

УДК 551.326.7 (292.3)

В. Мадерич*, К. Терлецька, І. Бровченко, А. Беженар

Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, просп. Акад. Глушкова, 42, м. Київ, 03187

* Corresponding author: vladmad@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ ЛІТНЬОЇ ЦИРКУЛЯЦІЇ ТА РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ І СОЛОНОСТІ ВЛІТКУ В МОРІ БЕЛЛІНСГАУЗЕНА ТА НА ШЕЛЬФІ АНТАРКТИЧНОГО ПІВОСТРОВА

РЕФЕРАТ. Метою дослідження є моделювання циркуляції та розподілу температури і солоності влітку в морі Беллінсгаузена та на шельфі Антарктичного півострова. Для моделювання застосовуються чисельні методи з використанням моделі SCHISM з неструктурованою трикутною горизонтальною сіткою та вертикальною локальною сігма-системою координат (LSC³). Для опису турбулентності використовувалась $k-k_l$ модель турбулентності. На поверхні океану задавалися потоки тепла, імпульсу та солі, які розраховувались за даними реаналізу ERA-Interim. На відкритих границях вертикальний розподіл температури і солоності задавався згідно розрахунків реаналізу HYCOM. На західній відкритій границі були також задані відхилення рівня та вертикальний розподіл швидкості, розраховані за даними HYCOM. На відкритій східній границі розрахункової області задавалися умови випромінювання. В якості початкових умов також використовувались результати реаналізу HYCOM. **Результати** моделювання полів течій, температури і солоності в період лютий-березень 2014 року порівнювались з доступними даними спостережень на шельфі Антарктичного півострова, включно з даними Української антарктичної експедиції. Розраховані вертикальні розподіли температури і солоності на шельфі узгоджуються зі спостереженнями, зокрема, в положенні та величині мінімуму температури холодного проміжного шару в районі Аргентинських островів. Розрахунки показали, що головним компонентом циркуляції є Антарктична циркумполярна течія (АЦТ), яка переносить воду на схід. У АЦТ формуються декілька струменів, які втікають в протоку Дрейка, тоді як ланцюжок вихорів розділяє шельфову зону Антарктичного півострова та АЦТ. Влітку вздовж краю шельфу виникає спрямована на південь течія, викликана, в основному, великомасштабною циркуляцією океану та полем вітру. Зроблено **висновок**, що формування зон підйому та опускання вод на шельфі Антарктичного півострова суттєво залежать від змін атмосферної циркуляції над морем Беллінсгаузена.

Ключові слова: море Беллінсгаузена, Антарктичний півострів, модель SCHISM, холодний проміжний шар.

ВСТУП

Циркуляція в Південному океані суттєво відрізняється в різних регіонах Антарктики (Rintoul et al., 2000). Особливості рельєфу дна та берегової лінії, а також наявність шельфових льодовиків впливають на особливості циркуляції. Так, в морях Росса та Ведделла існують циклонічні колообіги та витоки щільної води, охолодженої під шельфовими льодовиками. В той же час, море Беллінсгаузена та шельф Антарктичного півост-

рова відкриті для вод Антарктичної циркумполярної течії (АЦТ), яка проходить через протоку Дрейка, впливаючи на метеорологічні і океанографічні умови на шельфі Антарктичного півострова. Полярний фронт в АЦТ відокремлює холодні антарктичні води від більш теплих субантарктичних вод, що призводить до підйому глибинних вод, багатих поживними речовинами. Тому він пов'язаний також з зонами найбільшої продуктивності криля.

Сектор західної Антарктики між 90° і 60° зх. д. включає море Беллінсгаузена, західний шельф Антарктичного півострова та прилеглу частину

© В. МАДЕРИЧ, К. ТЕРЛЕЦЬКА, І. БРОВЧЕНКО,
А. БЕЖЕНАР, 2018

Південного океану з протокою Дрейка включно (рис. 1, *a*). Глибини відкритого океану змінюються в діапазоні 4000–5000 м. Континентальний шельф західної частини Антарктичного півострова (ЗАП) має ширину близько 200 км та середню глибину ~450 м, шельф у багатьох місцях перерізаний глибокими каньйонами, які досягають глибин 1500 м (рис. 1, *a*). Важливою особливістю південної частини моря і шельфу ЗАП є наявність ряду шельфових льодовиків, які заповнюють затоки та протоки між островами (Abbot, Venable, Stange, George VI, Bach, Wilkins). Але, на відміну від шельфових льодовиків морів Росса та Ведделла, води з під цих льодовиків не мають впливу на глобальний баланс абісальних вод.

Сезонні зміни температури повітря та вітру на шельфі Антарктичного півострова впливають на горизонтальний і вертикальний розподіл температури і солоності у верхньому шарі води. Австральною зимою під льодовим покривом, який займає майже увесь шельф та прилегле море Беллінсгаузена в шарі 0–100 м формується зимова вода з температурою біля точки замерзання. Австральним літом лід тане і температура води підіймається, тоді як солоність знижується за рахунок припливу прісної води в результаті танення льоду. На відміну від інших районів Антарктики в районі ЗАП немає фронту на границі шельфу, який відділяє води АЦТ від шельфових вод (Smith et al., 1999). Тому під верхнім шаром зимової і літньої води на шельфі знаходиться глибинна водна маса циркумполярної течії, яка тепліша і солоніша, ніж поверхневі води. Часто ці води мають характер інтрузій, які поширюються вглиб шельфу в зв'язку з особливостями донної топографії. Іншим важливим механізмом горизонтального переносу та перемішування на шельфі є циклонічні вихори з масштабами 100–150 км, які перемішують воду поперек шельфу (Smith et al., 1999).

Слід зазначити, що район Антарктичного шельфу є одним з найбільш вивчених районів Антарктики, що пояснюється значною кількістю антарктичних станцій і туристичною та рибпромисловою активністю. Проблема впливу до-

нної топографії шельфу Антарктичного півострова, а також регіональної циркуляції в морі Беллінсгаузена на формування вихорів та зон підйому і опускання вод на шельфі є актуальною і важливою не тільки для регіональної океанографії, але й для оцінки зон (hot spots) підвищеної біологічної продуктивності. Важливими факторами, які обумовлюють появу таких зон, в тому числі з високою концентрацією антарктичного криля, є взаємодія теплих і солоних вод АЦТ з західним шельфом Антарктичного півострова, де рельєф дна призводить до підйому вод з поживними речовинами. На західному шельфі Антарктичного півострова проводились багаторічні польові дослідження, в тому числі і на станції Академік Вернадський (Артамонов и др., 2003а,б, 2006; Булгаков и др., 1999, 2002; Неверовский и др., 2015; Украинский и др., 1998). Вони доповнювались моделюванням циркуляції на шельфі (Smith et al., 1999; Smith, Klinck, 2002; Dinniman, Klinck, 2004; Regan et al., 2018). Але важливі питання формування циркуляції на шельфі, а саме, процеси взаємодії АЦТ з водами на шельфі західної частини Антарктичного півострова, ще не досить вивчені, в тому числі, внаслідок багатомасштабності динаміки взаємодії, яка включає формування мезомасштабних вихрових структур топографічного походження. В той же час, у прогностичних розрахунках полів температури, солоності та течій для Антарктики, які проводяться в рамках глобальних моделей (напр. HYCOM, 2019; MERCATOR, 2019), найкраща роздільна здатність сітки є $1/12^\circ$. Тому важливою метою є розробка регіональної моделі, яка може бути використана для прогностичних розрахунків полів температури, солоності, течій, рівня та товщини і концентрації льоду в морі Беллінсгаузена та районі Антарктичного шельфу, та розрахунку зон підйому і опускання вод на шельфі для оцінки зон підвищеної біологічної продуктивності.

В роботі побудована та адаптована до моря Беллінсгаузена чисельна бароклінна модель циркуляції з неструктурованою сіткою із скінчених елементів на основі моделі SCHISM (Zhang et al., 2015; 2016), яка дозволяє враховувати широкий

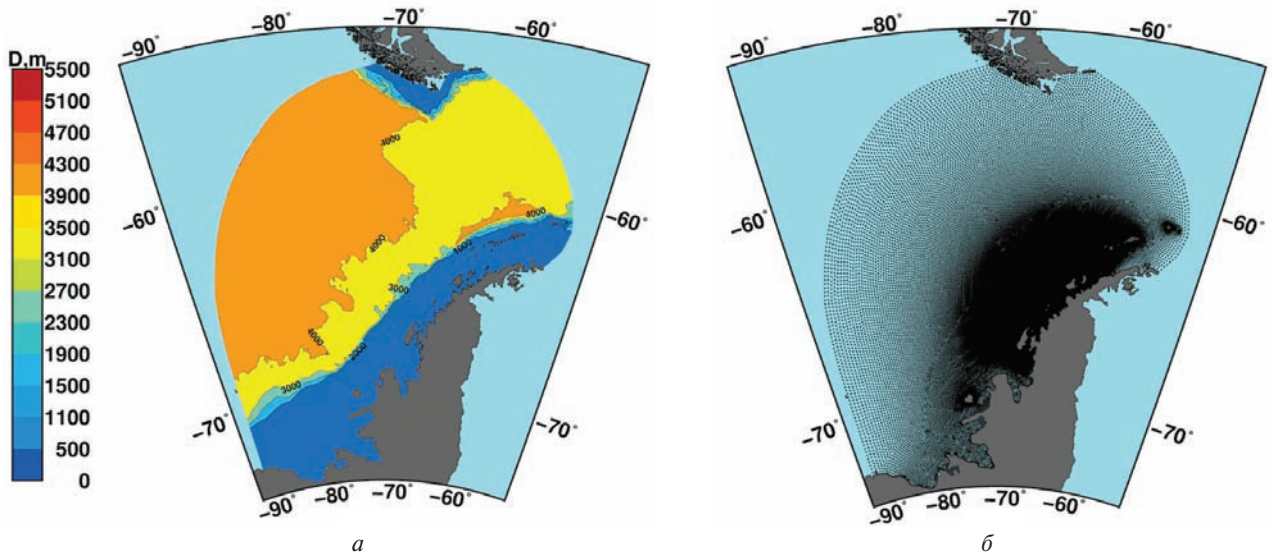


Рис. 1. Розподіл глибин у розрахунковій області в морі Беллінсгаузена згідно (GEBCO, 2019) (а); розрахункова сітка (б)
Fig. 1. Distribution of depths in the computational domain in the Bellingshausen Sea according to (GEBCO, 2019) (a); computational grid (b)

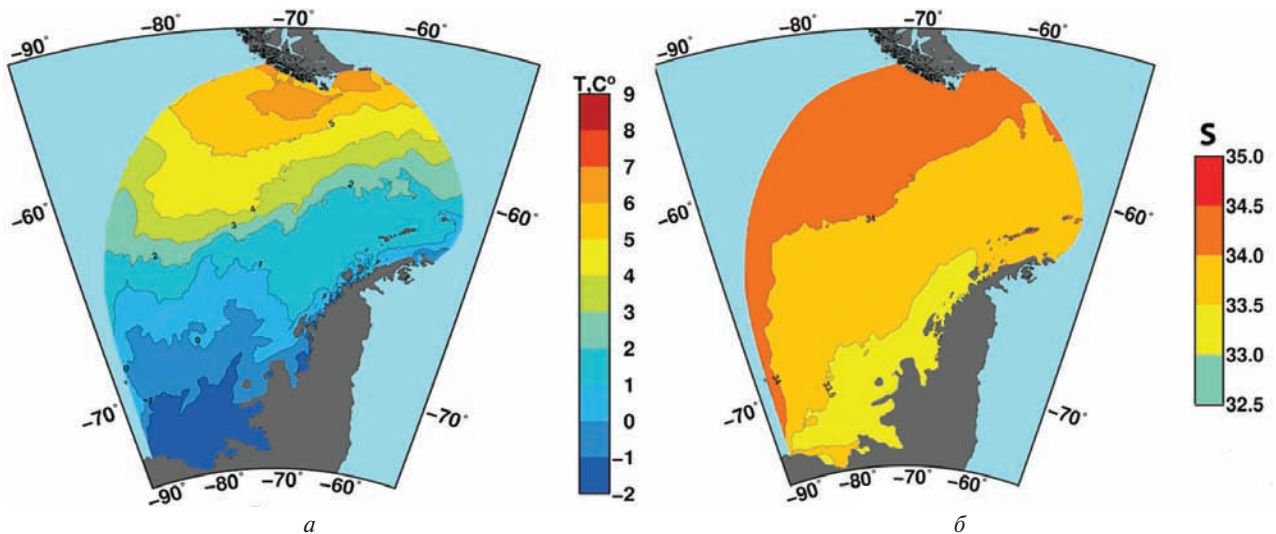


Рис. 2. Поля потенціальної температури (а) та солоності (б) на поверхні для 12:00 15 березня 2014 року
Fig. 2. Potential temperature fields (a) and salinity fields (b) on the surface for 12:00 March 15, 2014

спектр взаємодії процесів різних масштабів на шельфі Антарктичного півострова. Розраховано поля течій та завихореності у період антарктичного літа та виділено зони підйому і опускання вод на шельфі Антарктичного півострова. Про-

ведено порівняння розрахунків з доступними даними спостережень у східній частині моря Беллінсгаузена та на шельфі Антарктичного півострова, включно з даними експедицій Української антарктичної експедиції (УАЕ).

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Моделювання циркуляції у морі Беллінсгаузена проводилося за допомогою моделі SCHISM (Zhang et al., 2015; 2016). В роботі динаміка льодового покриву в моделі не враховувалась, тому що в моделі SCHISM ще немає льодової компоненти. Рівняннями моделі є осереднені по Рейнольдсу рівняння Нав'є-Стокса в наближеннях гідростатики та Бусінеска, що дозволяють розраховувати три компоненти вектора швидкості, потенціальну температуру, солоність та відхилення вільної поверхні. В SCHISM використовується змішана трикутно-чотирикутна неструктурована горизонтальна сітка та нова вертикальна система координат LSC² (Localized Sigma Coordinates, локальна сігма-координата). Вона мінімізує нахил координатних площин і в той же час описує дно без появи сходинок, характерних для так званих ζ -систем координат, а також має плавний перехід між обчислювальними комітками, як у вертикальному, так і у горизонтальному напрямках. Іншим важливим відмінностям є використання неявної схеми адвекції для транспорту другого порядку (TWD²), нової схеми адвекції для імпульсу (опціонально крігінг високого порядку з фільтром ELAD) та нової схеми горизонтальної в'язкості (включаючи бігармонічну в'язкість) для ефективного фільтрування інерційних паразитних режимів без введення надмірної дисипації.

Розрахунки полів течій, рівня моря, температури та солоності проводилися для шельфу ЗАП, моря Беллінсгаузена та прилеглої частини Південного океану (рис. 1). Розрахункова область складає 90—55° зх.д. та 53—73° пд.ш. Розподіл глибин, наведений на рис. 1, а, був побудований на розрахунковій сітці з використанням бази даних GEBCO (2019). Трикутна неструктурована розрахункова сітка складається з 89000 елементів (рис. 1, б), з максимальною роздільною здатністю 2 км навколо станції Академік Вернадський (65°14'44" пд. ш., 64°15'28" зх. д.). Як видно на рис. 1, області на півдні моря Беллінсгаузена, зайняті шельфовими льодовиками, у розрахунки не включались. По вертикалі використано 49 ос-

новних шарів. Для опису турбулентності використовувалась k - kl модель турбулентності. Коефіцієнт шорсткості задавався однорідним по області і рівним 0,0005 м.

На поверхні океану задавалися потоки тепла, імпульсу та солі, які розраховувались за даними ERA-Interim (ECMWF, 2011) реаналізу метеорологічних параметрів (температура повітря, швидкість вітру, тиск, відносна вологість, хмарність, опади). Дані аналізу були інтерпольовані для розрахункової області та змінювалися кожні 3 години. Оскільки льодовий покрив не моделювався, використовувалася найпростіша параметризація його впливу на океан: при зниженні температури води до точки замерзання температура води приймається рівною температурі в точці замерзання, а потік тепла з океану і дотичні напруження вітру вважаються нульовими.

На твердих границях потоки тепла, солі та швидкість течій відсутні. На відкритих границях вертикальний розподіл температури, солоності задавався згідно розрахунків реаналізу HYCOM (2019). На західній відкритій границі були також задані відхилення рівня та вертикальний розподіл швидкості, розраховані HYCOM. На східній границі розрахункової області задавалися умови випромінювання.

В якості початкових умов використовувалися результати реаналізу HYCOM (2019) розподілу потенціальної температури, солоності та горизонтальної швидкості. Проводився контроль кінетичної енергії з початку розрахунків, який показав, що спін-ап моделі займає декілька тижнів.

РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Циркуляція та розподіл температури і солоності влітку в морі Беллінсгаузена

Розрахунки полів течій, температури, солоності та рівня океану проводилися на період лютий-березень 2014 року. На рис. 2 та 3 наведені результати розрахунків полів температури та солоності на поверхні океану і швидкості течій на

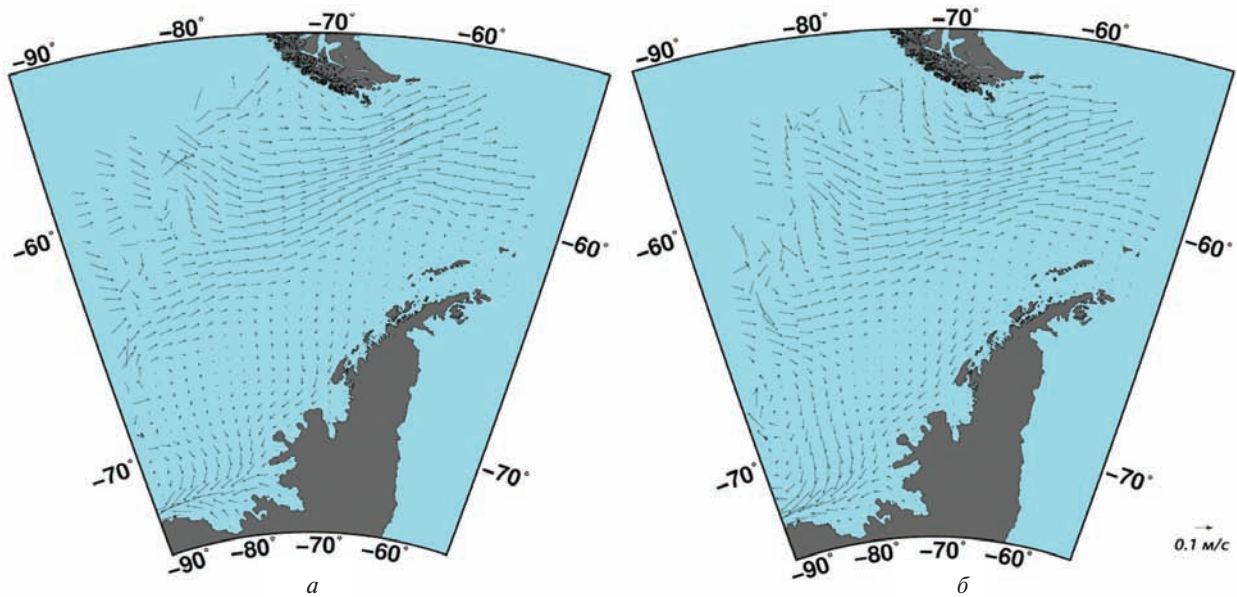


Рис. 3. Поле швидкості на глибині 50 м в 12:00 15 лютого (а) і 15 березня (б) 2014 року
 Fig. 3. The velocity field at the depth of 50 m for 12:00 February 15 (a) and March 15 (b), 2014

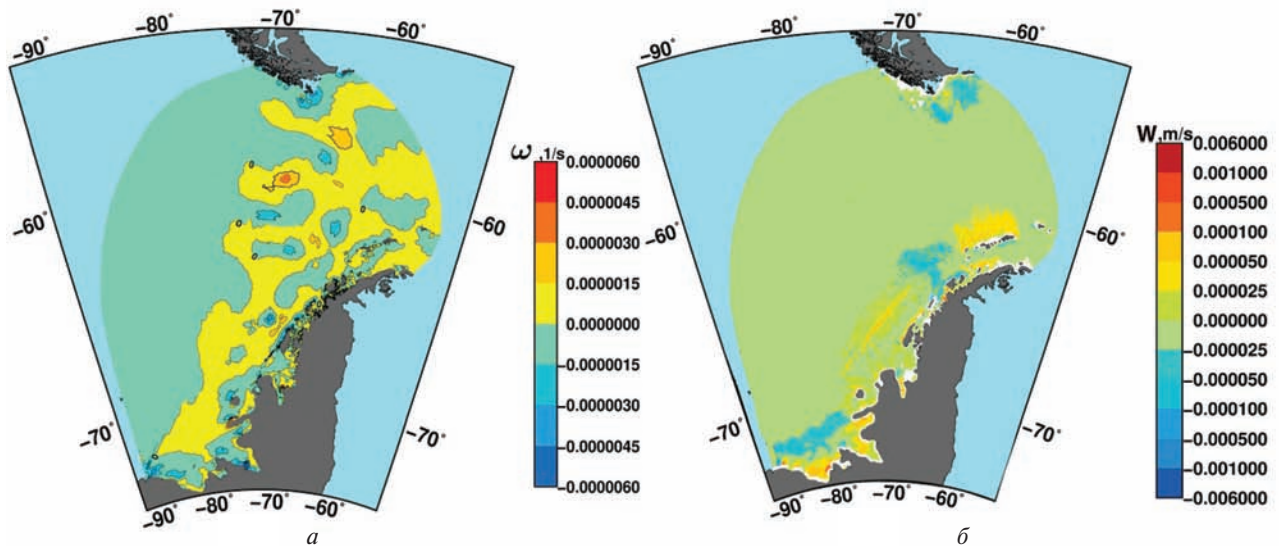


Рис. 4. Поле завихореності горизонтальних течій ω (а) та вертикальної швидкості W (б) на глибині 50 м для 12:00 15 березня 2014 року. Позитивні значення W відповідають підйому води
 Fig. 4. The vorticity field of horizontal currents (a) and vertical velocity (b) at 50 m for 12:00 March 15, 2014. Positive values of W correspond to the upwelling of water

глибині 50 м для 15 лютого та 15 березня 2014 р. Головним компонентом циркуляції є АЦТ, яка переносить воду на схід, тоді як на шельфі потік спрямований вздовж шельфу на південь.

Синоптична мінливість атмосферних процесів впливає на короткоперіодні процеси. Поля приземного тиску та швидкості вітру 15.02.14 та 15.03.14 суттєво відрізняються, що відображаєть-

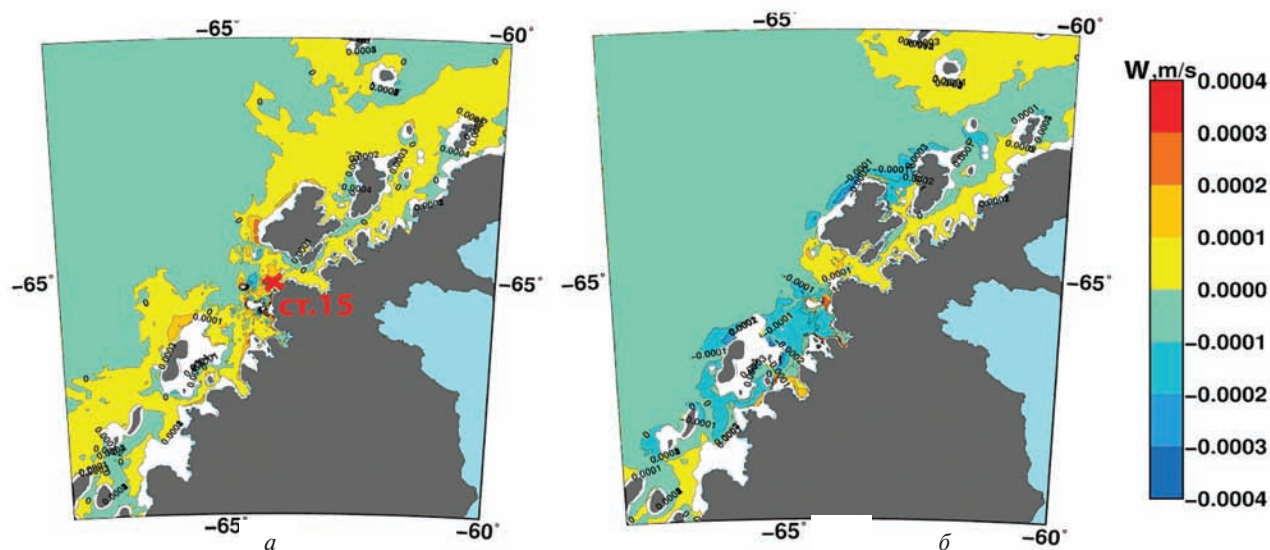


Рис. 5. Поле вертикальної швидкості води на глибині 50 м для 12:00 15 лютого (а) і 15 березня (б) 2014 року на шельфі Антарктичного півострова. На рис. 5, а показано положення ст. 15 (65°9' пд. ш. 64°8' зх. д.)

Fig. 5. Vertical velocity field at 50 m depth for 12:00 February 15 (a) and March 15 (b), 2014 on the Antarctic Peninsula shelf. Fig. 5, a shows the position of st. 15 (65°9° S 64°8° W)

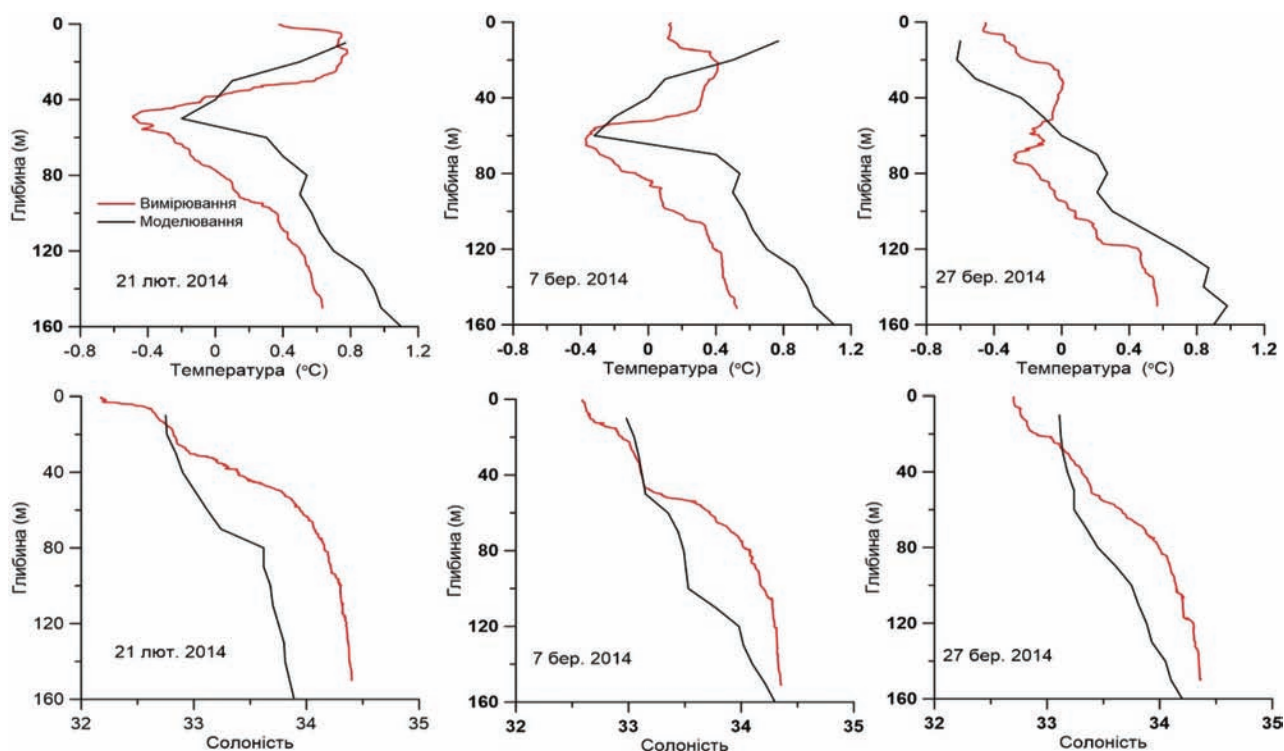


Рис. 6. Порівняння розрахунків (чорна крива) та вимірювань (червона крива) вертикального розподілу температури (а) та солоності (б) на ст. 15

Fig. 6. Comparison of calculations (black line) and measurements (red line) of vertical distribution of temperature (a) and salinity (b) on St. 15

ся на полях приповерхневих течій (рис. 3), завихореності та полях вертикальної швидкості (рис. 4).

Розрахунки показали суттєво неоднорідний характер розподілу температури на шельфі Антарктичного півострова, де на розподіл температури впливає неоднорідність температури повітря поперек шельфу (контраст океан-Антарктида). У АЦТ, як показано на розподілі швидкості (рис. 3) та завихореності (рис. 4, *a*) формуються декілька струменів, які втікають в протоку Дрейка. Ланцюжок вихорів відокремлює шельфову зону Антарктичного півострова від АЦТ (рис. 3 та 4, *a*).

Ефекти топографії дна і берегів, поряд з розподілом потоків тепла й імпульсу та їх мінливістю у часі, є важливим фактором у формуванні полів температури і солоності та процесах переносу, як на великих масштабах, так і в прибережній зоні на шельфі. В той же час слід зазначити, що в модельних розрахунках на даному етапі використовується дуже спрощене представлення процесів в океані покритому льодовим покривом. В подальшому передбачається включення динамічної-термодинамічної моделі льоду в модель SCHISM подібно моделі розробленої авторами для Арктичного басейну (Johannessen et al., 2010).

Особливості циркуляції на шельфі Антарктичного півострова

Побудована та адаптована до моря Беллінсгаузена чисельна бароклінна модель циркуляції з неструктурованою сіткою має високу роздільну здатність на шельфі Антарктичного півострова (наприклад, до 2 км в районі Аргентинських островів де знаходиться станція Академік Вернадський) і тому дозволяє враховувати широкий спектр процесів взаємодії різних масштабів. На рис. 5 наведено розраховане поле вертикальної швидкості на глибині 50 м на західному шельфі Антарктичного півострова станом на 12:00 15 лютого і 15 березня 2014 року. Зміни вітру над морем Беллінсгаузена в ці періоди часу призводять до підйому води на шельфі 15 лютого при північно-західному вітрі та її опусканню 15 березня при південно-східному вітрі.

Важливою особливістю структури вод на шельфі Антарктичного півострова та в морі Беллінсгаузена є формування на початку зимового періоду шару холодної води з від'ємною температурою, який формується за рахунок зимової конвекції. Формування цього шару закінчується при появі і наростанні льодового покриву австральною зимою. Навесні і влітку нагрівання поверхневого шару та його розпріснення ізолює холодний проміжний шар на глибині десятків метрів, таким чином, що проміжний шар існує в морі Беллінсгаузена і на його шельфі все австральне літо. Структура цього шару в районі Аргентинських островів та протоки Пенола була вперше досліджена під час 17 Антарктичної експедиції в 2012—2013 роках (Неверовский и др., 2015).

Модельні розрахунки структури полів температури і солоності в цілому узгоджуються з даними спостережень. Розраховані профілі температури і солоності на ст. 15 в точці з координатами (65°9' пд. ш. 64°8' зх. д.) в районі Аргентинських островів на рис. 6 зіставлені з вертикальним розподілом температури і солоності, побудованими за даними спостережень на цій станції під час зйомки 21 лютого, 7 березня та 27 березня 2014 р. Розрахований вертикальний розподіл температури узгоджується з спостереженнями, зокрема в положенні та величині мінімуму температури холодного проміжного шару в районі Аргентинських островів.

ВИСНОВКИ

Побудована та адаптована до моря Беллінсгаузена чисельна бароклінна модель циркуляції з неструктурованою сіткою має високу просторову роздільну здатність на шельфі Антарктичного півострова і тому дозволяє враховувати широкий спектр процесів взаємодії течій у морі та на шельфі, а також процесів формування зон підйому та опускання вод на шельфі. Проведені розрахунки полів течій, температури, солоності та рівня моря на період лютий—березень 2014 року. Модельні розрахунки структури полів температури і солоності, в цілому, узгоджуються з даними спосте-

режень. Ефекти топографії дна і берегів, поряд з розподілом потоків тепла й імпульсу від атмосфери та їх мінливістю у часі, є важливими факторами в формуванні полів температури і солоності та процесів переносу як на великих масштабах, так і в прибережній зоні на шельфі. Синоптична мінливість атмосферних процесів впливає на короткоперіодні зміни циркуляції на шельфі.

Важливим феноменом є виникнення апвелінгу на краю шельфу при північно-західному вітрі. Апвелінг є важливим джерелом поживних речовин для фітопланктону і всього харчового ланцюжка. Розраховані профілі температури і солоності в районі Аргентинських островів зіставлені з вертикальним розподілом температури і солоності побудованим за даними спостережень під час зйомки Антарктичної експедиції 2013—2014 рр. Розрахований вертикальний розподіл температури узгоджується з спостереженнями, зокрема в положенні та величині мінімуму температури холодного проміжного шару в районі Аргентинських островів. Вподальшому передбачається включення динамічної-термодинамічної моделі льоду в модель SCHISM, адаптовану до моря Беллінсгаузена.

Відомості про грантову підтримку. Робота була підтримана Державною установою Національний антарктичний науковий центр за договором № Н/4-2018 «Дослідження процесів просторово-часової мінливості течій в морі Беллінсгаузена та моделювання зон підйому та опускання вод на шельфі моря» та Корейським інститутом океанських наук та технологій (KIOST), який надав для розрахунків обчислювальний кластер.

ЛІТЕРАТУРА

1. Артамонов Ю. В., Романов А. С., Внуков Ю. Л., Перов А. А., Степура И. И. Результаты океанографических исследований в западной части пролива Брансфилда в марте 2002 года. *Украинский антарктический журнал*. 2003. № 1. С. 7—16. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/128118>
2. Артамонов Ю. В., Романов А. С., Внуков Ю. Л., Ломакин, П. Д., Перов А. А., Степура И. И. Особенности гидрологической и гидрохимической структуры вод в районе архипелага Аргентинские острова в феврале—марте 2002 г. *Украинский антарктический журнал*. 2003. № 1. С. 17—24. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/128119>
3. Артамонов Ю. В., Булгаков М. П., Ващенко В. М., Ломакин П. Д. *Океанографічні дослідження України в Атлантичному секторі Антарктики (1997–2004)*. К.: Видво «Наукова думка». 2006. 164 с.
4. Булгаков Н. П., Украинский В. В., Попов Ю. И., Ломакин, П. Д., Артамонов Ю. В. Структура и кинематика вод в районе Аргентинских островов осенью 1998 года. *Морской гидрофизический журнал*. 1999. № 5. С. 41—50.
5. Булгаков Ю. В., Ломакин Ю. И., Артамонов В. А., Кондратьев С. И., Чепыженко А. И. Структура и кинематика вод в районе архипелага Аргентинских островов в марте—апреле 2000 года. *Морской гидрофизический журнал*. 2002. № 6. С. 35—41.
6. Неверовский И. П., Попов Ю. И., Сытов В. Н., Матыгин А. С. Первое наблюдение холодного промежуточного слоя на шельфе Антарктического полуострова. *Украинский антарктический журнал*. 2015. № 14. С. 114—123. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/129688>
7. Украинский В. В., Попов Ю. И., Неверовский И. П., Балакин В. И., Ломакин П. Д., Артамонов Ю. В. Характеристика течений и вертикальная структура вод в районе островов Аргентинского архипелага по данным натурных наблюдений. *Бюл. УАИ*. 1998. № 3. С. 102—110.
8. Dinniman, M.S., Klinck, J.M. 2004. A model study of circulation and cross-shelf exchange on the west Antarctic Peninsula continental shelf. *Deep-Sea Research, II*. 51, 2003—2022.
9. European Centre for Medium-range Weather Forecast (ECMWF) 2011. The ERA-Interim reanalysis dataset, Copernicus Climate Change Service (C3S) <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/archive-datasets/reanalysis-datasets/era-interim>, (дата звернення: 10.02.2019).
10. GEBCO, General Bathymetric Chart of the Oceans, 2019. The GEBCO_2014 Grid, version 20150318, www.gebco.net (дата звернення: 10.02.2019).
11. HYCOM Ocean prediction system. 2019. <http://hycom.org/ocean-prediction> (дата звернення: 10.02.2019)
12. Johannessen, O.M., Volkov V.A., Pettersson, L.M., Madrich, V.S., Zheleznyak, M.J., Gao, Y., Bobylev, L.P., Stepanov, A.V., Neelov, I.A., Tishkov, V. Nielsen, S.P. 2010. Radioactivity and Pollution in the Nordic Seas and Arctic Region. Observations, Modelling and Simulations. Springer. Series: Springer Praxis Books, P. 408.
13. MERCATOR OCEAN, 2019. Ocean monitoring and forecasting. <http://www.mercator-ocean.fr/eng> (дата звернення: 10.02.2019)
14. Regan, H.C., Holland, P.R., Meredith, M. P., Pike, J. 2018. Sources, variability and fate of freshwater in the Bellingshausen Sea, Antarctica. *Deep Sea Research Part I*, 133, 59—71.
15. Rintoul, S., Hughes, C., Olbers, D. 2000. The Antarctic Circumpolar Current system. *Ocean Circulation and Climate*. 2003. № 1. С. 17—24. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/128119>

- mate, J. Church and J. Gould, Eds., Academic Press, 271–302.
16. Smith, D. A., Klinck, J. M. 2002. Water properties on the west Antarctic Peninsula continental shelf: A model study of effects of surface fluxes and sea ice. *Deep-Sea Research, Part II*, 49 (21), 4863–4889.
 17. Smith, D.A., Hoffmann, E.E., Klinck, J.M., Lascara, C.M. 1999. Hydrography and circulation of the west Antarctic Peninsula continental shelf. *Deep-Sea Research, Part I*, 46, 951–984.
 18. Zhang, Y. J., Ateljevich, E., Yu, H.-C., Wu, C.H., Yu, J.C.S. 2015. A new vertical coordinate system for a 3D unstructured-grid model. *Ocean Modelling*, 85, 16–31.
 19. Zhang, Y. J., Stanev, E. V., Grashorn, S. 2016. Seamless cross-scale modelling with SCHISM. *Ocean Modelling*, 102, 64–81.
- REFERENCES
1. Artamonov, Yu.V., Romanov, A., Vnukov, Yu., Perov, A., Stepura, I. 2003. Results of oceanographic studies in the western part of the Bransfield Strait in March 2002. *Ukrainian Antarctic Journal*, 1, 7–16. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/128118>.
 2. Artamonov, Yu.V., Romanov, A., Vnukov, Yu., Lomakin, P., Perov, A., Stepura, I. 2003. Features of the hydrological and hydrochemical structure of waters in the region of the archipelago of the Argentine Islands in February–March 2002. *Ukrainian Antarctic Journal*, 1, 17–24. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/128119>.
 3. Artamonov, Yu.V., Bulgakov, M.P., Vashchenko, V.M., Lomakin, P.D. 2006. Oceanographic research of Ukraine in the Atlantic sector of the Antarctic (1997–2004). K: Naukova Dumka.
 4. Bulgakov, N.P., Ukrainsky, V.V., Popov, Yu.I., Lomakin, P., Artamonov, Yu.V. 2001. Structure and kinematics of waters in the region of the Argentine Islands in the fall of 1998. *Physical Oceanography*, 11, 447–457 DOI:10.1007/BF02509710.
 5. Bulgakov, N. P., Lomakin, P. D., Artamonov, Yu. V., Kondrat'ev, S. I., Chepyzhenko, A. I. 2002. Water structure and kinematics in the region of the Argentine Islands archipelago in March–April 2000. *Physical Oceanography*, 12, 291–298.
 6. Neverovsky, I.P., Popov, Yu.I., Sytov, V.N., Matygin, A.S. 2015. The first observation of a cold intermediate layer on the shelf of the Antarctic Peninsula. *Ukrainian Antarctic Journal*, 14, 114–123. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/129688>.
 7. Ukrainsky, V.V., Popov, Y.I., Neverovsky, I.P. and others. 2000. Characteristics of currents and the vertical structure of waters in the area of the islands of the Argentine archipelago according to field observations. *Bul. UAC*, 3, 102–110.
 8. Dinniman, M.S., Klinck, J.M., 2004. A model study of circulation and cross-shelf exchange on the west Antarctic Peninsula continental shelf. *Deep-Sea Research, II*, 51, 2003–2022.
 9. European Centre for Medium-range Weather Forecast (ECMWF) 2011. The ERA-Interim reanalysis dataset, Copernicus Climate Change Service (C3S) <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/archive-datasets/reanalysis-datasets/era-interim>, (дата звернення: 10.02.2019).
 10. GEBCO, General Bathymetric Chart of the Oceans, 2019. The GEBCO_2014 Grid, version 20150318, www.gebco.net (accessed: 10.02.2019).
 11. HYCOM Ocean prediction system. 2019. <http://hycom.org/ocean-prediction> (accessed: 10.02.2019).
 12. Johannessen, O.M., Volkov V.A., Pettersson, L.M., Maderich, V.S., Zheleznyak, M.J., Gao, Y., Bobylev, L.P., Stepanov, A.V., Neelov, I.A., Tishkov, V. Nielsen, S.P. 2010. Radioactivity and Pollution in the Nordic Seas and Arctic Region. Observations, Modelling and Simulations. Springer Series: Springer Praxis Books, P. 408.
 13. MERCATOR OCEAN, 2019. Ocean monitoring and forecasting. <http://www.mercator-ocean.fr/eng> (accessed: 10.02.2019).
 14. Regan, H.C., Holland, P.R., Meredith, M. P., Pike, J. 2018. Sources, variability and fate of freshwater in the Bellingshausen Sea, Antarctica. *Deep Sea Research Part I*, 133, 59–71.
 15. Rintoul, S., Hughes, C., Olbers, D. 2000. The Antarctic Circumpolar Current system. *Ocean Circulation and Climate*, J. Church and J. Gould, Eds., Academic Press, 271–302.
 16. Smith, D. A., Klinck, J. M. 2002. Water properties on the west Antarctic Peninsula continental shelf: A model study of effects of surface fluxes and sea ice. *Deep-Sea Research, Part II*, 49, 4863–4889.
 17. Smith, D.A., Hoffmann, E.E., Klinck, J.M., Lascara, C.M.. 1999. Hydrography and circulation of the west Antarctic Peninsula continental shelf. *Deep-Sea Research, Part I*, 46, 951–984.
 18. Zhang, Y. J., Ateljevich, E., Yu, H.-C., Wu, C.H., Yu, J.C.S. 2015. A new vertical coordinate system for a 3D unstructured-grid model. *Ocean Modelling*, 85, 16–31.
 19. Zhang, Y. J., Stanev, E.V., Grashorn, S. 2016. Seamless cross-scale modelling with SCHISM. *Ocean Modelling*, 102, 64–81.

V. Maderich*, K. Terletska, I. Brovchenko, A. Bezhenar

Institute of Mathematical Machines and Systems Problems,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

* Corresponding author: vladmad@gmail.com

MODELING SUMMER CIRCULATION AND DISTRIBUTION OF TEMPERATURE
AND SALINITY IN THE BELLINGSHAUSEN SEA AND ON THE ANTARCTIC PENINSULA SHELF

ABSTRACT. The **objective** of the study is to simulate the summer circulation and the distribution of temperature and salinity in the Bellingshausen Sea and on the shelf of the Antarctic Peninsula. Numerical **methods** are used for simulation by means the SCHISM model with an unstructured triangular horizontal grid and a vertical local sigma coordinate system (LSC²). The *k-k_l* model of turbulence was used to describe turbulence. Heat, momentum and salt fluxes were set on the ocean surface, which were calculated according to the ERA-Interim reanalysis. At open boundaries, the vertical distribution of temperature and salinity was determined according to the HYCOM reanalysis calculations. On the western open border, the level deviations and the vertical velocity distribution calculated by HYCOM were also specified. At the open eastern boundary of the computational domain, the radiation conditions were specified. The results of the HYCOM reanalysis were also used as initial conditions. The **results** of modelling the current, temperature, and salinity fields in the period February–March 2014 were compared with the available observational data on the shelf of the Antarctic Peninsula, including data from the Ukrainian Antarctic expedition. The calculated vertical distributions of temperature and salinity on the shelf are consistent with observations, in particular, in the position and magnitude of the minimum temperature of the cold intermediate layer and its temperature in the region of the Argentine Islands. Calculations have shown that the main component of the circulation is the Antarctic Circumpolar Current (ACC), which carries water to the east. In ACC, several jets are formed flowing into the Drake Strait, whereas a chain of vortices separates the shelf zone of the Antarctic Peninsula and the ACC. In the summer, a current directed southwards along the edge of the shelf, caused mainly by large-scale ocean circulation and the wind field. It was **concluded** that the formation of zones of upwelling and downwelling on the shelf of the Antarctic Peninsula substantially depends on the changes in the atmospheric circulation over the Bellingshausen Sea.

Keywords: Bellingshausen Sea, Antarctic Peninsula, SCHISM model, cold intermediate layer.