

## ОКЕАНОЛОГИЯ

*В.А. Царев, М.В. Шаратунова*

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИДОННЫХ ВОД  
В ОБЛАСТИ ЗАПРИПАЙНОЙ ПОЛЫНИИ**

*V.A. Tsarev, M.V. Sharatunova*

**FEATURES OF BOTTOM WATER FORMATION  
IN A FLAW POLYNYA**

*С помощью численного моделирования анализируются формирования придонной воды за счет интенсивного ледообразования в области заприпайной полыни. Исследование проводится на мелководной области моря Бофорта к западу от пролива в залив Амундсена. Используется трехмерная нестационарная гидростатическая модель. Начальное распределение солёности принимается однородным. Приток соли задается в виде однородно распределенного в по глубине источника. Показано, что с течением времени под влиянием экмановских процессов происходит расширение придонной линзы у дна. Под влиянием наклона дна формируется перемещение придонной воды преимущественно вдоль изобат. На участке расположения пролива происходит поворот траектории перемещения придонной воды в сторону залива Амундсена, что может явиться одним из источников образования придонных вод в заливе.*

*Работа выполнялась в рамках международного научного проекта «Изучение системы арктических полыней», руководитель проф. Барбер Д. (Канада).*

*Ключевые слова: заприпайная полыня, придонная вода, море Бофорта, залив Амундсена.*

*The formation of bottom water due to intensive ice formation in the flaw polynya is investigated by numerical simulation. Research is conducted for the shallow area of the Beaufort Sea to the west of the Strait of the Amundsen Gulf. Three-dimensional time-dependent hydrostatic model is used. The initial salinity distribution is taken uniform. The salt influx is specified as a homogeneously distributed in the depth source. It is shown that with time a bottom lens is enlarged at the bottom under the influence of Ekman processes. Under the influence of a bottom inclination the movement of the bottom water is formed primarily along the isobaths. On a site of the strait location trajectory of the bottom water is rotated in the Amundsen Gulf side, which may be one of the sources for the formation of bottom waters in the Gulf.*

*The work was performed under the international research project "Circumpolar flaw lead system study," head prof. D. Barber (Canada).*

*Key words: Flaw polynya, bottom water, the Beaufort Sea, the Amundsen Gulf.*

В морях Арктического бассейна под влиянием ветра систематически возникают обширные области чистой воды между припаем и плавучим ледяным покровом [1, 2, 3, 4, 5], называемые заприпайными полынями. Их ширина мо-

жет достигать более ста километров, а протяженность – сотни километров. В зимний период в заприпайных полыньях из-за интенсивного ледообразования формируется значительный приток соли. На мелководных участках некоторых морей с относительно однородным вертикальным распределением плотности воды это приводит к формированию придонной воды повышенной солености. Попадая на наклонное дно, придонная вода под влиянием силы тяжести может перемещаться вдоль наклонного дна на значительное расстояние и опускаться на глубину, большую глубины ее образования. В данной работе указанный процесс рассматривается на примере мелководного участка моря Бофорта, расположенного к западу от пролива в залив Амундсена. В течение зимнего периода в выбранной области достаточно близко к береговой черте систематически образуются протяженные (более 100 км) и относительно узкие (около 10 км) полыньи. К моменту проявления конвективных процессов в полынье вертикальная плотностная стратификация в области полыньи становится однородной. Распределение глубины в этой области характеризуется ее плавным увеличением с расстоянием от берега, что прерывается вдающимся в берег глубоководным проливом в залив Амундсена, как видно на рис. 1.

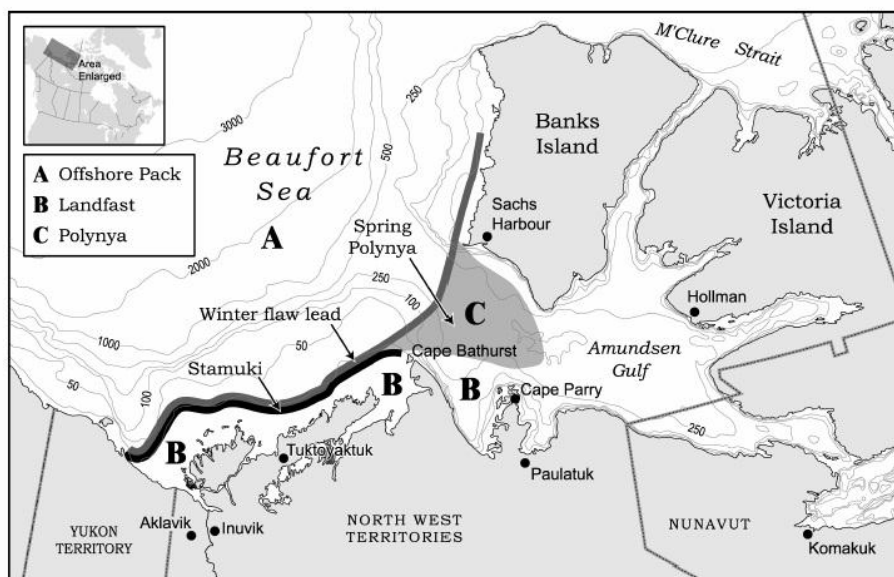


Рис. 1. Расположение расчетной области (показано точками) [6]

Процесс формирования придонной воды повышенной плотности и ее перемещение вдоль дна исследуется с помощью численной модели, включающей следующие уравнения.

Нестационарные трехмерные уравнения движения:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv - k_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - k_l \nabla_l^2 u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_0^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz',$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu - k_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - k_l \nabla_l^2 v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_0^z \frac{\partial \rho}{\partial y} dz' \quad (2)$$

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (3)$$

Уравнение переноса соли:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) S = \frac{F_s}{H} + k_z \frac{\partial S}{\partial z} + k_l \nabla_l S. \quad (4)$$

Уравнение состояния, в котором учитывается зависимость плотности воды лишь от ее солёности:

$$\rho = \rho_0 + \alpha_s S, \quad (5)$$

где  $u, v, w$  – составляющие скорости течений вдоль осей  $x, y, z$ , соответственно;  $f$  – параметр Кориолиса;  $\xi$  – возмущение уровня свободной поверхности;  $\rho, \rho_0$  – плотность и стандартная плотность морской воды соответственно;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $S$  – солёность;  $k_z, k_l$  – вертикальный и горизонтальный коэффициенты турбулентной диффузии и вязкости;  $\alpha_s$  – коэффициент халинного сжатия;  $\nabla_l^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ ;  $F_s$  – интенсивность притока соли.

Процесс формирования придонных вод в области заприпайной полыньи исследовался на примере области расположения заприпайной полыньи в мелководной прибрежной зоне моря Бофота. В рассматриваемом районе, расположенном к западу от залива Амундсена, по направлению к морю, глубина возрастала в среднем от 20 до 80 м, что видно из рис. 2. У правой боковой границы глубина в том же направлении увеличивалась с 200 до 250 м, что связано с расположением здесь пролива в залив Амундсена.

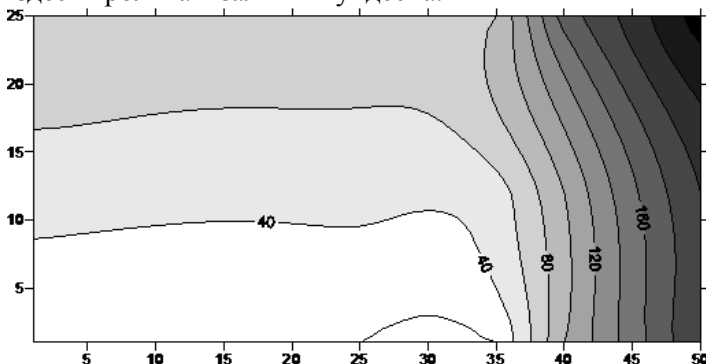


Рис. 2. Распределение глубины моря в области моделирования (м)

Расчетная область имела горизонтальные размеры 150×75 км. На поверхности области задавалось расположение полыньи размером 50×15 км, расположенной вдоль береговой боковой границы на расстоянии от нее в 20 км. Приток

соли  $F_s$  задавался равным величине, соответствующей потоку соли, выделяющемуся при нарастании ледяного покрова со скоростью  $3 \text{ см с}^{-1}$ . Для остальной части расчетной области приток соли считался равным нулю.

Граничные условия на свободной поверхности,  $z = 0$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial s}{\partial z} = 0, \quad (7)$$

$$w = -\frac{\partial \xi}{\partial t}. \quad (8)$$

Граничные условия на дне,  $z = H$

$$u = 0, \quad v = 0, \quad w = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial s}{\partial z} = 0. \quad (10)$$

Все боковые границы рассматривались как открытые. В этом случае горизонтальный поток соли, направленный по нормали к боковой границе, принимался равным нулю:

$$\frac{\partial s}{\partial n} = 0, \quad (11)$$

где  $n$  – нормаль к боковой границе.

В качестве начального условия задавалось однородное распределение солености 33 ‰.

Для волновых возмущений уровня принималось условие свободного излучения:

$$Un = \xi \sqrt{\frac{g}{H}}, \quad (12)$$

где

$$U = i \frac{1}{H} \int_0^H u dz + j \frac{1}{H} \int_0^H v dz. \quad (13)$$

Для входящих в модель коэффициентов задавались следующие значения:  $k_z = 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ ,  $k_l = 100 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ ,  $f = 14 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ ,  $\alpha_s = 8 \cdot 10^{-4} \text{ кг м}^{-3} \text{ ‰}^{-1}$ .

Возмущения уровня рассчитывались из уравнений движения и неразрывности, проинтегрированных по глубине, которые затем решались с помощью методов конечных разностей по явной схеме. Вертикальное распределение горизонтальных составляющих скорости течений рассчитывались из уравнений движения, которые также решались методами конечных разностей по явной схеме. Вертикальная составляющая скорости находилась из уравнения неразрывности. При решении исходные уравнения преобразовывались путем замены

вертикальной координаты  $z$  на  $\sigma = \frac{z}{H}$ . Использовалась смещенная сеточная область с квадратными ячейками со стороной 3 км. По вертикали шаг ячейки составил 0,025 от глубины.

По результатам расчетов под влиянием притока соли на начальном этапе под полынью формируется область повышенной солености, в горизонтальной плоскости близко соответствующая форме полыньи. Из-за однородного распределения по вертикали интенсивности притока соли формирующееся вертикальное распределение солености вначале также однородно. Повышение солености вызывает формирование отрицательного возмущения уровня над линзой, что вызывает образование поверхностных течений, имеющих циклонический характер и направленных по контуру полыньи. С глубиной из-за роста влияния бароклинной составляющей горизонтального градиента давления происходит изменение направления течений на противоположное. В результате придонные течения имеют антициклонический характер (рис. 3).

Под влиянием придонного трения у дна формируется экмановский поток, направленный в сторону от центра линзы. Под влиянием придонных экмановских потоков отмечается растекание плотностной линзы у дна. В результате в области линзы образуется неоднородность в вертикальном распределении солености, что видно на рис. 4.

Из-за наклона дна в формирующемся распределении поля солености образуется соответствующий наклон изохалин, что приводит к формированию направленного вдоль наклона дна градиента солености, что вызывает движение линзы вдоль изобат (рис. 4).

В результате придонная вода выходит за область полыньи и движется преимущественно вдоль изобат (рис. 5).

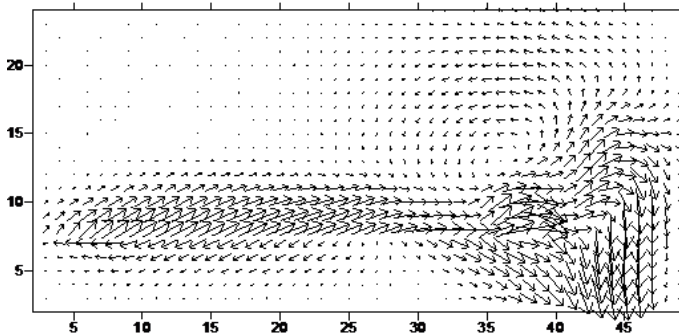


Рис. 3. Рассчитанная на 25-е сутки скорость придонных течений (максимальная скорость течений равна  $10^{-1} \text{ мс}^{-1}$ )

При достижении у правого края расчетной области участка с резким увеличением глубины, соответствующего положению пролива в залив Амундсена, происходит отклонение направления движения на  $90^\circ$  вправо, в результате чего вода начинает перемещаться внутрь залива. Результаты моделирования позволяют предположить, что в течение зимнего периода на мелководье моря Бофорта в придонном слое образуется значительный объем вод повышенной солености, часть которой переносится в залив Амундсена.

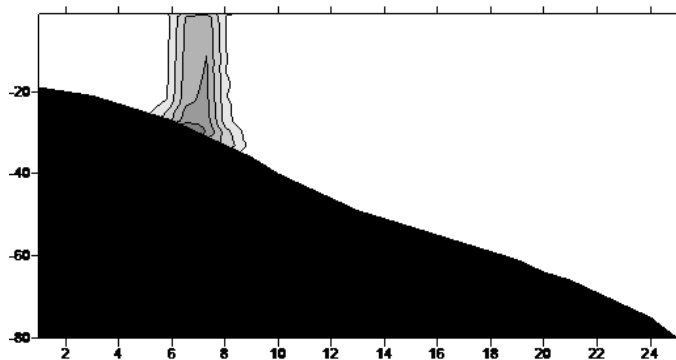


Рис. 4. Рассчитанная на 25-е сутки соленость на сечении АВ

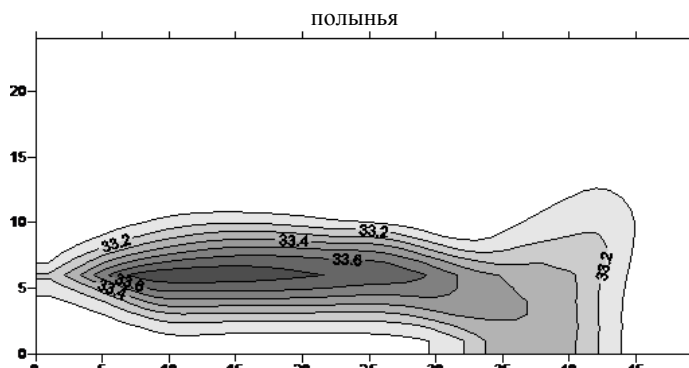


Рис. 5. Придонная соленость воды (%), рассчитанная на 25-е сутки

### **Литература**

1. Головин Н.П. Термохалинная изменчивость и гравитационные течения конвективной природы в районе существования заприпайных полыней в море Лаптевых // *Океанология*, 2002, п. 43, № 2, с. 174-186.
2. Каган Б.А., Романенков Д.А., Софьина Е.В. Модельная оценка приливного леодообмена между Центральной Арктикой и Сибирским континентальным шельфом // *Уч. зап. РГГМУ*, 2008, № 8, с. 110-113.
3. Попов А.В., Карелин И.Д., Рубчя А.В. Роль заприпайных полыней в формировании ледовых и гидрометеорологических условий в морях Сибирского шельфа в летний период // *Метеорология и гидрология*, 2007, № 9, с. 65-73.
4. Cavalieri D, Martin S. The contribution of Alaskan, Siberian and Canadian coastal polynyas to cold halocline layer of Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.*, 1994, Vol. 99, p. 18343-18362.
5. Winsor P., Bjork G. Polynya activity in the Arctic Ocean from 1958 to 1997 // *J. Geophys. Res.*, 2000, vol. 105, P. 8789-8803.
6. Mundy, C.J. and Barber, D.G. On the relationship between spatial patterns of sea ice type and the mechanisms which create and maintain the North Water (NOW) polynya // *Atmosphere-Oceans*, 2001, vol. 39, P. 327-341.

Работа выполнялась в рамках международного научного проекта «Изучение системы арктических полыней», руководитель – проф. Барбер Д. (Канада).