

А.А. Слепышев, Л.Д. Пухтяр

Характеристики захваченных топографических волн в северо-западной части Черного моря

Исследовались захваченные бароклинные топографические волны на северо-западном шельфе Черного моря при реальных уклонах дна и стратификации. Определены временные масштабы захваченных волн, рассчитаны пространственные масштабы и вертикальное распределение амплитуды колебаний, которое качественно соответствует экспериментально наблюдаемому. Энергия захваченных наклонным дном топографических волн сконцентрирована в придонном слое, что соответствует данным измерений.

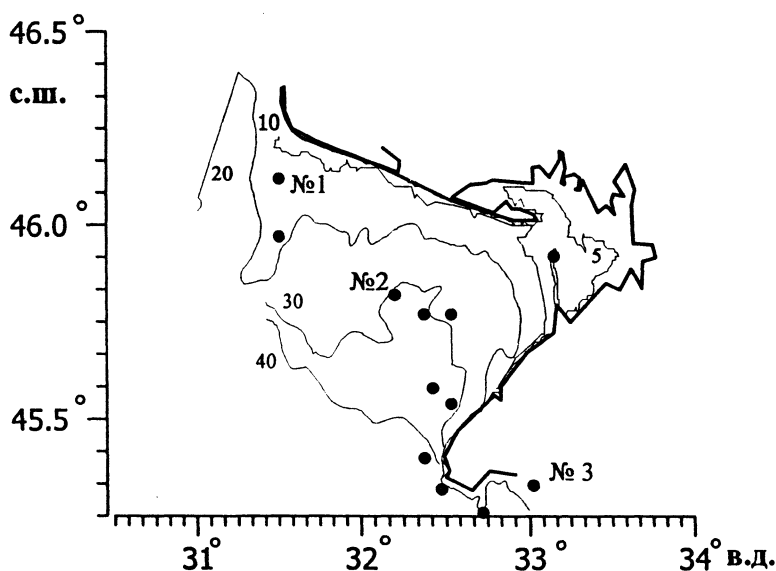
Введение. Исследование динамических процессов в придонном слое моря имеет актуальное значение в связи с освоением ресурсов шельфа: разведкой и добычей полезных ископаемых, строительством буровых платформ, донных транспортных магистралей и трубопроводов. Важный вклад в динамику придонного слоя вносят волновые процессы на шельфе. Влияние поверхностных волн проявляется до глубин, составляющих половину длины волны, на больших глубинах преобладает влияние внутренних и топографических волн. Баротропные топографические волны, типа захваченных берегом шельфовых и волн Кельвина, достаточно хорошо изучены [1 – 3]. Исследование бароклинных топографических волн сталкивается с трудностями разделения горизонтальной и вертикальной структур движений из-за наклона дна [4 – 7]. При малом наклоне дна возможно разделение на моды колебаний при условии учета наклона дна в граничном условии [7, 8]. Энергия бароклинных топографических волн в коротковолновом приближении в стратифицированном море сконцентрирована у дна, т.е. волны захватываются дном [7, 8].

Физической причиной существования захваченных придонных волн является взаимодействие гравитации и сил плавучести, с одной стороны, неоднородности рельефа дна и вращения Земли — с другой. Топографические волны играют важную роль в общем энергетическом балансе движений вод на шельфе, так как шельф и континентальный склон образуют естественный волновод для этих волн. Наблюдение захваченных топографических волн затруднено сложностью проведения измерений в придонном слое, однако имеются, едва ли не единичные, случаи регистрации этих волн, в частности на шельфе Перуанского побережья [5].

Захваченные топографические волны, рассматриваемые в работе в [5], наблюдались по данным измерителей скорости течения, в настоящей же работе бароклинные топографические волны регистрировались по временной изменчивости изолиний температуры, солёности, условной плотности в различных точках полигона измерений. Выявлено, что энергия этих колебаний в основном сосредоточена в придонном слое; это дало возможность рассматри-

вать их как проявление захваченных наклонным дном бароклинных топографических волн, энергия которых сконцентрирована у дна. Делается оценка периода колебаний, рассчитываются пространственный масштаб и вертикальная структура захваченных топографических волн. Ранее захваченные наклонным дном топографические волны в этом регионе не регистрировались.

Используемые материалы. Выполним расчеты захваченных топографических волн на основе реальных уклонов дна по данным временных измерений на полигоне температуры, солености, условной плотности морской воды из банка данных МГИ НАН Украины. Схема расположения гидрологических станций, регистрирующих временную изменчивость солености S и температуры T морской воды за период с 1957 по 1985 гг. показана на рис. 1. Эти данные представляют собой записи температуры и солености морской воды на отдельных горизонтах от поверхности до дна, с дискретностью по глубине 2,5 м, по времени 3 ч, продолжительностью до 4 сут. На некоторых станциях проводились серии зондирований с интервалом 2 – 3 ч гидрологическим зондом ИСТОК, продолжительность каждой серии до 4 сут.

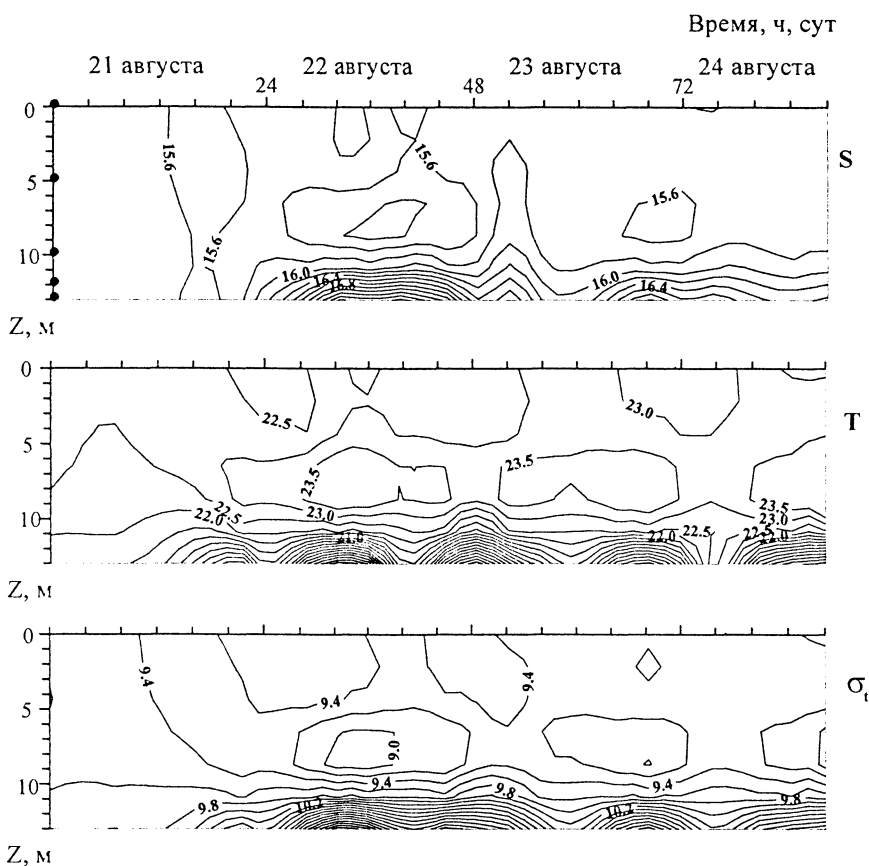


Р и с. 1. Схема расположения гидрологических станций на полигоне измерений (цифры — глубины изобат, м; №1, 2... — точки измерений)

Исследования пространственно-временных изменений изолиний температуры, солености и соответствующей им условной плотности σ_t , выполненные в ряде точек полигона измерений (рис. 1), выявили существование в отдельных точках (№ 1 – 3) наиболее значительных волновых колебаний.

Примеры таких волновых колебаний можно видеть по временной изменчивости T , S , σ_t у западной окрестности Тендровской косы 21 – 24.08.1969 г. в точке № 1 (рис. 2) и в центральной части полигона 15 – 19.07.1983 г. в точке № 2 (рис. 3). Эти колебания наиболее интенсивно проявляли себя в придонном слое, затухая с приближением к поверхности моря. Период таких коле-

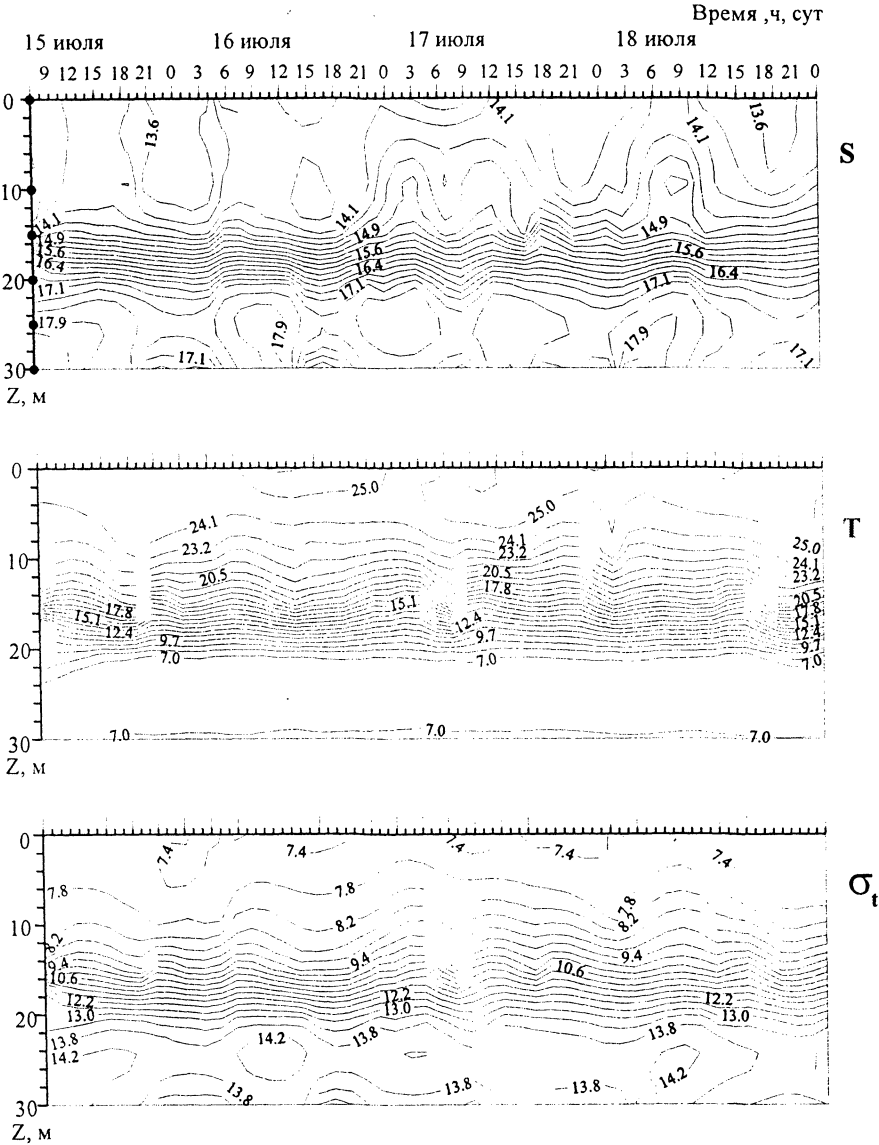
баний составлял 15 – 18 ч, амплитуда 1 – 2 м. Колебания регистрировались как по обоим параметрам S , T (рис. 2), так и по одному из них — по S (рис. 3). Максимальные локальные уклоны дна в точках, где регистрировались и где не наблюдались колебания, значительно не отличались и составляли $(6,7 - 6,83) \cdot 10^{-4}$. Максимальный уклон на акватории северо-западной части Черного моря с горизонтальным масштабом в несколько длин топографических волн составлял $1,9 \cdot 10^{-3}$ с азимутом наклона 225° . Направления локальных наклонов в точках наблюдений отличались. Так, в точке № 1 азимут направления наклона имел 148° , в точках № 2 и 3 — 225° . Глубины в точках № 1 – 3 составляли 16, 32, 15 м соответственно. Наиболее интенсивные волновые колебания наблюдались в точке № 1, а наименее интенсивные — в точке № 3 (рис. 1).



Р и с. 2. Временная изменчивость изолиний солёности S (‰), температуры T ($^\circ\text{C}$) и условной плотности σ_t в западной окрестности Тендровской косы 21 – 24.08.1969 г. в точке № 1

Можно предположить, что указанные колебания обусловлены захваченными топографическими волнами, которые генерируются течением при существовании наклона дна. Наиболее заметно проявляют себя эти волны там, где наблюдаются более значительные скорости течения, обусловленные ветровой деятельностью, и регистрируется поступление распресненных вод, соз-

дающее значительную плотностную стратификацию (точка № 1, рис. 1). Течение и стратификация ослабевают с увеличением глубин (точки № 2 и 3), что приводит там к уменьшению интенсивности генерации внутриволнового движения.



Р и с. 3. Временная изменчивость изолиний солёности S (‰), температуры T (°C) и условной плотности σ_t в центральной части полигона 15 – 19.07.1983 г. в точке № 2

Постановка и решение задачи. Рассматриваются свободные захваченные наклонным дном топографические волны. Уравнение потенциального вихря для функции тока ψ в стратифицированном море в квазигеострофи-

ческом приближении и при пренебрежении β -эффектом в линейном случае имеет вид [8, 9]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{f^2}{N^2} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right] = 0, \quad (1)$$

здесь $N = N(z)$ — частота Вайсяля — Брента, x, y, z — декартовы координаты с началом координат на дне моря, ось x направлена на восток, ось y — на север, ось z — вверх, f — параметр Кориолиса.

Горизонтальные компоненты скорости выражаются через функцию тока ψ :

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (2)$$

Граничные условия в приближении «твердой крышки» на поверхности моря и наклонном плоском дне имеют вид [8, 9]:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial z \partial t} = 0 \quad \text{при } z = H, \quad (3)$$

$$\frac{f}{N^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z \partial t} = \gamma \frac{\partial \psi}{\partial y} - \alpha \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad \text{при } z = 0, \quad (4)$$

где $\gamma = \frac{\partial h}{\partial x}$, $\alpha = \frac{\partial h}{\partial y}$ — уклоны дна в направлении осей x и y соответственно.

Решения уравнения (1) ищем в виде плоской волны:

$$\psi = \text{Re}(e^{i(kx + ly - \omega t)}) \Phi(z), \quad (5)$$

здесь k, l — компоненты горизонтального волнового вектора, ω — частота волны.

Подстановка (5) сводит уравнения (1) – (4) к следующей задаче для $\Phi(z)$:

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{f^2}{N^2} \frac{d\Phi}{dz} \right) - (k^2 + l^2) \Phi = 0, \quad (6)$$

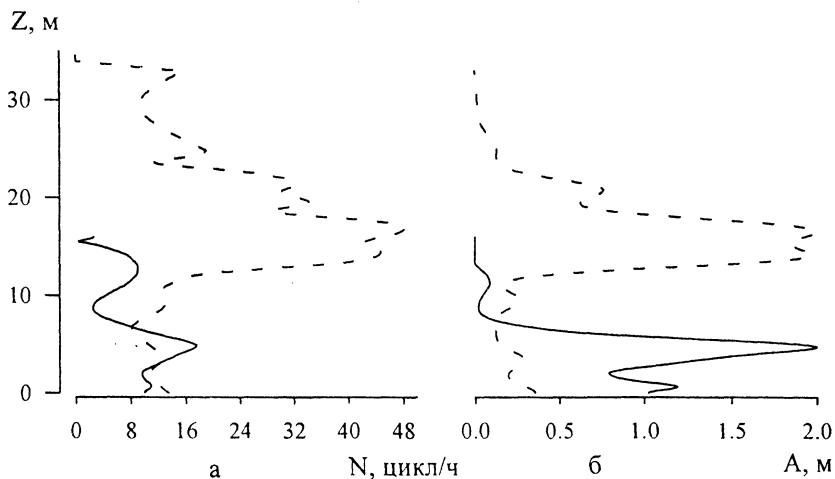
$$\frac{d\Phi}{dz} = 0 \quad \text{при } z = H, \quad (7)$$

$$\frac{f\omega}{N^2} \frac{d\Phi}{dz} = (\alpha k - \gamma l) \Phi \quad \text{при } z = 0. \quad (8)$$

Нетривиальные решения краевой задачи (6) – (8) находим численно по неявной схеме Адамса третьего порядка точности. Собственное значение, вели-

чину квадрата горизонтального волнового вектора определяем методом пристрелки.

Результаты расчетов. Расчеты вертикальной структуры захваченной наклонным дном моды топографических волн проводились для двух точек с уклонами дна $\alpha = 1,9 \cdot 10^{-3}$, $\gamma = 1,04 \cdot 10^{-5}$ (точка № 1), и $\alpha = 1,99 \cdot 10^{-3}$, $\gamma = 1,15 \cdot 10^{-3}$ (точка № 2). Невозмущенные профили частоты Вайсяля — Брента показаны на рис. 4, а, штриховой линией для точки № 2, сплошной — для точки № 1.



Р и с. 4. Зависимости от глубины: а — частоты Вайсяля — Брента; б — амплитуды A вертикальных смещений захваченных топографических волн (для пятнадцатичасового периода волны в точке № 1 — сплошная линия, для восемнадцатичасового периода в точке № 2 — штриховая)

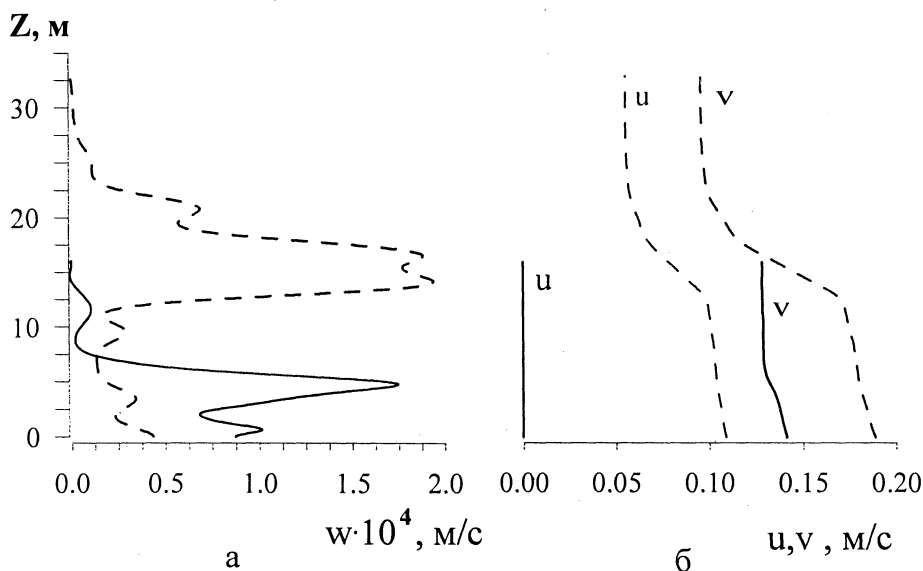
Рассчитанные зависимости амплитуды A вертикальных смещений от глубины для захваченных топографических волн приводятся на рис. 4, б, (сплошная линия — для пятнадцатичасового периода волны в точке № 1, штриховая — для восемнадцатичасового периода в точке № 2). Амплитуда

вертикальных смещений пропорциональна $\frac{d\Phi}{dz}$. Нормировка собственной

функции производилась таким образом, чтобы амплитуда вертикальных смещений имела максимальное значение, равное 2 м, т. е. соответствовала оценке, сделанной в результате анализа временной изменчивости изолиний плотности, полученных в ходе экспериментов 21 – 24.08.1969 г. и 15 – 19.07.1983 г. (рис. 2, 3). Из рис. 4 можно видеть, что максимум вертикальных смещений соответствует слоям с максимальными значениями частоты Вайсяля — Брента. В точке № 1 он расположен на глубине 11 м, а в точке № 2 — на глубине 16 м.

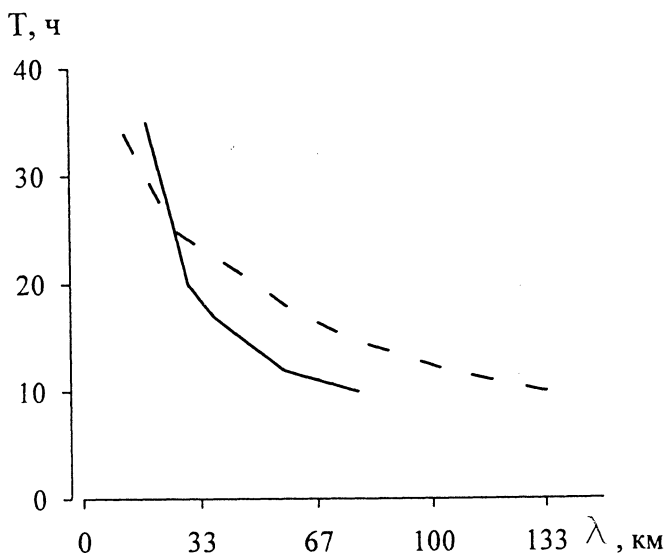
Из рассмотрения положения максимума собственных функций $\Phi(z)$ следует, что он находится в придонном слое, т. е. кинетическая энергия волн сконцентрирована у дна, в то время как максимум вертикальных смещений

отмечается в слоях с максимальными значениями частоты Вайсяля — Брента (рис. 4), что соответствует реально наблюдаемой картине (рис. 2, 3). На рис. 5 показаны вертикальные профили амплитуд горизонтальных (меридиональной u и зональной v) и вертикальной (w) компонент волновых скоростей пятнадцатичасовых колебаний в точке № 1 и восемнадцатичасовых — в точке № 2. Амплитуды вертикальных скоростей достигают максимальных значений в окрестности максимумов частоты Вайсяля — Брента, а амплитуды горизонтальных — убывают с удалением от дна, причем на более мелкой воде (точка № 1) слабее, чем на более глубокой (точка № 2). На меньшей глубине волны по свойствам приближаются к баротропным. Волновой вектор захваченной моды направлен вдоль изобат, причем более мелкая вода при распространении волны расположена справа. Таким образом, в точке № 1 волновая фазовая скорость топографических волн направлена на запад, а в точке № 2 — на северо-запад.



Р и с. 5. Вертикальные профили амплитуд вертикальной w (а) и горизонтальных (меридиональной u и зональной v) компонент волновых скоростей пятнадцатичасовых (сплошная линия) и восемнадцатичасовых (штриховая) колебаний

Рассчитанные длины и фазовые скорости захваченных топографических волн составили в точке № 1 для пятнадцатичасового периода 44,9 км и 0,83 м/с, в точке № 2 для восемнадцатичасового периода — 57,9 км и 0,9 м/с. Дисперсионные кривые захваченных наклонным дном топографических волн показаны на рис. 6. Сопоставление дисперсионных зависимостей показывает, что с увеличением глубины длина и фазовые скорости волны при фиксированном периоде волны увеличиваются.



Р и с. 6. Дисперсионные кривые захваченных наклонным дном топографических волн (сплошная линия — для точки № 1, штриховая — для точки № 2)

Заключение. В ходе экспериментальных измерений реально наблюдались захваченные топографические волны, которые вносили существенный вклад в изменчивость полей температуры, солености и плотности придонного слоя моря. Теоретические расчеты захваченных топографических волн позволили определить их параметры для рассматриваемого района северо-западной части Черного моря и сопоставить с выявленными экспериментально. Получено качественное соответствие между теоретическими и экспериментальными данными по вертикальному распределению амплитуды захваченных топографических волн, а также оказалось возможным теоретически оценить пространственные масштабы этих волн. Максимум амплитуды горизонтальной скорости у дна (рис. 5, б) свидетельствует о значимой роли этих волн во взвешивании и переносе донного осадочного материала на шельфе, что является предметом дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блатов А.С., Иванов В.А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря. — Киев: Наук. думка, 1992. — 237 с.
2. Иванов В.А., Янковский А.Е. Длинноволновые движения в Черном море. — Киев: Наук. думка, 1992. — 111 с.
3. Ле Блон П., Майсек Л. Волны в океане. Ч.1. — М.: Мир, 1981. — 478 с.
4. Huthnance J.M. On trapped waves over a continental shelf // J. Fluid Mech. — 1975. — 69, pt. 4. — P. 689 – 704.
5. Brink K.H. A comparison of long coastal trapped waves theory with observation off Peru // J. Phys. Oceanogr. — 1982. — 12, № 8. — P. 897 – 913.

6. *Ou H.-W.* On the propagation of free topographic Rossby waves near continental margins. Part 1. Analytical model for a wedge // *Ibid.* — 1980. — 10, № 7. — P. 1051 – 1060.
7. *Rhines P.* Edge-, bottom-, and Rossby waves in a rotating stratified fluid // *Geophys. Fluid Dyn.* — 1970. — 1. — P. 273 – 302.
8. *Педлоски Дж.* Геофизическая гидродинамика. Т. 2. — М.: Мир, 1984. — 811 с.
9. *Коротяев Г.К.* Теоретическое моделирование синоптической изменчивости океана. — Киев: Наук. думка, 1988. — 159 с.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 28.03.05
После доработки 26.04.05

ABSTRACT Trapped topographic baroclinic waves on the northwestern shelf of the Black Sea are studied at the bottom real slopes and stratification. Temporal scales of the trapped waves are defined; spatial scales and the amplitude vertical distribution that qualitatively corresponds to the experimentally observed one are calculated. Energy of the topographic waves trapped by the sloping bottom is concentrated in the bottom layer that corresponds to the measurement data.