid development of an extratropical cyclone over the Kuroshio/Kuroshio Extension. *Mon Weather Rev* 146:417–433.
4. Hirata H, Kawamura R, Nonaka M (2025) Effects of a marine heatwave associated with the Kuroshio Extension large meander on extreme precipitation in September 2023. *Sci Rep* 15:5332.
5. Copernicus Marine Service (CMEMS) [Електронний ресурс]. –<https://marine.copernicus.eu/>
6. National Centers for Environmental information [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ncei.noaa.gov/>

REFERENCES

1. V.I. Mikhailov, N.V. Kucherenko. *Special sections of physical oceanology*. Odesa: Ecology, 2011. - 238 p.
2. Hidetaka Hirata, Hatsumi Nishikawa, · Norihisa Usui, · Toru Miyama, · Shusaku Sugimoto, · Akira Kusaka, Takashi Seto. The Kuroshio large meander and its various impacts: a review./ *Journal of Oceanography* (2025) 81:165–185, p. 165-185.
3. Hirata H, Kawamura R, Kato M, Shinoda T (2018) A positive feedback process related to the rapid development of an extratropical cyclone over the Kuroshio/Kuroshio Extension. *Mon Weather Rev* 146:417–433.
4. Hirata H, Kawamura R, Nonaka M (2025) Effects of a marine heatwave associated with the Kuroshio Extension large meander on extreme precipitation in September 2023. *Sci Rep* 15:5332.
5. Copernicus Marine Service (CMEMS) [Электронний ресурс]. –<https://marine.copernicus.eu/>
6. National Centers for Environmental information [Электронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ncei.noaa.gov/>

FEATURES OF THE HYDROLOGICAL REGIME OF THE KUROSHIO CURRENT DURING THE FORMATION AND DEVELOPMENT OF THE LARGE MEANDER LM2017

The study investigates the spatio-temporal variability of the Kuroshio Current based on satellite data of sea surface height (SSH) and geostrophic velocities, as well as in situ expeditionary measurements (temperature and salinity of seawater) provided by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Along various sections in the region of the Kuroshio Current, maps of the spatial distribution of current velocities were constructed and volume transports were calculated. A double-core structure of the current was identified, which may be associated with meandering of the main flow and the influence of bottom topography. It is shown that the Kuroshio is characterized by the persistent existence of meanders whose geographical position remains relatively stable over time, while their configuration is variable. The obtained results are consistent with satellite observations and can be used for further studies of ocean circulation and applied tasks, particularly in the field of marine navigation.

Keywords: Kuroshio Current, water area, geostrophic current velocities, meanders, eddies.

Стаття прийнята 23.04.2026