

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНУТРЕННИХ ВОЛН НА ПОЛИГОНАХ ЭГЕЙСКОГО МОРЯ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

Л.Д.Пухтар, А.С.Кукушкин

Морской гидрофизический институт
НАН Украины

г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

Из практики натурных и теоретических исследований определено следует, что решение ряда океанологических задач невозможно без всестороннего изучения внутренних волн, повсеместно присутствующих в стратифицированном океане. Несмотря на обилие публикаций теоретического и экспериментального характера, посвященных изучению этого явления, представление о реальном поле внутренних волн остается весьма несовершенным. Особенно это относится к бассейнам морей, где близость берегов, мелководий, островов, шельфовых зон значительно усложняет картину, дополняя ее волновыми движениями других типов. К таким морям в частности относится Эгейское море.

В работе на основе гидрологических данных, полученных с помощью СТД-зонда (МГИ 4102) в 6-м рейсе НИС "Профессор Колесников" с 14 по 26 июля 1983 г. на трех полигонах в Эгейском море, выполнены расчеты параметров внутриволновых движений и проведено их сравнение с экспериментальными данными полученными в этом же рейсе с помощью буксируемого градиентно-распределенного датчика температуры [1]. Одновременно с буксировкой градиентно-распределенного датчика проводились измерения напряженности электрического поля (ЭП) в поверхностном слое моря, обусловленного флюктуациями горизонтальных

компонент скорости внутриволновых движений. Для этих целей использовался поверхностный электромагнитный измеритель течений (ЭМИТ) с измерительной базой равной 100 м и графитовыми электродами конструкции В.И.Лопатникова. Возможность таких измерений показана в работах [2,3].

Условия образования и развития внутренних волн в Эгейском море обладают значительной пространственно-временной зменчивостью, что объясняется изолированностью моря от остальных районов Средиземного моря, опреснением поверхностных вод в северной части моря в результате проникновения мраморноморских вод, сложной системой течений и наличием интенсивного гидрологического фронта квазиональной ориентации.

Исследование этих условий включали комплексную гидрологическую съемку СТД-зондом, которая сочеталась с измерениями поверхностных течений с помощью ЭМИТ [4,5].

Анализ горизонтальных распределений температуры, солености и плотности в поверхностном слое моря, полученных по данным гидрологической съемки, показал, что гидрологический режим определяется взаимодействием двух водных масс - мраморноморской, которая имеет пониженную соленость, и высокосоленой местной (Эгейской) водной массы. В результате их взаимодействия формируется интенсивный фронт квазиональной ориентации, наиболее отчетливо проявляющийся в полях солености (рис.1) и условной плотности.

Измерения параметров внутренних волн проводились на трех полигонах в районах моря, отличающихся друг от друга по своим гидрологическим характеристикам и динамике вод в поверхностном

слое [5]. Первый полигон (центральный) находился в центральной части района работ, во фронтальной зоне, обусловленной взаимодействием мраморноморских и эгейских вод. Для него характерна значительная изменчивость вертикального распределения температуры и динамики вод. Второй полигон (северный) находился в северной части района исследований в зоне течения, переносящего распределившие мраморноморские воды. Третий полигон (южный) располагался в области стабильного потока левантийских вод, поступающих в подповерхностный слой моря с юга.

Результаты качественного анализа экспериментальных данных и их спектральной обработки [1] сведены в таблицу 1, где для 12 галсов приведены периоды, длины, амплитуды и фазовые скорости внутренних волн.

Оценки параметров волн, зарегистрированные на 3–6 галсах полигона №1 являются приближенными, так как они получены только по профилям изменения глубины термоклина. По вычисленным спектрам ЭП определены только длины волн, которые не всегда совпадают с результатами обработки данных градиентно-распределенного датчика, что, видимо, объясняется существенной анизотропией многообразия наблюдавшихся волн на полигонах. В целом по данным ЭМИТ выделяются более короткопериодные волны.

Выполним расчеты волновых движений в северной части этого моря, основываясь на натурных гидрологических данных полученных в экспедиционных исследованиях в бассейне II этапе НИС "Профессор Колесников", с 24 июня по 30 июля 1983 г. и проведем сравнение с экспериментальными результатами экспедиционных из-

мерений характеристик внутренних волн.

Целью наших теоретических расчетов в этом районе является сопоставление теоретических и экспериментальных результатов и расчет недостающих параметров волн при их неполной характеристики в табл.1.

При теоретическом рассмотрении волнового движения жидкости будем полагать море постоянной глубины D , безграничным в горизонтальной плоскости, вертикально жидкость является непрерывно-стратифицированной по плотности, состоящей из двух слоев, выше и ниже границы сезонного термоклина, в которых плотность меняется экспоненциально.

Систему декартовых координат расположим так, чтобы начало координат располагалось на поверхности моря, ось z направлена вертикально вверх, оси x и y лежат в горизонтальной плоскости и ориентированы произвольно относительно магнитного меридиана. Считаем, что волны в жидкости вызываются барическими возмущениями типа бегущей волны

$$P_0 = A_0 \exp(i(mx + ny - \omega t)) \quad (1)$$

и такой же вид принимают волновые скорости в жидкости.

Задача решается, исходя из системы уравнений движения

$$\frac{\partial U_x}{\partial t} + fU_y = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \mu_1 \Delta_h U_x, \quad (2)$$

$$\frac{\partial U_y}{\partial t} - fU_x = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \mu_1 \Delta_h U_y, \quad (3)$$

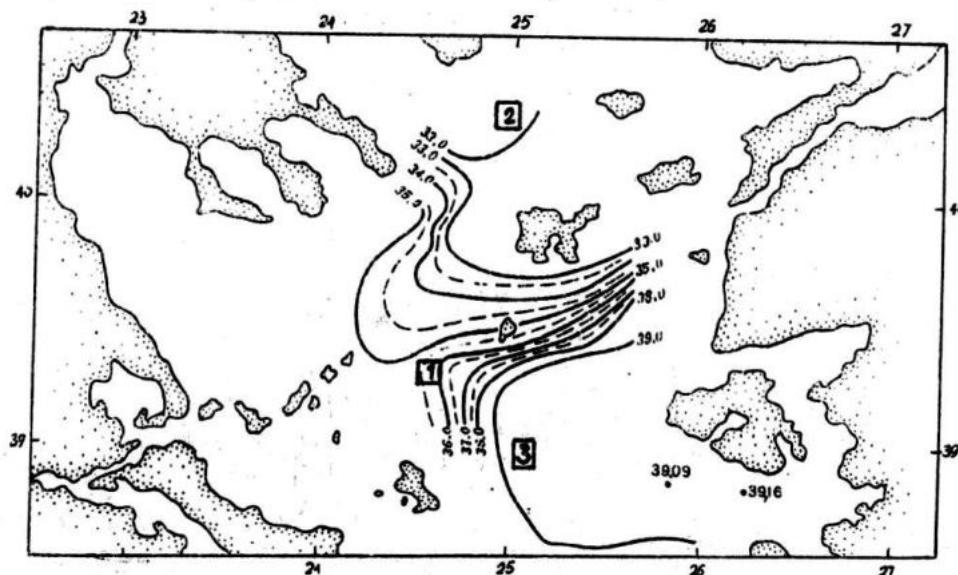


Рис. 1. Схема расположения полигонов (1–3) и распределение солености на поверхности Эгейского моря.

Таблица 1

Параметры экспериментальных измерений ВВ на галсах трех полигонов северной части Эгейского моря.

ПОЛИГОН	НОМЕР ГАЛСА	ПЕРИОД	ДЛИНА ВОЛНЫ, КМ	АМПЛИТУДА, М	ФАЗОВАЯ СКОРОСТЬ, М/С	ДЛИНА ВОЛНЫ, КМ (ПО СПЕКТРАМ ЭП)
центральный	1	5 мин	0.5	2	—	—
	2	6–7 мин	—	—	—	—
	3	—	~1.0	2–3	—	—
	4	~ 6 ч	23	—	—	—
	5	~ 6 ч	25.9	21–26	1.1	0.55
	6	~ 6 ч	25.9	21–26	1.1	0.69
северный	7	—	0.77	≤1	—	0.63; 1.06; 2.1
	8	—	1.25	≤1	—	0.65; 0.86
	9	—	1.67	≤1	—	0.86; 1.1
	10	—	—	≤1	—	0.72; 1.06; 5.55
южный	11	5–6 мин	—	≤3	0.56	0.55–0.77
	—	—	11	—	—	1.1
	—	—	1.25–1.42	—	—	2.1
	12	1 час	—	~3	0.56	0.83; 1.3
		2.1 час	1.92	—	0.25	10.0

$$\frac{\partial U_z}{\partial t} - g \frac{\rho}{\bar{\rho}} = - \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial P}{\partial z} + \mu_l \Delta_h U_z, \quad (4)$$

уравнения неразрывности

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

уравнения диффузии плотности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + U_z \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial z} = K_l \Delta_h \rho, \quad (6)$$

с граничными условиями

$$p + \bar{\rho} g \xi = p_0 \text{ при } z=0, \quad (7)$$

$$U_z = 0 \text{ при } z=D \quad (8)$$

с учетом кинематического условия

$\frac{\partial \xi}{\partial t} = U_z(x, y, 0, t)$ на невозмущенной поверхности моря. Здесь U_x, U_y, U_z – горизонтальная и вертикальная составляющие вектора скорости волнового возмущения, ξ – отклонение свободной поверхности от невозмущенного состояния, $\bar{\rho}$ – стационарная плотность жидкости, K_l, μ_l – коэффициенты горизонтальной турбулентной диффузии и вязкости, $f = 2\Omega \sin \phi$ – параметр Кориолиса, Ω – частота вращения Земли, ϕ – географическая широта. Отыскивая периодические по времени t и горизонтальным координатам x, y решения вида

$$\Psi(x, y, z, t) = \Psi_0(z) \exp i(\pi x + \pi y - \omega t) \quad (9)$$

получим для определения амплитуды вертикальной составляющей скорости уравнение

$$U_z'' + a_1 U_z' + a_2 U_z = 0, \quad (10)$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} U_z' + a_3 U_z &= a_4 & \text{при } z=0, \\ U_z &= 0 & \text{при } z=D. \end{aligned} \quad (11)$$

А на внутренней поверхности раздела слоев жидкости при $z=d$ выполняются кинематическое и динамическое условия

$$U_z^{(1)} = U_z^{(2)}, \quad P^{(1)} = P^{(2)}, \quad (12)$$

где индекс 1 означает слой воды от 0 до d , индекс 2 от d до D .

Плотность в слоях жидкости меняется по следующему закону:

$$\text{в слое 1} \quad \bar{\rho} = \rho_1 e^{\Gamma_1 z}, \quad \Gamma_1 = \frac{1}{d} \ln \frac{\rho_1}{\rho_2},$$

$$\text{в слое 2} \quad \bar{\rho} = 2\rho_2 - \rho_2 e^{-\Gamma_2(z-d)},$$

$$\Gamma_2 = -\frac{1}{D-d} \ln \left(2 - \frac{\rho_3}{\rho_2} \right),$$

где ρ_1, ρ_2, ρ_3 плотности жидкости соответственно при $z=0, d, D$. В используемых обозначениях

$$\Gamma = \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial z} > 0, \quad a_1 = \Gamma,$$

$$a_2 = -\frac{qr^2}{f^2 + q^2} \left(q + \frac{N_0}{\Phi} \right),$$

$$a_3 = \frac{iqqr^2}{\omega(f^2 + q^2)}, \quad a_4 = \frac{qr^2 A_0}{(f^2 + q^2)\bar{\rho}},$$

$$N_0 = g\Gamma, \quad r^2 = m^2 + n^2,$$

$$q = i\omega + \mu_l r^2, \quad \Phi = i\omega + K_l r^2, \quad i = \text{мнимая единица.}$$

Если a_1 и a_2 от z не зависят, то решение уравнения (10) будет иметь вид:

$$U_z^{(1)} = C_1^{(1)} e^{S_1^{(1)} z} + C_2^{(1)} e^{S_2^{(1)} z}$$

при $0 \leq z < d$, (13)

$$U_z^{(2)} = C_1^{(2)} e^{S_1^{(2)} z} + C_2^{(2)} e^{S_2^{(2)} z}$$

при $d \leq z \leq D$, где

$$\xi_{1,2}^{(1,2)} = \frac{-a_1 \pm \gamma}{2}, \quad \gamma^{(1,2)} = \sqrt{a_1^2 - 4a_2}.$$

а $C_1^{(1,2)}, C_2^{(1,2)}$ находятся из граничных условий (11), (12) и приводятся в [6].

Горизонтальные составляющие волновых скоростей с учетом (13) примут вид:

$$U_x^{(1,2)}(z) = \frac{i(qm - fn)}{qr^2} Q^{(1,2)}(z), \quad (14)$$

$$U_y^{(1,2)}(z) = \frac{i(qn - fm)}{qr^2} Q^{(1,2)}(z), \quad \text{где}$$

$$Q^{(1,2)}(z) = C_1^{(1,2)} S_1^{(1,2)} e^{S_1^{(1,2)} z} + \\ C_2^{(1,2)} S_2^{(1,2)} e^{S_2^{(1,2)} z}$$

На основе предложенной модели выполним расчеты ВВ на трех полигонах Эгейского моря при $A_0 = 100$ Па и сравним с результатами, полученными экспериментально в табл. 1. Применяемая в расчетах плотностная стратификация для каждого из трех полигонов приводится на рис. 2. Как можно видеть из рис. 2 заметные различия плотностной стратификации на указанных полигонах проявляются в верхнем слое от поверхности моря до 50–60 м, глубже 60 м распределения плотности на этих полигонах практически совпадают, несмотря на различия глубин этих районов. Наибольшие глубины характерны для северного полигона 185–800 м, для центрального 220–420 м и наименьшие для южного 80–360 м. Для частоты Вайсяля–Брента количественные различия на 3-х полигонах в слое 0–60 м, как можно заключить из рис. 2 и [4], следующие: максимальные значения достигаются на 2-м полигоне (33–37 д/ч на глубинах 12–18 м), несколько меньше на 1-м (23–30

д/ч, 10–18 м) и самые малые на 3-ем (13–14 д/ч на глубинах 16–27 м).

По-видимому такие особенности вертикальной структуры плотности должны сказаться и на структуре волнового движения в этих районах. Рассмотрим результаты расчетов ВВ. На всех трех полигонах отмечается существенное проявление первых трех мод ВВ. Причем наиболее значительна у них амплитуда первой моды ВВ. Например, для длины волны 350 м периоды проявляющихся первых трех мод 0.15, 0.36, 0.59 ч., где первая мода достигает амплитуды 0.24 м, а вторая и третья имеют амплитуды значительно ниже (0.06 м, 0.02 м). Подобное соответствие наблюдается и при других длинах и периодах ВВ, возникающих на рассматриваемых 3-х полигонах. Наблюдаемые различия относятся только к величинам амплитудных значений. Различия амплитуд первых двух мод на исследуемых полигонах можно видеть из рис. 3 и 4, где приведены зависимости амплитуд первой (сплошные линии) и второй (штриховые линии) мод ВВ от длины и периода волны; номера у кривых соответствуют номеру полигона. Наибольшие амплитуды первой моды волн в зависимости от длины волны наблюдаются на центральном полигоне, на северном полигоне достигаются несколько меньшие амплитуды и значительно меньше, чем на 1 и 2 полигонах амплитуды южного полигона, рис. 3. При фиксированном периоде наибольшие амплитуды первой моды характерны для 2-го полигона, несколько меньше для 1-го и на много меньше на 3-м полигоне (рис. 4). Если сопоставить экспериментально обнаруженные на 1-м полигоне ВВ с периодом 6 ч и амплитудами 21–26 м с теоретически полученными, то амплитуда

составит 28.5 м (рис.4) при длине волны 19.2 км (рис.3). При таком же периоде на 2-м полигоне амплитуда будет достигать 42.0 м ($\lambda = 22.6$ км), а на 3-м — 9 м ($\lambda = 12.5$ км) (рис.4).

Амплитуды ВВ вторых мод на 1-м и 2-м полигонах значительно меньше, чем у первых мод, примерно в 7 раз меньше при фиксированной длине волны и в 18–28 раз меньше при фиксированном периоде волны (рис.3 и 4). А на 3-м полигоне амплитуды волн 2-й моды всего в два раза ниже, чем у первой. Это еще одна особенность 3-го полигона, отличающегося низкими значениями амплитуд волн 1-й моды. Но для второй моды амплитуды в 1.5–2 раза выше, чем на 1-м и 2-м полигонах (рис.3,4). Что касается амплитуд 3-й моды, то они в 10–20 раз ниже амплитуд волн 1-й моды и в 3–5 раз ниже значений 2-й моды в исследуемой части Эгейского моря.

Выполненные расчеты параметров ВВ, отсутствующих в полной характеристике волн в табл.1, позволили получить расширенные данные, которые представлены в табл.2.

Из сравнения величин параметров табл. 1 и 2 следует, что расчетные данные ближе к экспериментальным для периодов волн ≥ 14 , где различия составляют 7–25%, а для короткопериодных волн различия большие и достигают 25–50%.

Рассматривая волновые движения по полигонам, можно отметить, что наиболее значительные их проявления в исследуемый период наблюдались на центральном полигоне. На северном полигоне, где теоретически возможно волновое движение со значительными амплитудами, таких амплитуд волн не выявлено. Это может свидетельствовать о том, что период исследований был периодом

затишья в генерации волнового движения в этом районе. На южном полигоне интенсивность регистрируемого волнового движения ниже, чем на первом полигоне. Теоретические расчеты подтверждают, что там существуют такие условия, при которых интенсивность волнового движения должна быть ниже, чем на 1-м и 2-м полигонах. Там получены самые низкие значения как амплитуд, так и фазовых скоростей волн. Причем теоретические (0.6 м/с) и экспериментальные (0.56 м/с) значения фазовых скоростей отличаются мало (7%). Наибольших величин фазовые скорости ВВ первой моды достигают на втором полигоне (1.4 м/с), меньше их значения на первом полигоне (0.87 м/с), что на 20% ниже экспериментальных. Эти различия легко проследить, рассматривая углы наклона дисперсионных кривых (рис.5) на исследуемых полигонах. На рис.5 сплошными линиями приводятся дисперсионные зависимости для первой моды, штриховыми — второй моды ВВ, цифры у кривых соответствуют номеру полигона. Полученная на полигоне №3 фазовая скорость 0.25 м/с при $T=2.1$ ч (табл.1), повидимому ближе ко второй моде ВВ, что можно видеть из рис.5, где значение фазовой скорости второй моды равно 0.4 м/с. На практическую возможность регистрации второй моды ВВ на полигоне №3 указывают теоретические расчеты, приводимые выше (рис.3,4), дающие для амплитуд волн второй моды значения всего в 2–3 раза ниже, чем у первой моды. На первом и втором полигонах амплитуды высших мод относительно первой малы (в 7–28 раз меньше), поэтому там среди зарегистрированных волн присутствует только первая мода (табл.1).

Рассматривая вертикальную структуру волнового движения на

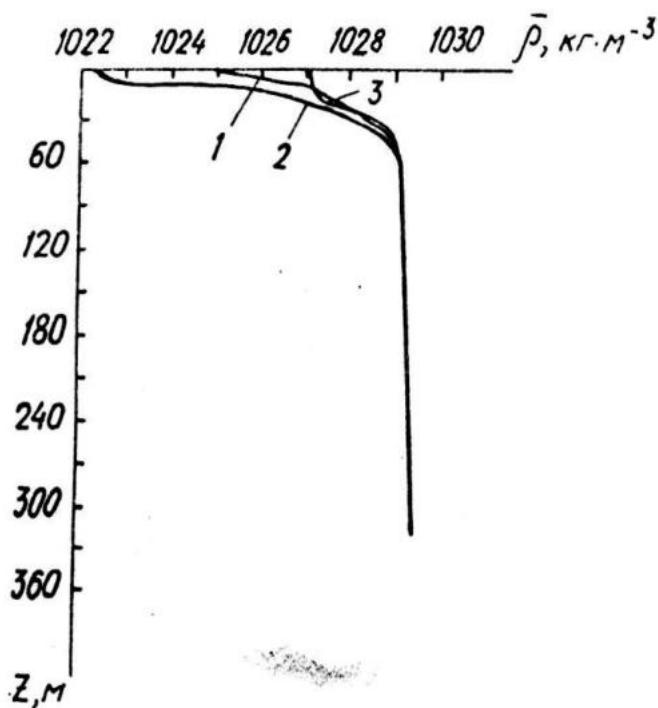


Рис. 2. Вертикальные распределения плотности на полигонах:
1 – центральном, 2 – северном, 3 – южном.

Таблица 2
Теоретические величины параметров ВВ на 12 – ти галсах
в северной части Эгейского моря 16 – 23.07.83 г.

номер галса	период	длина волны, км	амплитуда, м	фазовая скорость, м/с	полигон и типичная станция
1	5 мин	0.26	0.4	0.87	№1 централь – ный ст.438
2	5 – 7 мин	0.31 – 0.37	0.47 – 0.55	0.87	
	0.32 ч	≈1	1.2		
3	7.3 ч	23	34	0.87	
4	6 ч	19.2	28.5	0.87	
5	6 ч	19.2	28.5	0.87	
6	6 ч	19.2	28.5	0.87	
7	0.15 ч	0.77	0.72	1.4	№2 северный ст.450
8	0.24 ч	1.25	1.15	1.4	
9	0.33 ч	1.67	1.58	1.4	
10					
11	5 – 6 мин	0.18 – 0.22	0.20 – 0.22	0.6	№3 южный ст 461
	0.58 – 0.65 ч	1.25 – 1.43	0.85 – 0.96	0.6	
12	1 ч	2.16	1.2	0.6	
	5.09 ч	11	8.2	0.6	

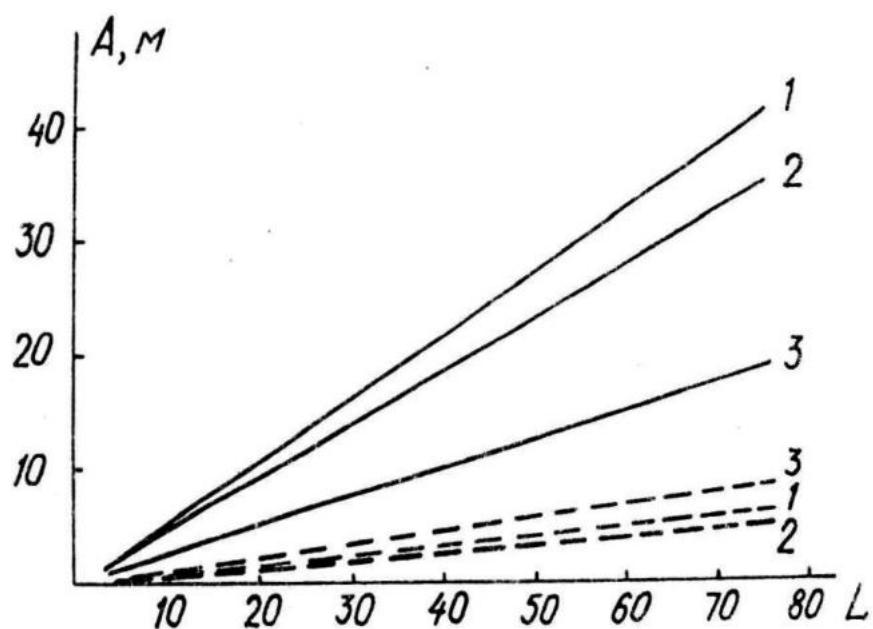


Рис. 3. Зависимости амплитуд первой (сплошные линии) и второй (штриховые линии) мод ВВ от длины волны. Номера у кривых соответствуют номеру полигона.

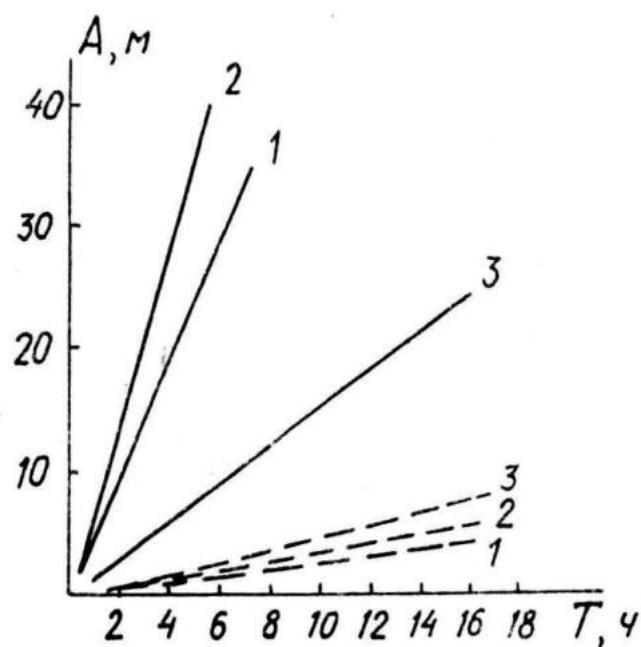


Рис. 4. Зависимости амплитуд первой (сплошные линии) и второй (штриховые линии) мод ВВ от периода волны. Номера у кривых соответствуют номеру полигона.

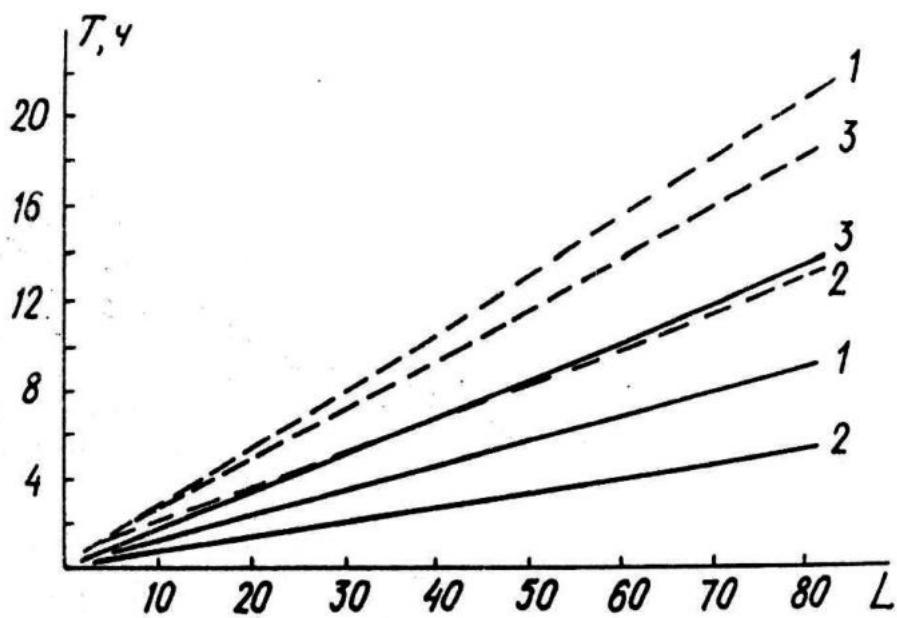


Рис. 5. Дисперсионные кривые первых двух мод ВВ на рассматриваемых полигонах. Сплошные линии соответствуют первой моде ВВ, штриховые — второй, номера у кривых — номеру полигона.

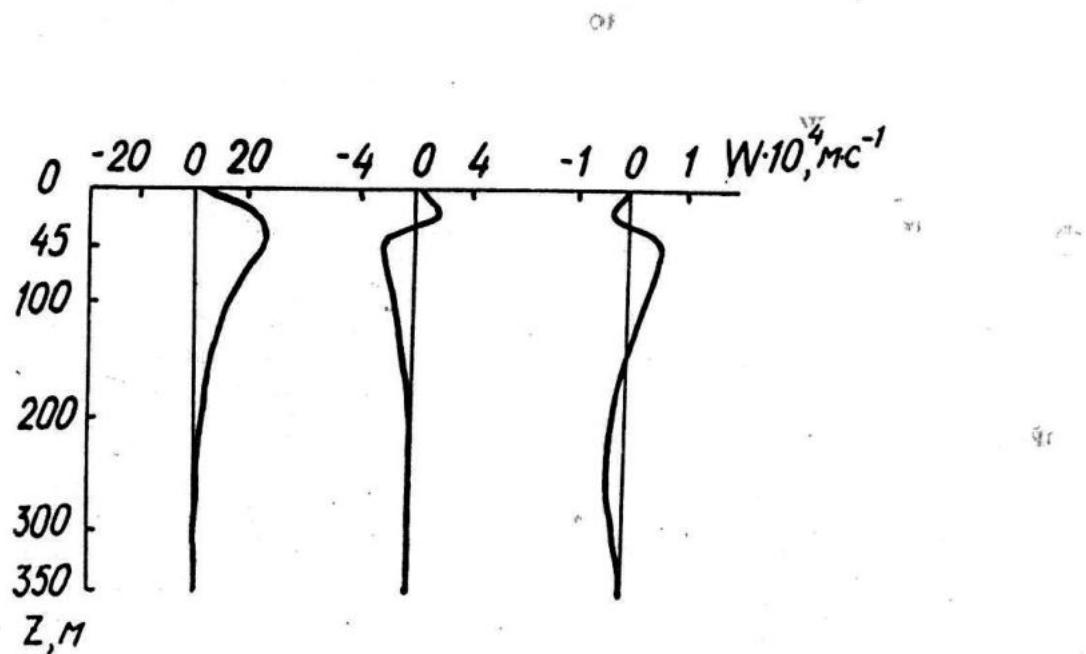


Рис. 6. Характерные распределения вертикальных волновых скоростей по глубине для первых трех мод ВВ.

трех полигонах, можно заключить, что качественно она подобна на всех полигонах, а имеющиеся различия проявляются количественно в величинах амплитуд волн и волновых скоростей. Характерные распределения вертикальных волновых скоростей по глубине для первых трех мод выглядят следующим образом, рис.6, (полигон 1, $\lambda = 0.35$ км, $T_1 = 0.15$ ч, $T_2 = 0.36$ ч, $T_3 = 0.59$ ч). Наиболее существенные по глубине значения вертикальных волновых скоростей иллюстрируемых мод наблюдаются в верхнем слое моря, где максимум этих скоростей и амплитуд волн достигается на границе пикноклина. На полигонах №1 и №2 эта граница составляет $d = 45$ м, а на №3 — $d = 35$ м. На глубинах ниже пикноклина амплитуды волновых колебаний уменьшаются и у дна достигают нуля.

В заключение отметим основные результаты работы.

Исследована возможность возникновения внутриволновых движений на трех полигонах Эгейского моря. Выявлено существование наиболее интенсивного волнового движения на центральном и северном полигонах, где преобладают ВВ первой моды с амплитудами, достигающими 21—26—34 м. Показано, что на южном полигоне интенсивность волнового движения первой моды ниже, чем на других полигонах. Кроме этого его особенность состоит в проявлении существенных значений не только первой, но и второй моды ВВ, имеющей величины амплитуд и скоростей выше, чем на центральном и южном полигонах. Сопоставление теоретических и экспериментальных параметров ВВ показало их достаточно хорошее соответствие.

Теоретически полученные основные характеристики ВВ дополняют отсутствующие параметры по

экспериментальным данным и расширяют волновую изученность района.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В.А., Леонтьев Е.А., Серебряный А.Н. Пространственная структура внутренних волн в Эгейском море. Мор. гидрофиз. журн., 1986, №6, с.61—64.
2. Ильичев В.И., Меджитов Р.Д., Кожин Ю.П., Рутенко А.Н. Исследование электрических полей внутренних волн на ходу судна. ДАН СССР, 1983, т.270, №2, с.436—439.
3. Блинков В.А., Кукушкин А.С. Характеристики внутренних волн в Черном море и их проявление в электрическом поле приповерхностного слоя/ Процессы формирования и внутригодовой изменчивости гидрофизических и гидрохимических полей Черного моря. — Севастополь, МГИ АН УССР, 1988, с.66—74.
4. Иванов В.А., Кукушкин А.С., Самодуров А.С. Шестой рейс научно-исследовательского судна "Профессор Колесников" в Эгейском и Черном морях (24.06.—35.08.1983 г.). Океанология, 1985, №2, т XXV, с. 357—361.
5. Кукушкин А.С., Ястреб В.П. Особенности циркуляции поверхностных вод Эгейского моря в летний период/ Депон. рукопись №3042—85. — М.: ВНИТИ, 1985. — 14с.
6. Карнаушенко Н.Н., Кукушкин А.С., Пухтяр Л.Д. Электромагнитное поле поверхностных и внутренних волн в непрерывно-стратифицированной жидкости / Депон. рукопись № 4062—В91. — М.: ВНИТИ, 1991. — 20с.