

УДК 551.326.7 (292.3)

МОДЕЛЮВАННЯ РІЗНОМАСШТАБНИХ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ПРИДОННИХ І ШЕЛЬФОВИХ ВОД У ПІВДЕННІЙ ЧАСТИНІ МОРЯ ВЕДДЕЛЛА

В. С. Мадерич, К. В. Терлецька, І. О. Бровченко

Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, просп. акад. Глушкова, 42, м. Київ, 03187, vladmad@gmail.com

Реферат. Метою дослідження є чисельний аналіз впливу топографії дна на потік вод, трансформованих під шельфовим льодовиком Ронне-Фільхнера (льодовикових вод), на шельфі і на материковому схилі в морі Ведделла. Для моделювання застосовуються чисельні **методи** з використанням моделі SCHISM з неструктурованою сіткою. **Результати** моделювання показали, що під дією плавучості, сили Кориоліса та тертя у бароклінному океані потік вод з-під льодовика Ронне-Фільхнера на краю шельфу і на материковому схилі розділяється на три: один потік стікає у абісаль моря Ведделла, інший тече вздовж континентального схилу, тоді як третя, найбільша частина потоку повертає на шельф і заповнює улоговину Ронне, повертаючись під льодовик Ронне-Фільхнера. Зроблено **висновок**, що рециркуляція льодовикових вод може суттєво вплинути на оцінки продукції придонних вод у морі Ведделла.

Ключові слова: Шельфовий льодовик Ронне-Фільхнера, перелив Фільхнера, море Ведделла, модель SCHISM, рециркуляція льодовикової води.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗНОМАСШТАБНЫХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИДОННЫХ И ШЕЛЬФОВЫХ ВОД В ЮЖНОЙ ЧАСТИ МОРЯ УЭДДЕЛЛА

В. С. Мадерич, Е. В. Терлецкая, И. А. Бровченко

Інститут проблем математических машин и систем НАН Украины, г. Киев, vladmad@gmail.com

Реферат. Целью исследования является численный анализ влияния топографии дна на поток вод, трансформированных под шельфовым ледником Ронне-Фильхнера (ледниковых вод), на шельфе и на материковом склоне в море Уэдделла. Для моделирования применяются численные **методы** с использованием модели SCHISM с неструктурированной сеткой. **Результаты** моделирования показали, что под действием сил плавучести, Кориолиса и трения в бароклинном океане поток вод из-под ледника Ронне-Фильхнера на краю шельфа и материковом склоне разделяется на три. Один поток стекает в абиссаль моря Уэдделла, другой течет вдоль континентального склона, тогда как третья, самая большая часть потока поворачивает на шельф и заполняет котловину Ронне, возвращаясь под ледник Ронне-Фильхнера. Сделан **вывод**, что рециркуляция ледниковых вод может существенно повлиять на оценки продукции придонных вод в море Уэдделла.

Ключевые слова: Шельфовый ледник Ронне-Фильхнера, перелив Фильхнера, море Уэдделла, модель SCHISM, рециркуляция ледниковой воды.

MODELLING OF MULTI-SCALE PROCESSES OF FORMATION OF BOTTOM AND SHELF WATERS IN THE SOUTHERN PART OF THE WEDDELL SEA

V. Maderich, K. Terletska, I. Brovchenko

Institute of Mathematical Machines and Systems Problems, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, vladmad@gmail.com

Abstract. The main **objective** of the study is numerical analysis of the influence of the bottom topography on the flow of waters transformed under the ice shelf of Ronne-Filchner (ice waters), on the shelf and continental slope in the Weddell Sea. The numerical **methods** were applied in modeling by mean of the SCHISM model with unstructured mesh. The simulation **results** showed that under the action of buoyancy forces, Coriolis and friction in the baroclinic ocean, the flow of water from the Ronne-Filchner glacier on the edge of the shelf and the continental slope is divided into three: one branch flows into the abyssal of the Weddell Sea, the other flows along the continental shelf, while the third, the largest part of the flow, turns to the shelf and fills the Ronne depression, returning under the Ronne-Filchner glacier. We **conclude** that recirculation of the ice waters can significantly affect the evaluation of bottom water production in the Weddell Sea.

Key words: Ronne-Filchner Ice shelf, Filchner overflow, Weddell Sea, SCHISM model, recirculation of ice shelf water.

1. Вступ

Антарктична придонна водна маса (АПВ), яка займає чверть об'єму Світового океану, значною мірою живиться за рахунок глибинної води моря Ведделла (ГВВ) (Talley, 1999; Locarnini et al., 1993; Orsi et al., 1999; Nicholls et al., 2009; Huhn et al., 2008), яка формується в результаті декількох взаємодіючих механізмів конвекції: шельфової конвекції над відносно мілководним (до 500 м) шельфом в південно-західній частині моря, конвекції в ополонках прилеглих до шельфових льодовиків та трансформації шельфових вод під шельфовим льодовиком Ронне-Фільхнера на півдні моря (Fahrback et al., 1995; Foldvik et al., 2004; Darelus et al., 2014). В результаті складного гідротермодинамічного процесу трансформації шельфових вод під шельфовим льодовиком Ронне-Фільхнера формується придонна течія в низині Фільхнера. Солоні і холодні води, що мають температуру замерзання океанської води ($T = -1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$) і які утворилися в районі шельфового льодовика Ронне за рахунок конвекції в ополонці, опускаються у западину під льодовиком на глибини до 1900 м, де температура танення льоду вища, тому льодовик знизу тоне і вода стає більш прісною, потім вода повертається через льодовик Ронне-Фільхнера в протоку між островом Беркнера, піднімаючись вздовж нижньої поверхні цього льодовика, температура води стає нижчою, ніж локальна температура замерзання морської води, лід наростає, виділяється розсіл і, в кінці кінців, формується придонна водна маса, що більш холодна та більш прісна ніж та вода, що втікає (льодовикова водна маса, ЛВ). Ця водна маса потім втікає через низину Фільхнера у вигляді гравітаційної течії. Сила Коріоліса відхиляє цю течію на захід. Наявність підводних хребтів і каньйонів на материковому схилі може направити потік в глибинну частину моря Ведделла, звідки ГВВ через протоки в морі Скоша підживлює АПВ. Нові дослідження (Darelus et al., 2014) дозволили уточнити вказану схему таким чином, що потік вод в улоговині Фільхнера спочатку відхиляється на схід, та знову на північ перед витоком на континентальний схил. Важливими факторами в процесах трансформації вод можуть бути припливне і турбулентне перемішування, вітрова циркуляція в морі та сезонна поява солоних і холодних вод з заходу шельфу, сформованих за рахунок конвекції та при виділенні розсолу при замерзанні льоду (Wang et al., 2012; Darelus et al., 2016; Fer et al., 2016; Daae et al., 2017).

Механізми розповсюдження льодовикової водної маси на шельфі та на континентальному схилі Антарктиди все ще недостатньо вивчені, незважаючи на ряд натурних (Fahrback et al., 1995; Foldvik et al., 2004; Nicholls et al., 2009), лабораторних (Wählin et al., 2008) та чисельних (Wang et al., 2008, 2012; Wilchinsky & Feltham, 2009; Hasumi & Matsumura, 2010; Мадерич та ін. 2010; Darelus et al., 2014; Daae et al., 2017) досліджень останніх років. В більшості натурних досліджень та чисельних експериментів розглядалися локальні процеси в околі улоговини Фільхнера з часовими масштабами декілька місяців. Важливим, але в значній мірі недослідженим питанням, є перенос мас ЛВ по континентальному схилу периметра південно-західної частини моря Ведделла та її взаємодія з шельфовим потоком, викликаним вітровою циркуляцією і конвективними процесами на шельфі. Зовсім не досліджена можливість рециркуляції ЛВ під льодовиком Ронне-Фільхнера, що може суттєво змінити оцінки внеску витоку вод з під шельфового льодовика Ронне-Фільхнера у формування АПВ. Вказані процеси відзначаються просторовою та часовою багатомасштабністю. Вони охоплюють масштаби від десятків кілометрів, характерних для особливостей рельєфу на континентальному схилі в околі улоговини Фільхнера, до тисяч кілометрів в масштабах моря Ведделла. Крім того, по вертикалі має бути описаний відносно тонкий шар більш холодної води, яка розповсюджується біля дна. Часові масштаби процесів варіюють від масштабів діб, характерних для припливів, до десятків років, характерних для процесів розповсюдження придонних вод.

У даній роботі наведені результати чисельного дослідження впливу топографії на гравітаційні течії які викликані ЛВ у західній частині моря Ведделла на масштабі декілька років. Метою її є аналіз процесів переносу ЛВ на шельфі і континентальному схилі. Для моделювання використовується модель SCHISM (Zhang et al., 2016) з неструктурованою сіткою та узагальненою системою координат, які дозволяють моделювати різномасштабні процеси в морському басейні з локально великими кутами нахилу континентального схилу. З огляду на складність процесів трансформації вод, в роботі виділено і проаналізовано чисто гравітаційний механізм переносу водної маси, тоді як внесок конвекції на шельфі в процеси формування вод на шельфі не розглядався.

2. Методи і матеріали

Моделювання циркуляції у морі Ведделла викликаній припливом вод з льодовика Ронне-Фільхнера проводилося за допомогою моделі SCHISM (Zhang et al., 2015; 2016), що представляє собою розвинення відомої чисельної моделі SELFE (Zhang & Baptista, 2008; Roland et al., 2012). Рівняннями моделі є осереднені по Рейнольдсу рівняння Нав'є-Стокса в наближеннях гідростатики та Буссінеска, що дозволяють розраховувати три компоненти вектору швидкості, потенційну температуру, солоність та вільну поверхню. Чисельна реалізація моделі SCHISM має ряд важливих відмінностей від SELFE. В SCHISM використовується 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 z-систем координат, а також має плавний перехід між обчислювальними комірками як у вертикальному так і у горизонтальному напрямках. На відміну від SELFE в SCHISM використовується змішана трикутно-чотирикутна неструктурована горизонтальна сітка. Іншими важливими відмінностями є використання неявної схеми адвекції для транспорту другого порядку (TWD²) та нової схеми адвекції для імпульсу (опціонально крігінг високого порядку з фільтром ELAD). В SCHISM використовується нова горизонтальна схема в'язкості (включаючи бігармонічну в'язкість) для ефективного фільтрування інерційних паразитних режимів без введення надмірної дисипації.

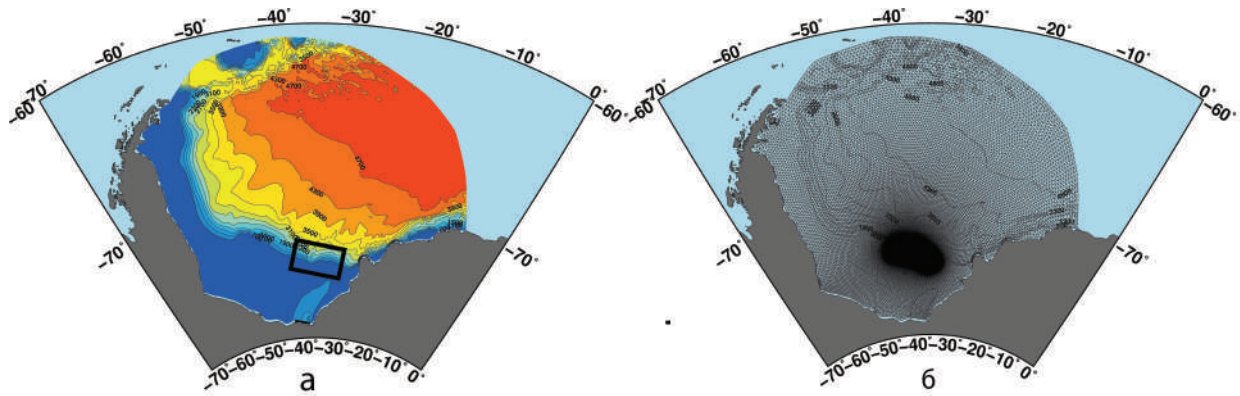


Рис. 1. Розподіл глибин у розрахунковій області в західній частині моря Ведделла згідно (GEBCO, 2003) (а); розрахункова сітка (б). На рис. 1а виділена область з підводними хребтами які направляють потік придонних вод, а також положення витоку льодовикових вод в улоговину Фільхнера.

Fig. 1. Distribution of depths in the computational domain in the western part of the Weddell Sea according to (GEBCO, 2003) (a); computational grid (b). In fig. 1a area with underwater ridges directing the flow of bottom waters is highlighted, as well as the position of the source of glacial waters in the Filchner depression.

Розрахункова область охоплює район в південній частині моря Ведделла між -61° з. д. та 10° с. д. та від -77° до -60° п. ш. (рис. 1б). Рельєф дна побудовано за даними (GEBCO, 2014). Для моделювання використовувалася неструктурована розрахункова сітка, що містить 87 610 вузлів зі згущенням сітки до приблизно 2 км в околі улоговини та хребтів. Роздільна здатність сітки біля північної границі розрахункової області складає приблизно 30 км. Шельфова зона має середню глибину 500 метрів, а максимальні глибини в морі Ведделла в межах розрахункової області сягають більше ніж 5500 м. Головною обчислювальною проблемою в розрахунковій області є наявність дуже крутих схилів у південно-західній частині моря Ведделла (більше ніж 0.1). Тому при моделюванні було використано локальну сітка-систему координат (LSC²). По вертикалі було зафіксовано 70 базових рівнів на відповідних глибинах. Для розрахунків нелінійних інерційних членів та скалярів використовувався ейлерово-лагранжевий метод, що полягає у розрахунку повної похідної шляхом інтегрування траєкторії руху (Eulerian Lagrangian Method, ELM). Для опису турбулентності використовувалась *k-k1* модель турбулентності. Коефіцієнт шорсткості задавався однорідним по області і рівним 0,0005 м.

Метою чисельних експериментів є дослідження гравітаційного механізму переносу вод з-під льодовика Ронне-Фільхнера під дією тертя та сили Коріоліса, але без впливу циркуляції в морі Ведделла викликаної вітром, ефектів конвекції, просторової та часової мінливості полів температури та солоності. Тому на поверхні океану температура і солоність були задані і таким чином присутність льодового покриву була врахована, а на дні потоки тепла і солі були відсутні. На північній відкритій границі задавалися нульове відхилення рівня моря від незбуреного стану та умови випромінювання для швидкості, температури і солоності. На південній закритій границі області горизонтальні швидкості, потоки солі і температури задані нульовими, крім витоку вод з під льодовика Фільхнера між островом Беркнера та Антарктидою (між 41° і 36° західної довготи) (рис. 1а) де задавався потік холодної (льодовикової води), більш густої води з потенційною температурою -2.05°C та солоністю 34.6 на глибинах 500-1000 м. Витрати потоку льодовикової води по різних даним оцінювались від 0.5 до 2.1 Свердрупа (1 Свердруп= $10^6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). В роботі витрата задавалась рівною 0.9 Свердрупа на глибинах нижче 500 м в смузі, яка показана на рис. 1а. Початковий постійний по всій розрахунковій області вертикальний розподіл солоності і потенційної температури показаний на рис. 2.

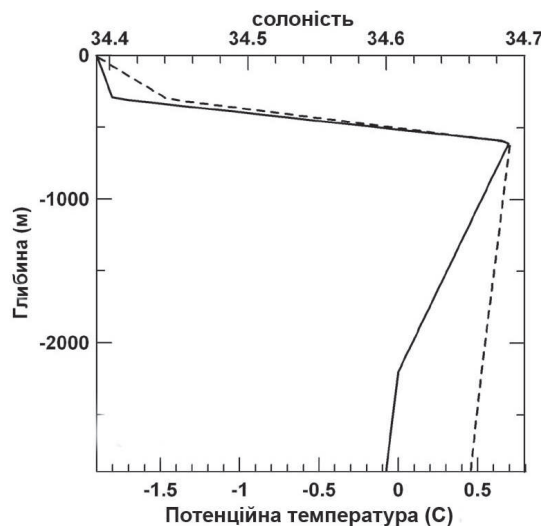


Рис.2. Початкові профілі потенційної температури і солоності побудовані за даними (Wilchinsky & Feltham, 2009).

Fig.2. Initial profiles of potential temperature and salinity based on data (Wilchinsky & Feltham, 2009).

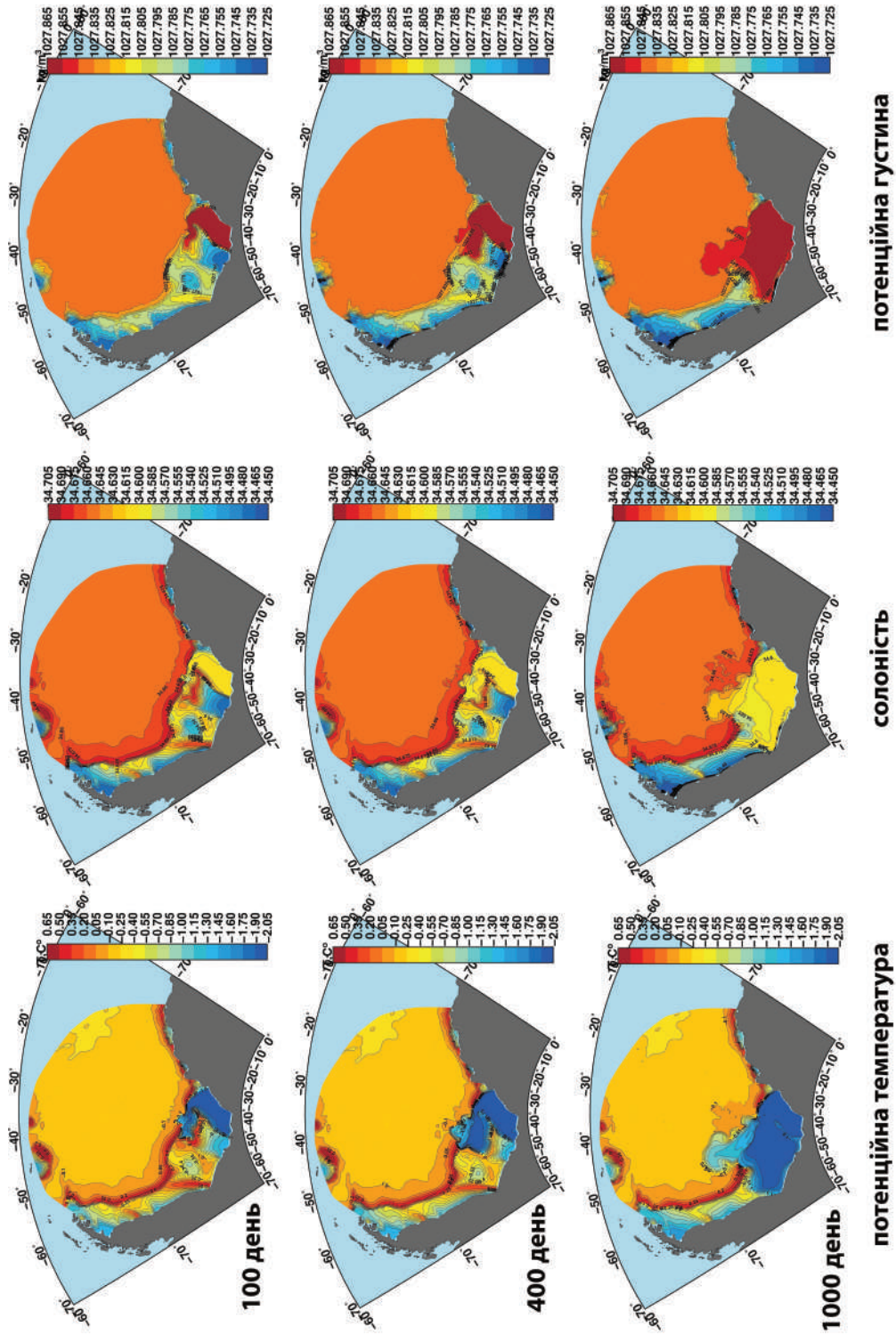


Рис. 3. Розподіл придонної потенційної температури, солоності та потенційної густини в західній частині моря Ведделла через 100, 400, 1000 діб.
 Fig. 3. Distribution of bottom potential temperature, salinity and potential density in the western part of the Weddell Sea through 100, 400, 1000 days.

3. Результати і обговорення

На рис. 3 наведені результати розрахунків придонної потенційної температури, солоності та потенційної густини через 100, 400 та 1000 діб після початку витікання придонної води з під льодовика Фільхнера. Як видно на малюнку, потік трансформованої під льодовиком Фільхнера-Ронне більш щільної води поширюється в улоговині Фільхнера під дією сил плавучості, досягаючи материкового схилу, на якому він під впливом сили Кориоліса та донного тертя розділяється на три частини. Одна частина потоку стікає в глибоку частину моря Ведделла за рахунок сил плавучості та під впливом підводних хребтів та каньйонів, інша частина слідує вздовж краю шельфу таким чином, що плавучість врівноважується силою Кориоліса, третя та нахилом топографії дна. Нарешті, третя частина потоку повертає на шельф південно-західної частини моря Ведделла під дією сили Кориоліса і з часом заповнює шельф у південній частині моря. Треба підкреслити, що в даному випадку стік води під шельфовий льодовик Ронне-Фільхнера, який ще підсилить потік вод на шельф, відсутній і, в той же час, трансформація вод за рахунок конвекції не береться до уваги. Таким чином, розрахунки, на відміну від інших робіт (Wang et al., 2008; Wilchinsky & Feltham, 2009; Nasumi & Matsumura, 2010; Мадерич та ін., 2010; Daae et al., 2017), демонструють можливість заток ЛВ в пониження рельєфу на шельфі і подальшої рециркуляції, що може суттєво змінити оцінки ефективності термодинамічного механізму формування придонних вод моря Ведделла. Але необхідні подальші чисельні експерименти з урахуванням конвекції, вітрової і термохалінної циркуляції на шельфі (Daae et al., 2017), що безумовно вплинуть на процес рециркуляції.

На рис. 4 розрахований розподіл придонних течій через 1000 діб після початку витіку порівнюється даними вимірів течій (Foldvik et al., 2004) в області виділеної чотирикутником на рис. 1а. Особливостями рельєфу дна в дані області є наявність двох підводних хребтів – східного і західного з улоговиною між ними. Згідно з розрахунками потік вод з улоговини Фільхнера витікає з улоговини в північному напрямку, потім вода повертає на захід під дією сили Кориоліса. Цей потік розділяється на дві частини. Одна частина потоку затікає на шельф і слідує вздовж ізобат на захід, а інша повертає на континентальний схил у каньйоні між двома хребтами і потім стікає в абісальну частину моря Ведделла (рис.4б). Згідно з даними спостережень (Foldvik et al., 2004) потік вод з улоговини Фільхнера розповсюджується по схилу трьома шляхами: уздовж краю шельфу; перетинаючи обидва підводних хребта; слідує вздовж східного схилу підводного хребта (рис. 4). Результати розрахунків не суперечать цій схемі, за винятком течій в околі східного хребта. Ці розрахунки також узгоджуються з результатами моделювання (Wilchinsky & Feltham, 2009), згідно з яким потік придонних вод перетинає східний хребет.

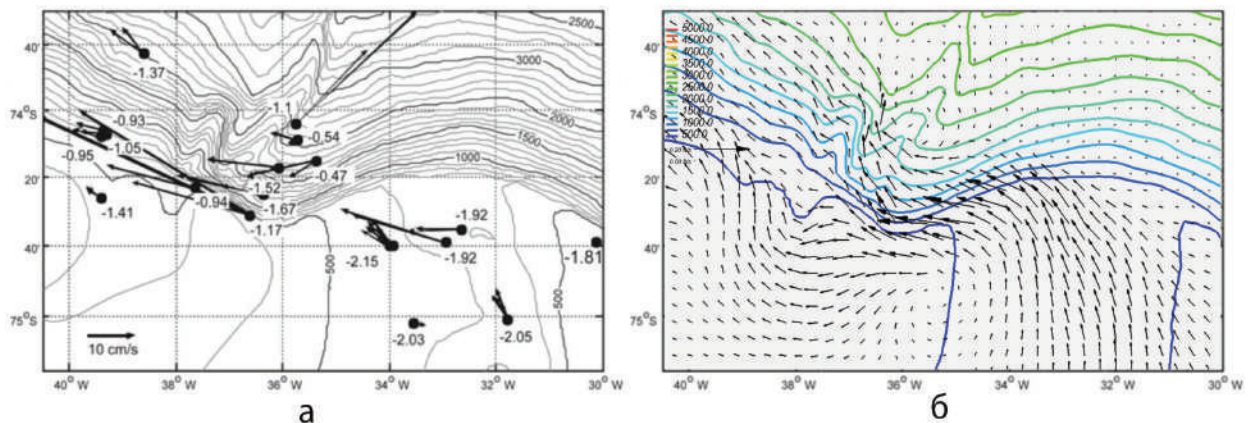


Рис. 4. Розподіл придонних течій в околі витіку вод з улоговини Фільхнера за даними вимірів (Foldvik et al., 2004) (а) та за даними розрахунку після 1000 діб з початку витіку (б). Цифри на рис. 4а означають потенційну температуру донної води.

Fig. 4. Distribution of bottom currents in the vicinity of the outflow of waters from the Filchnerdepression according to the measurements (Foldvik et al., 2004) (a) and according to the calculation after 1000 days from the beginning of the outflow (b). Numbers in Fig. 4a indicate the bottom potential temperature of water.

4. Висновки

Чисельну тривимірну бароклінну модель з неструктурованою сіткою зі скінчених елементів SCHISM імплементовано для західної частини моря Ведделла з метою аналізу впливу топографії дна на потік вод, трансформованих під шельфовим льодовиком Ронне-Фільхнера (льодовикових вод) на шельфі і материковому схилі в морі Ведделла. Неструктурована сітка дозволяє опис течій та полів температури і солоності з високою роздільною здатністю (до 2 км) у областях важливих для подальшого транспорту вод. Результати моделювання показали, що під дією плавучості, сили Кориоліса та тертя у бароклінному океані потік вод з-під льодовика Фільхнера на краю шельфу і материковому схилі розділяється на три: один потік стікає у абісаль моря Ведделла, інший тече вздовж континентального схилу, тоді як третя, найбільша частина потоку повертає на шельф і заповнює улоговину Ронне, повертаючись під льодовик Ронне. Зроблено висновок, що рециркуляція льодовикових вод може суттєво вплинути на оцінки продукції придонних вод у морі Ведделла. Надалі ці експерименти повинні бути доповнені моделюванням впливу циркуляції моря Ведделла та конвекції на шельфі на перерозподіл льодовикових вод між придонною водною масою моря Ведделла, рециркуляцією та переносом на шельфі.

5. Відомості про грантову підтримку

Робота була підтримана Державною установою Національний антарктичний науковий центр МОН України за договором №Н/1-2017 «Моделювання, формування і розповсюдження глибинних вод в морі Ведделла та дослідження впливу геомагнітної активності на атмосферні процеси тропосфери над Антарктичним півостровом» та Корейським інститутом океанських наук та технологій (KIOST), який надав для розрахунків обчислювальний кластер з 120 процесорами.

6. Література

1. Мадерич В.С., Терлецкая Е.В., Бровченко И.А., Структура и динамика гравитационных течений на склоне: поток трансформированных под ледником Ронне-Фильхнера вод в море Уэдделла. *Украинский антарктический журнал*, 2010, 9. С.263-270. URL:http://www.uac.gov.ua/custom_content_source_list/uaj/uaj9/UA-J_N_9_263-270.pdf (дата звернення: 10.02.2018).
2. Daae K., Hattermann, T., Darelus E., Fer I. 2017. On the effect of topography and wind on warm water inflow—An idealized study of the southern Weddell Sea continental shelf system. *J. Geophys. Res. Oceans*, 122, 2622–2641, DOI:10.1002/2016JC012541.
3. Darelus E., Makinson K. Daae K., Fer I., Holland P. R., Nicholls K. W. 2014. Hydrography and circulation in the Filchner Depression, Weddell Sea, Antarctica. *J. Geophys. Res. Ocean*, 119, 5797–5814, DOI:10.1002/2014JC010225.
4. Darelus E., Fer I., Nicholls K. W. 2016. Observed vulnerability of Filchner-Ronne Ice Shelf to wind-driven inflow of warm deep water. *Nature Communications*. V. 7, 12300, DOI:10.1038/ncomms12300.
5. Fahrbach E., Rohardt G., Scheele N., Schröder M., Strass V., Wisotzki A. 1995. Formation and discharge of deep and bottom water in the northwestern Weddell Sea. *J. Marine Res.*, 53, 515-538.
6. Fer I., Darelus E. Daae K. B. 2016. Observations of energetic turbulence on the Weddell Sea continental slope. *Geophys. Res. Lett.* 43, 760-766, DOI:10.1002/2015GL067349.
7. Foldvik A., Gammelsrød T., Østerhus S., Fahrbach E., Rohardt M., Schröder G., Nicholls K. W., Padman L., Woodgate R. A. 2004. Ice shelf water overflow and bottom water formation in the southern Weddell Sea. *J. Geophys. Res.*, 109, C02015, DOI:10.1029/2003JC002008.
8. GEBCO, 2014. The GEBCO_2014 Grid, version 20150318, www.gebco.net (дата звернення: 10.02.2018).
9. Hasumi H., Matsumura Y. 2010. Modeling ice shelf water overflow and bottom water formation in the southern Weddell Sea. *J. Geophys. Res.*, 115, C10033, DOI:10.1029/2009JC005841.
10. Huhn O., Hellmer H.H., Rhein M., Rodehacke C., Roether W., Schodlok M.P., Schröder M. 2008. Evidence of deep- and bottom-water formation in the western Weddell Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 55(8-9), 1098-1116.
11. Locarnini R., Whitworth III, A.T., Nowlin W. D. Jr. 1993. The importance of the Scotia Sea on the outflow of Weddell Sea Deep Water. *J. Marine Res.* 51, 135-153.
12. Maderich, V., Terletska, K., Brovchenko, I. 2010. Structure and dynamics of gravity currents on a slope: a flow of transformed under the Ronne-Filchner ice water in the Weddell Sea. *Ukrainian Antarctic Journal*, 9, 263-270.
13. Nicholls K. W., Østerhus S., Makinson K., Gammelsrød T., Fahrbach E. 2009. Ice-ocean processes over the continental shelf of the southern Weddell Sea, Antarctica: A review. *Rev. Geophys*, 47, RG3003, DOI:org/10.1029/2007RG000250.
14. Orsi A. H., Johnson G. C., Bullister J. L. 1999. Circulation, mixing and production of Antarctic Bottom Water. *Progress in Oceanography*. 43, 55–109.
15. Roland A., Zhang Y.J., Wang H.V., Meng Y, Teng Y.-C., Maderich V., Brovchenko I., Dutour-Sikiric M., Zanke U. 2012. A fully coupled 3D wave-current interaction model on unstructured grids. *Journal of Geophysical Research*, 117, C00J33, 1-18, DOI:10.1029/2012JC007952.
16. Talley, L. D. Some aspects of ocean heat transport by the shallow, intermediate and deep overturning circulations. In Clark, P. U., Webb, R. S., Keigwin, L. D. (eds) 1999. *Mechanisms of global climate change at millennial time scales*. Washington DC, American Geophysical Union, 1-22.
17. Wählin, A.K., Darelus, E., Cenedese, C., Lane-Serff, G.F. 2008. Laboratory observations of enhanced entrainment in dense overflows in the presence of submarine canyons and ridges. *Deep-Sea Research Part I*, 55, 737–750.
18. Wang Q., Danilov S., Schröter J. 2008. Bottom water formation in the southern Weddell Sea and the influence of submarine ridges: Idealized numerical simulations. *Ocean Modelling*, 28, 50–59.
19. Wang Q., Danilov S., Fahrbach E., Schröter J., Jung T. 2012. On the impact of wind forcing on the seasonal variability of Weddell Sea Bottom Water transport. *Geophys. Res. Lett.* 39, L06603, DOI:10.1029/2012GL051198.
20. Wilchinsky, A. V., Feltham, D. L. 2009. Numerical simulation of the Filchner overflow. *J. Geophys. Res.*, 114, C12012, DOI:10.1029/2008JC005013.
21. Zhang, Y.J., Baptista, A.M. 2008. SELFE: A semi-implicit Eulerian–Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. *Ocean Modelling*, 21, 71–96.
22. 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.
23. Zhang Y. J., Stanev E.V., Grashorn S. 2016. Seamless cross-scale modelling with SCHISM. *Ocean Modelling*, 102, 64-81.

7. References

1. Maderich, V., Terletska, K., Brovchenko, I. 2010. Structure and dynamics of gravity currents on a slope: a flow of transformed under the Ronne-Filchner ice water in the Weddell Sea. *Ukrainian Antarctic Journal*, 9, 263-270.
2. Daae, K., Hattermann, T., Darelus E., Fer I. 2017. On the effect of topography and wind on warm water inflow—An idealized study of the southern Weddell Sea continental shelf system. *J. Geophys. Res. Oceans*, 122, 2622–2641, DOI:10.1002/2016JC012541.
3. Darelus, E., Makinson, K. Daae, K., Fer, I., Holland, P. R., Nicholls, K. W. 2014. Hydrography and circulation in the Filchner Depression, Weddell Sea, Antarctica. *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, 5797–5814, DOI:10.1002/2014JC010225.
4. Darelus, E., Fer, I., Nicholls, K. W. 2016. Observed vulnerability of Filchner-Ronne Ice Shelf to wind-driven inflow of warm deep water. *Nature Communications*, 7, 12300, DOI:10.1038/ncomms12300.
5. Fahrbach, E., Rohardt, G., Scheele, N., Schröder, M., Strass, V., Wisotzki, A. 1995. Formation and discharge of deep and bottom water in the northwestern Weddell Sea. *J. Marine Res.*, 53, 515-538.
6. Fer, I., Darelus, E. Daae, K. B. 2016. Observations of energetic turbulence on the Weddell Sea continental slope. *Geophys. Res. Lett.*, 43, 760-766, DOI:10.1002/2015GL067349.
7. Foldvik, A., Gammelsrød, T., Østerhus, S., Fahrbach, E., Rohardt, M., Schröder, G., Nicholls, K. W., Padman L., Woodgate R. A. 2004. Ice shelf water overflow and bottom water formation in the southern Weddell Sea. *J. Geophys. Res.*, 109, C02015, DOI:10.1029/2003JC002008.
8. GEBCO, 2014. The GEBCO_2014 Grid, version 20150318, www.gebco.net (дата звернення: 10.02.2018).
9. Hasumi, H., Matsumura, Y. 2010. Modeling ice shelf water overflow and bottom water formation in the southern Weddell Sea. *J. Geophys. Res.* 115, C10033, DOI:10.1029/2009JC00584.
10. Huhn, O., Hellmer, H.H., Rhein, M., Rodehacke, C., Roether, W., Schodlok, M.P., Schröder, M. 2008. Evidence of deep- and bottom-water formation in the western Weddell Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 55(8-9), 1098-1116.
11. Locarnini, R., Whitworth, III, A.T., Nowlin, W. D. Jr. 1993. The importance of the Scotia Sea on the outflow of Weddell Sea Deep Water. *J. Marine Res.*, 51, 135-153.
12. Maderich, V., Terletska, K., Brovchenko, I. 2010. Structure and dynamics of gravity currents on a slope: a flow of transformed under the Ronne-Filchner ice water in the Weddell Sea. *Ukrainian Antarctic Journal*, 9, 263-270.
13. Nicholls, K. W., Østerhus, S., Makinson, K., Gammelsrød, T., Fahrbach, E. 2009. Ice-ocean processes over the continental shelf of the southern Weddell Sea, Antarctica: A review. *Rev. Geophys.*, 47, RG3003, DOI:org/10.1029/2007RG000250.
14. Orsi, A. H., Johnson, G. C., Bullister J. L. 1999. Circulation, mixing and production of Antarctic Bottom Water. *Progress in Oceanography*, 43, 55–109.
15. Roland, A., Zhang Y.J., Wang, H.V., Meng, Y, Teng, Y.-C., Maderich, V., Brovchenko, I., Dutour-Sikiric, M., Zanke, U. 2012. A fully coupled 3D wave-current interaction model on unstructured grids, *Journal of Geophysical Research*, 117, C00J33, 1-18, DOI:10.1029/2012JC007952.
16. Talley, L. D. Some aspects of ocean heat transport by the shallow, intermediate and deep overturning circulations. In Clark, P. U., Webb, R. S., Keigwin, L. D. (eds). 1999. *Mechanisms of global climate change at millennial time scales*. Washington DC, American Geophysical Union, 1-22.
17. Wåhlin, A.K., Darelus, E., Cenedese, C., Lane-Serff, G.F. 2008. Laboratory observations of enhanced entrainment in dense overflows in the presence of submarine canyons and ridges. *Deep-Sea Research Part I*, 55, 737–750.
18. Wang, Q., Danilov, S., Schröter, J. 2008. Bottom water formation in the southern Weddell Sea and the influence of submarine ridges: Idealized numerical simulations. *Ocean Modelling*, 28, 50–59.
19. Wang, Q., Danilov, S., Fahrbach, E., Schröter, J., Jung, T. 2012. On the impact of wind forcing on the seasonal variability of Weddell Sea Bottom Water transport. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L06603, DOI:10.1029/2012GL051198.
20. Wilchinsky, A. V., Feltham, D. L. 2009. Numerical simulation of the Filchner overflow. *J. Geophys. Res.* 114, C12012, DOI:10.1029/2008JC005013.
21. Zhang, Y.J., Baptista, A.M. 2008. SELFE: A semi-implicit Eulerian–Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. *Ocean Modelling*, 21, 71–96.
22. 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.
23. Zhang Y. J., Stanev E.V., Grashorn S. 2016. Seamless cross-scale modelling with SCHISM. *Ocean Modelling*, 102, 64-81.