

УДК 551.326.7 (292.3)

**СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ГРАВИТАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ НА СКЛОНЕ:  
ПОТОК ТРАНСФОРМИРОВАННЫХ ПОД ЛЕДНИКОМ РОННЕ-ФИЛЬХНЕРА ВОД  
В МОРЕ УЭДДЕЛЛА**

**В. Мадерич, К. Терлецкая, И. Бровченко**

*Институт проблем математических машин и систем НАН Украины, Киев, Украина  
e-mail: vladmad@gmail.com*

**Реферат.** Приведены результаты численного исследования влияния подводных хребтов на гравитационные течения на склоне лабораторного масштаба и на поток трансформированных под шельфовым ледником Ронне-Фильхнера вод в море Уэдделла. Для расчета течений лабораторного масштаба и потока морских вод над континентальным склоном использовались гидростатическая и негидростатическая версии модели POM. Рассмотрены условия вихреобразования над склоном и влияние одного или двух подводных хребтов на придонные потоки.

**Структура та динаміка гравітаційних течій на схилі: потік трансформованих під льодовиком Ронне-Фільхнера вод у морі Ведделла.** В. Мадерич, К. Терлецька, І. Бровченко  
**Реферат.** Наведено результати чисельного дослідження впливу підводних хребтів на гравітаційні течії на схилі лабораторного масштабу і на потік трансформованих під шельфовим льодовиком Ронне-Фільхнера вод у морі Ведделла. Для розрахунку течій лабораторного масштабу і потоку морських вод над континентальним схилом використовувались гідростатична і негідростатична версії моделі POM. Розглянуто умови вихоротворення над схилом і вплив одного або двох підводних хребтів на придонні потоки.

**Structure and dynamics of gravity currents on a slope: a flow of transformed under the Ronne-Filchner ice water in the Weddell Sea.** V. Maderich, K. Terletska, I. Brovchenko

**Abstract.** The results of numerical study of the influence of submarine ridges on the gravitational current on the slope of the laboratory scale and on the transformed under the Ronne-Filchner ice shelf flow of water into the Weddell Sea. For the computation of the laboratory-scale flow and of the seawater flow over the continental slope the non-hydrostatic and hydrostatic versions of the POM model were used, respectively. The processes of vortex shedding over a slope and the influence of one or two undersea ridges on the near-bottom flows were considered.

**Key words:** gravity currents on a slope, vortex shedding, POM model, non-hydrostatic model, Ronne-Filchner ice shelf, Filchner overflow, Weddell Sea.

## 1. Введение

Специфической особенностью моря Уэдделла является его вклад в формирование антарктической придонной водной массы (ААПВ). По оценке Locarnini et al. (1993), более половины ААПВ, заполняющей значительную часть абиссали Мирового океана, поступает из

этого моря. Глубинные воды моря Уэдделла (ГВУ) формируются в результате нескольких механизмов конвекции: (1) шельфовой конвекции над относительно мелководным (до 500 м) шельфом в юго-западной части моря, (2) глубоководной конвекции в полярных, (3) трансформации шельфовых вод под шельфовым ледником Ронне-Фильхнера на юге моря. В последнем случае образовавшиеся в районе шельфового ледника Ронне соленые и холодные воды, имеющие температуру замерзания океанской воды, сначала опускаются в ложбину под ледником на глубины до 1900 м, где температура таяния льда выше. Поэтому ледник снизу тает и вода становится более пресной. Затем вода возвращается через пролив между островом Беркнер и материком, поднимаясь вдоль нижней поверхности ледника Фильхнера, температура воды становится ниже, чем локальная температура замерзания морской воды, лед нарастает, выделяется рассол и, в конце концов, формируется более холодная и более пресная придонная вода, чем та, что втекает под шельфовый ледник. Эта ледниковая водная масса (ЛВ) вытекает через ложбину Фильхнера в море Уэдделла в виде придонного течения. Сила Кориолиса отклоняет это гравитационное придонное течение, движимое силами плавучести, на запад. Наличие подводных хребтов на материковом склоне может направить поток в глубинную часть моря Уэдделла, откуда ГВУ через проливы в море Скоша подпитывают ААПВ.

Механизм воздействия неоднородностей дна (каньонов и хребтов) на гравитационные потоки более плотной воды на материковом склоне Антарктиды все еще недостаточно изучен, несмотря на ряд натурных (Foldvik et al., 2004), лабораторных (Darelius, Wåhlin, 2007; Wåhlin et al., 2008) и численных (Wang et al., 2008; Wilchinsky, Feltham, 2009; Hasumi, Matsumura, 2010) исследований последних лет. Лабораторные эксперименты и наблюдения в океане показали возможность нескольких режимов гравитационных течений: ламинарный, наблюдаемый в лаборатории и для которого характерен баланс между силой плавучести, силами трения и Кориолиса; вихревой, в котором вихри с вертикальной осью развиваются за счет неустойчивости; волновой, когда в слое раздела между гравитационным потоком и окружающей средой за счет сдвиговой неустойчивости возникают волнообразные возмущения. В настоящей работе приведены результаты численного исследования влияния подводных хребтов на гравитационные течения на склоне лабораторного масштаба и на течение ЛВ вод из ложбины Фильхнера через материковый склон.

## 2. Гидродинамическая модель

Моделирование гравитационных течений проводилось с помощью POM (Princeton Ocean Model) (Mellor, 2004) и ее негидростатической версии (Kanarska, Maderich, 2003; Filatov et al., 2011). Негидростатическая модель использовалась для моделирования гравитационных течений в лабораторных масштабах. Особенностью модели POM является расщепление поля скорости на баротропную и бароклинную составляющие. Баротропная составляющая находится путем решения с малым шагом по времени (внешний шаг) проинтегрированных по глубине уравнений движения и неразрывности, а бароклинная составляющая – путем решения с большим шагом по времени (внутренний шаг) трехмерных исходных уравнений. В модели используются уравнение состояния морской воды в форме (Mellor, 1991) и обобщенная вертикальная координата (Mellor et al., 2004).

Алгоритм негидростатической модели включает четыре этапа с расщеплением по времени на каждом из этапов.

**1 этап:** расчет свободной поверхности. Вычисление свободной поверхности проводится для проинтегрированных по глубине уравнений движения с помощью явной схемы. Исходное двумерное поле скорости на каждом этапе определяется интегрированием по глубине найденного на предыдущем шаге трехмерного поля скорости.

**2 этап:** расчет гидростатических компонент поля и давления. На этом этапе трехмерные уравнения гидродинамики решаются с помощью полунейвной схемы с внутренним шагом по времени и находится промежуточное поле скорости.

**3 этап:** негидростатическое поле скорости и давления. Найденное на предыдущем этапе промежуточное поле скорости дополняется негидростатической составляющей поля скорости за счет градиента негидростатического давления таким образом, чтобы удовлетворять уравнению неразрывности. В результате задача сводится к решению уравнения Пуассона для негидростатической составляющей давления. Дискретизованная система уравнений решалась с помощью метода сопряженных градиентов. После того как найдено распределение давления, находится окончательное негидростатическое поле скорости.

**4 этап:** расчет скаляров. На этом этапе решаются уравнения для скаляров (температура, соленость). Для расчетов применялась полунейвная схема с неявным представлением вертикальной диффузии. Для аппроксимации адвективных членов уравнения использовались TVD схемы второго порядка (van Leer, 1979).

Детально численный алгоритм негидростатической модели описан в (Filatov et al., 2011).

### 3. Моделирование гравитационных течений лабораторных масштабов

#### 3.1. Постановка задачи

Для моделирования влияния подводных хребтов на склоне на гравитационные течения лабораторных масштабов (Wählin et al, 2008) использовалась негидростатическая модель. Эксперименты (Wählin et al., 2008) проводились на большой вращающейся платформе «Кориолис» в Гренобле, имеющей диаметр 13 м и вращающейся с периодом  $T = 60$  с. На платформе установлена секция размером  $8 \times 2.5$  м, дно которой образует угол  $6^\circ$  ( $s = \tan \alpha = 0.1$ ) с горизонтальным дном (рис. 1). Над наклонной плоскостью расположен горизонтальный «шельф». На склоне может быть установлен хребт треугольной формы шириной 16 и высотой 10 см. Источник более плотной по солености воды размещается на расстоянии 25 см от шельфа. Размеры отверстия источника 2.5 см  $\times$  20 см. Расход соленой воды, вытекающей из отверстия, составлял 10 литров в час, разность плотности  $\Delta \rho = 4.3 \text{ кг м}^{-3}$ .

Численное моделирование с помощью негидростатической модели выполнялось на прямоугольной сетке  $100 \times 97 \times 43$ . Кинематическая вязкость  $\nu = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$  коэффициент диффузии соли  $\chi = 10^{-8} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ . Моделирование проводилось для трех конфигураций: (а) гладкий склон; (б) склон с одним хребтом; (в) склон с двумя хребтами. Заметим, что последняя

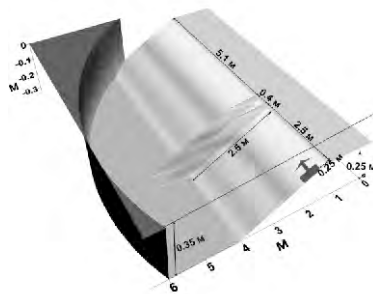


Рис. 1. Схема лабораторного эксперимента (Wählin et al., 2008). На рисунке показано наличие двух параллельных хребтов, расположенных поперек склона.

конфигурация вычислительного эксперимента не имеет аналога в лабораторных экспериментах Wåhlin et al. (2008).

Характер потока на склоне определяется следующими параметрами: уклоном дна  $s$ ; приведенным ускорением силы тяжести  $g' = g\Delta\rho/\rho_0$ , где ускорение силы тяжести  $g=9.8 \text{ м с}^{-2}$ , невозмущенная плотность воды  $\rho_0=1000 \text{ кг м}^{-3}$ ; параметром Кориолиса  $f=2\Omega=2/T$  (Lane-Serff, Baines, 2000). Из этих параметров можно составить характерные масштабы для радиуса деформации Россби  $L_R = (2Q_g'/f)^{1/4}$  и толщины слоя придонной воды  $h = (2Qf/g')^{1/2}$  (Baines, Lane-Serff, 2000). Характер течения определяется параметром  $\mu = h/\alpha L_R = 2Qf^3/g'^3)^{1/4}$  (Swaters, 1991). Для условий эксперимента параметр  $\mu \approx 1.3$  соответствует вихревому режиму. На рис. 2 приведены результаты расчетов распределения придонной солёности на гладком склоне через 30 мин. после начала работы источника солёной воды в сравнении с экспериментом Wåhlin et al. (2008). Гравитационное течение на рис. 2 сначала отклоняется вдоль склона под действием силы Кориолиса. Затем опускающееся по склону в экмановском пограничном слое объёмы более плотной воды вызывают формирование вихрей.

На рис. 3 приведено распределение завихренности течений  $\zeta = \partial v/\partial x - \partial u/\partial y$ , где  $u$  и  $v$  – составляющие скорости на оси  $x$  и  $y$ , направленные вдоль и поперек склона, соответственно. Как видно на рис. 3, формирующиеся вихри имеют циклоническую завихренность у дна и у поверхности. Возникновение и распространение вихрей приводит к эффективному перемешиванию жидкости, вытекающей из источника. Характерный период вихрей, оцененный по вариациям солёности в расчетах на расстоянии 2 м от источника на рис. 4, для условий эксперимента составляет  $T_v \approx 5$  мин.

Наличие модельного хребта, как показано на рис. 5, приводит к перенаправлению потока вод поперек склона, хотя часть воды перетекает через него и продолжает распространяться в вихревом режиме. При этом вихревая структура потока изменяется по сравнению со случаем гладкого дна. В то же время сдвиг скорости и перемешивание в струе, распространяющейся вдоль хребта, усиливается.

Два параллельных хребта также приводят к перенаправлению потока вод поперек склона (рис. 6). Два хребта эффективно блокируют распространение придонного течения вдоль склона. При этом с наветренной стороны каждого из хребтов возникает цепочка вихрей небольшого размера (рис. 6б). Этот эффект не наблюдался в расчетах и в лабораторном

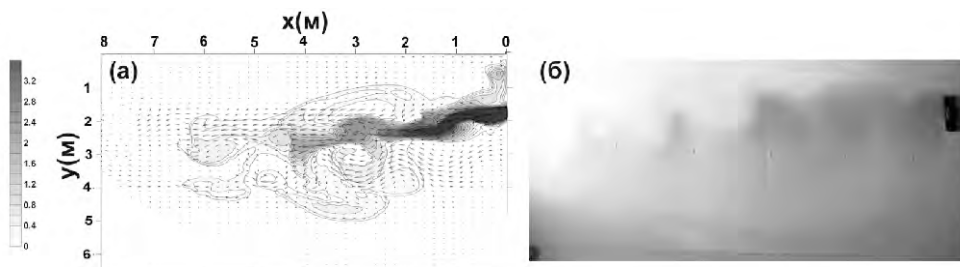


Рис. 2. Распределение придонной солёности на гладком склоне через 30 мин после начала расчетов. (а) – моделирование, (б) – эксперимент (Wåhlin et al. 2008).

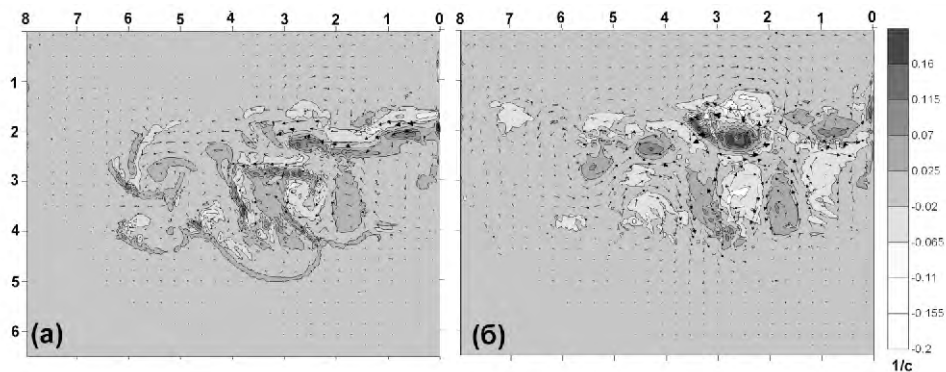


Рис. 3. Рассчитанное распределение завихренности на гладком склоне у дна (а) и на поверхности (б) .

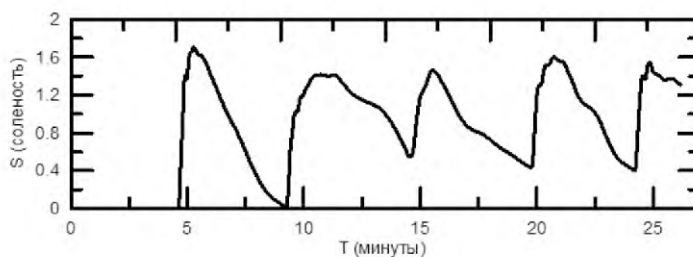


Рис. 4. Рассчитанные изменения солёности во времени на расстоянии 2 м от источника для эксперимента с гладким склоном.

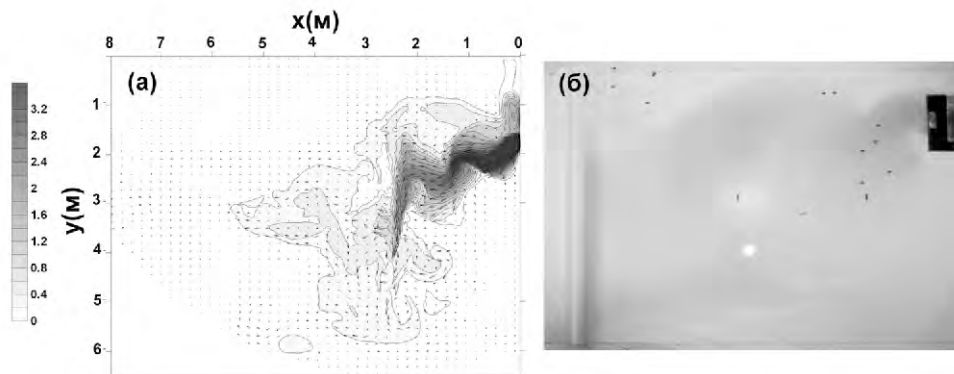


Рис. 5. Распределение придонной солёности на склоне с одним хребтом. (а) – моделирование, (б) – эксперимент (Wåhlin et al., 2008).

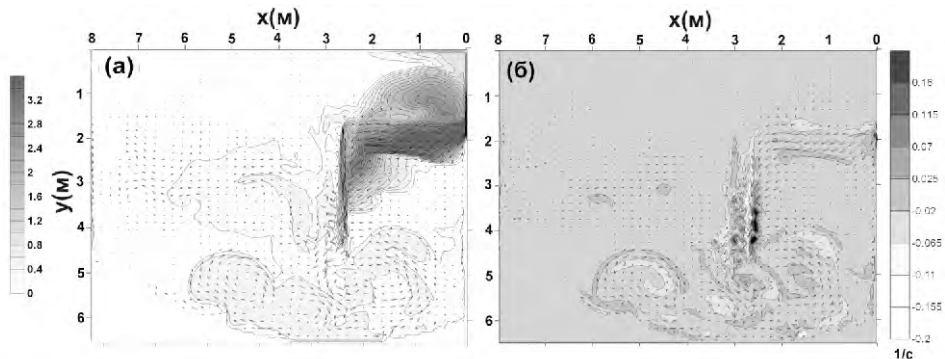


Рис. 6. Распределение придонной солености (а) и придонной завихренности (б) на склоне с двумя хребтами.

эксперименте с одним хребтом. В целом поведение потока в вихревом режиме над хребтом с характерным масштабом, много меньшим радиуса деформации, существенно отличается от распространения вихрей над дном с плавным изменением рельефа.

#### 4. Моделирование динамики и структуры потока придонной воды из ложбины Фильхнера

##### 4.1. Постановка задачи

Расчетная область охватывает район в южной части моря Уеддела между  $39^{\circ}30'$  и  $29^{\circ}30'$  з.д. и  $74^{\circ}45'$  –  $73^{\circ}30'$  ю. ш. Рельеф дна, построенный по данным (GEBCO, 2003), приведен на рис. 7а. Моделирование с помощью гидростатической версии модели ROM проводилось с использованием обобщенной вертикальной координаты и прямоугольных горизонтальных координат. Использовалась расчетная сетка  $310 \times 120 \times 41$  узлов, т.е. разрешение по вертикали и горизонтали составляло около 70 м и 1 км соответственно. Постоянные коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной вязкости равны  $0.3$  и  $10^{-4} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$  соответственно. Начальное распределение солености и потенциальной температуры в моделируемой области показано на рис. 7б. Восточная и северная границы расчетной области предполагались закрытыми. На западной открытой границе задавались условия излучения для скорости и уровня и нулевого градиента для температуры и солености. На южной границе области, между  $36^{\circ}$  и  $30^{\circ}$  западной долготы (рис. 7а), задавался поток холодной, более плотной воды с потенциальной температурой  $-2.05^{\circ}\text{C}$  и соленостью 34.6. Расход более плотной воды задавался равным 2.1 Свердруп на глубинах ниже 400 м в полосе, показанной на рис. 7а.

##### 4.2. Результаты расчетов

На рис. 8 приведены концентрация пассивного трассера на дне и придонная потенциальная температура через 14, 24 и 28 суток после начала растекания придонной воды из ложбины Фильхнера. Согласно данным наблюдений (Foldvik et al., 2004), поток вод из ложбины Фильхнера распространяется по склону тремя путями: вдоль края шельфа (FO1); пересекая оба подводных хребта (FO2); следуя вдоль восточного склона подводного хребта (FO3). Результаты расчетов не противоречат этой схеме. Действительно, часть потока направлена вниз вдоль хребта, тогда как остальной поток распределен между течением вдоль изобаты 1500 м и течением вдоль края шельфа. Следует отметить, что несмотря на недостаточное вертикальное разрешение, расчеты качественно правильно описывают траектории вод, поступающих из ложбины Фильхнера.

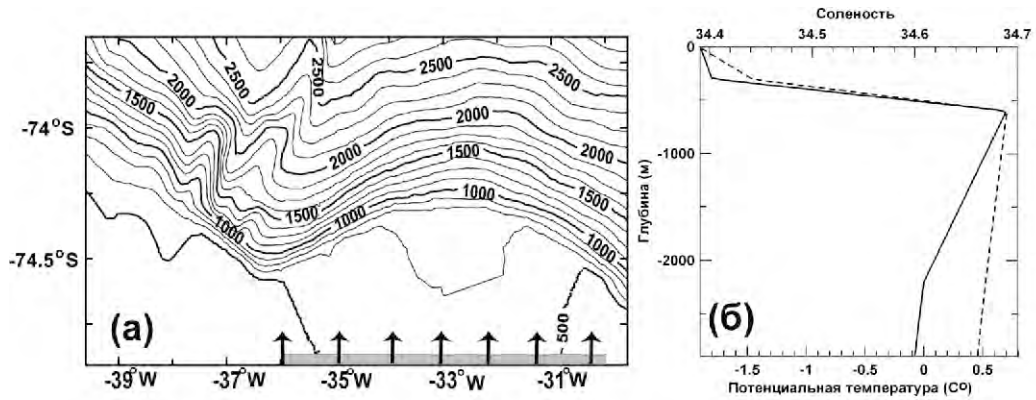


Рис. 7. Рельеф дна в области моделирования (GEBCO, 2003) (а) и начальные профили потенциальной температуры и солёности, построенные по данным (Foldvik et al., 2004), (б).

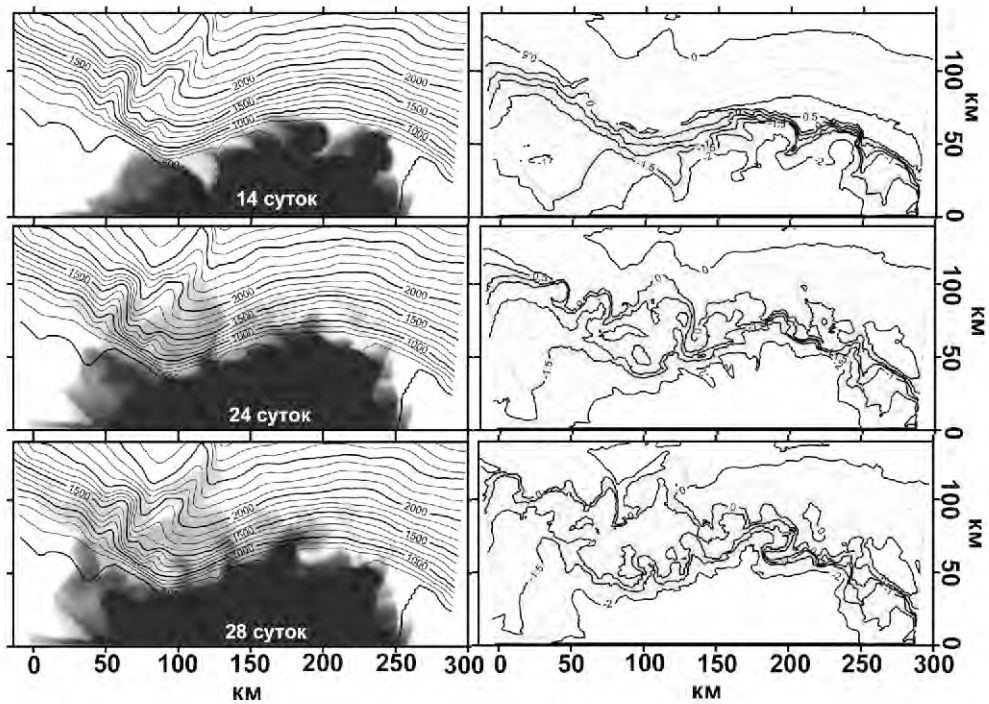


Рис. 8. Концентрация пассивного трассера на дне (а) и придонная потенциальная температура через 14, 24 и 28 суток после начала растекания придонной воды из ложбины Фильхнера.

## 5. Заключение

Результаты численного исследования влияния подводных хребтов на гравитационные течения на склоне лабораторного масштаба и на поток трансформированных под ледником Ронне-Фильхнера вод в море Уэдделла показали наличие заметного эффекта подводных хребтов в направлении придонных потоков поперек склона. В то же время интенсификация этого потока в окрестности хребта увеличивает перемешивание опускающихся вод.

## Литература

**Darelius E., Wåhlin A.K.** Downward flow of dense water leaning on a submarine ridge // *Deep-Sea Res. I.* – 2007. – 54. – P. 1173–1188.

**Filatov N., Hutter K., Maderich V. et al.** Strongly nonlinear internal waves in lakes: generation, transformation and meromixis. Springer. Series: Advances in Geophys. and Env. Mech. 2011.

**Foldvik A., Gammelsrød T., Østerhus S. et al.** Formation and discharge of deep and bottom water in the northwestern Weddell Sea // *J. Mar. Res.* – 1995. – 53. – P. 515–538.

**GEBCO.** GEBCO DIGITAL ATLAS. // Centenary Edition. CD-ROM. British Oceanographic Data Centre, – 2003.

**Hasumi H., Matsumura Y.** Modeling ice shelf water overflow and bottom water formation in the southern Weddell Sea // *J. Geophys. Res.* – 2010. – 115. – C10033, doi:10.1029/2009JC005841.

**Kanarska Y., Maderich V.** A non-hydrostatic numerical model for calculating of free-surface stratified flows // *Ocean Dynamics.* – 2003. – 51. – P. 176–185.

**Lane-Serff G.F., Baines P.G.** Eddy formation by overflows in stratified water. *J. Phys. Oceanogr.* – 2000. – 30. – P. 327–337.

**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. Mar. Res.* – 51. – P. 135–153.

**Mellor G.L.** An equation of state for numerical models of ocean and estuaries // *J. Atmos. Ocean. Tech.* – 8. – P. 609–613.

**Mellor G.L.** Users' guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton University (2004). 42 pp.

**Mellor G.L., Hakkinen S., Ezer T. et al.** A generalization of a sigma coordinate ocean model and an intercomparison of model vertical grids. In: Pinardi N., Woods J.D. (eds.), *Ocean Forecasting: Conceptual Basis and Applications.* – 2002. – Springer, Berlin.

**Swaters G.E.** On the baroclinic instability of cold-core coupled density fronts on a sloping continental shelf // *J. Fluid Mech.* – 1991. – 224. – P. 361–382.

**van Leer B.** Toward the ultimate conservative difference scheme. V: A second order sequel to Godunov's method // *J. Comput. Phys.* – 1979. – 32. – P. 101–136.

**Wang Q., Danilov S., Schröter J.** Bottom water formation in the southern Weddell Sea and the influence of submarine ridges: Idealized numerical simulations // *Ocean Modelling.* – 2008. – 28. – P. 50–59.

**Wåhlin A.K., Darelius E., Cenedese C. et al.** Laboratory observations of enhanced entrainment in dense overflows in the presence of submarine canyons and ridges // *Deep Sea Res. I.* – 2008. – 55. – P. 737–750.

**Wilchinsky A. V., Feltham D. L.** Numerical simulation of the Filchner overflow, *J. Geophys. Res.* – 2009. – 114. – C12012, doi:10.1029/2008JC005013.