

В.А.Иванов, Т.Я.Шульга, Т.В.Пластун
Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЛЬЕФА ДНА
НА ПАРАМЕТРЫ ШЕЛЬФОВЫХ ВОЛН
В РАЙОНЕ АНАТОЛИЙСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЧЕРНОГО МОРЯ**

Исследовано влияние рельефа дна на пространственно-временные параметры баротропных захваченных волны в рамках линейных уравнений мелкой воды. Исследуемая область состоит из участков континентального шельфа различной ширины, разграниченных по особенностям рельефа нормальными к береговой линии для более детального исследования. Расчеты показали, что топография континентального шельфа влияет на пространственный масштаб шельфовых волн, в то время как групповая скорость достигает минимума при волновых числах порядка 10^{-5} . Увеличение ширины континентального склона приводит к более медленному затуханию волны в сторону открытого моря. Показано, что волны второй моды более чувствительны к изменениям геометрии шельфа по сравнению с волнами первой моды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: волна Кельвина, фазовая скорость, шельф, баротропные захваченные волны, континентальный склон

Длинные волны определяют характер большинства гидрофизических процессов, протекающих в морских бассейнах или на их границе, включая формирование береговой зоны, апвеллинг, меандрирование течений, изменение биопродуктивности. В пограничных областях, образованных изменениями рельефа и наличием берега (шельфовая зона, подводные хребты, желоба, банки), изменения глубины приводят к образованию горизонтально неоднородных волн, а также к появлению пограничных волновых образований (поверхностные и внутренние волны Кельвина, краевые и шельфовые волны, двойные волны Кельвина, придонные захваченные волны [1 – 3]). Для баротропных движений существуют три основных типа захваченных волн: волна Кельвина (захват вращением Земли и наличием береговой границы); краевые волны (гравитационный захват в области мелководья); топографические волны Россби (захват совместным эффектом вращения Земли и неоднородности рельефа) [4]. Согласно современному представлению, они играют важную роль во многих процессах береговой динамики, таких как перенос осадочного материала, формирование структуры береговой линии и прибрежного рельефа, прибойные биения, и часто рассматриваются как определяющий фактор эволюции береговой линии при формировании ритмических форм рельефа (серповидные бары и фестоны). Крупномасштабные краевые волны являются важным типом морских волн, вызванных, например, циклонами, движущимися вдоль береговой линии.

Собственная волна Кельвина, существующая на частотах как выше, так и ниже инерционной, описывается аналитическим решением для вращающегося океана постоянной глубины, ограниченного вертикальной стенкой [5]. Свойства этого решения хорошо известны: постоянная фазовая скорость $c = (gh)^{1/2}$ (где g – ускорение силы тяжести, h – глубина бассейна), экспо-

ненциальное затухание свободной поверхности на шельфе, распространение фазы справа (слева) от побережья в Северном (Южном) полушарии. На низких частотах характер волны Кельвина определяется вращением Земли, с увеличением частоты зона шельфа начинает оказывать все большее влияние, в результате чего волна Кельвина переходит в нулевую моду краевых волн [3, 6]. На высоких частотах нулевая мода переходит в краевую волну, береговой захват происходит через механизм преломления длинной гравитационной волны, в то время как эффекты вращения Земли становятся несущественными.

В настоящей работе исследуются параметры шельфовых волн в пограничных областях: в зоне шельфа и континентального склона. Определено влияние рельефа дна на пространственно-временные параметры низших мод шельфовых волн вблизи критической частоты на примере идеализированных профилей дна, отражающих характерные линейные масштабы шельфовых районов черноморского бассейна, а также для реальных профилей дна Анатолийского побережья Черного моря.

В строении рельефа дна Черного моря имеет место шельфовая область (выровненная область подводной окраины материка, примыкающая к суше и ограниченная бровкой с резким перегибом поверхности морского дна, определяющей переход к материковому склону), материковый склон (часть морского дна, характеризующаяся относительно крутым уклоном, которая соединяет бровку шельфа и сравнительно горизонтальную часть дна) и глубоководная котловина. Шельфовая зона глубиной 110 – 160 м имеет наибольшую ширину, превышающую 200 км, в северо-западной части моря. В остальных районах глубина шельфа обычно меньше 110 м, а ширина изменяется от 10 – 15 до 2,5 км у турецкого побережья.

Исследование топографических пограничных волн выполнено с использованием модели с простой геометрией, для которой параметры рассматриваемой области зависят только от одной пространственной переменной (вытянутый шельф, подводный хребет, впадина). В этом случае решение задачи о распространении длинных волн в океане упрощается. В выбранной системе координат ось x совпадает с береговой линией, ось y направлена в сторону открытого моря (рис.1). Математическая модель основывается на системе линейных уравнений мелкой воды для невязкой жидкости однородной плотности, вращающейся с постоянной угловой скоростью.

$$u_t - fv = -g\zeta_x, \quad (1)$$

$$v_t + fv = -g\zeta_y, \quad (2)$$

$$\zeta_t + (uh)_x + (vh)_y = 0, \quad (3)$$

где u и v – береговые и морские компоненты скорости соответственно, ζ – отклонение свободной поверхности от невозмущенной горизонтальной плоскости, t – время, h – глубина моря, f – параметр Кориолиса. Нижние индексы обозначают частное дифференцирование.

Глубина изменяется по нормали к берегу, что позволяет выразить периодическое волнообразное решение относительно вдольбереговой координаты и времени, с амплитудами $\zeta^*(y)$, $u^*(y)$, $v^*(y)$, зависящими только от y :

$$\{\zeta, u, v\} = \{\zeta^*(y), u^*(y), v^*(y)\} \exp[i(\omega t - kx)], \quad (4)$$

где k – вдольбереговой волновое число, ω – частота волны,

Учет этих предположений приводит к известной краевой задаче [1, 7], описывающую полный набор баротропных захваченных мод в прибрежных районах океана. Решая уравнения (1), (2) для u, v и подставляя результаты в уравнение (3), получаем дифференциальное уравнение относительно амплитуды колебаний уровня $\zeta(y)$ (звездочки опущены для удобства):

$$\zeta_{yy} + \zeta_y \frac{h_y}{h} + \zeta \left(\frac{kf}{\omega} \frac{h_y}{h} - \frac{f^2 - \omega^2}{gh} - k^2 \right) = 0 \quad (5)$$

с соответствующими граничными условиями отсутствия нормальной компоненты полного потока через прибрежные границы:

$$v = 0, \quad y = 0, \quad h(0) \neq 0 \quad (6)$$

и экспоненциального затухания возмущений в сторону открытого моря ($y \rightarrow \infty$)

$$\zeta_y = -l\zeta, \quad l^2 = \frac{f^2 - \omega^2}{gh} + k^2, \quad h = \text{const.} \quad (7)$$

В (5) – (7) $h = h(y)$ – профиль глубины моря, изменяющийся только в поперечном направлении. Волновые решения для этой краевой задачи и их свойства подробно обсуждаются в [1, 6, 7].

Пространственно-временные характеристики краевых волн для тестовых профилей дна. Для определения влияния главных участков рельефа пограничной области – шельфа и континентального склона – выполнены расчеты с использованием профилей глубины $h(y)$, состоящих из трех кусочно-постоянных откосов: шельфа, склона и области открытого моря, где глубина постоянна. Схема рельефа дна показаны на рис.1. В пределах шельфа и континентального склона глубина увеличивается линейно, уклон дна изменяется скачкообразно на кромке шельфа. Во всех случаях характерными линейными масштабами топографии являются: глубина у берега h_1 , глубина бровки шельфа h_2 , глубина открытого моря h_3 , ширина шельфа L_1 , ширина континентального склона L_2 и ширина подножия L_3 . Рельеф континентального шельфа и склона аппроксимирован двумя склонами, прилегающими к глубоководному океану постоянной глубины (рис.1). Глубина профиля характеризуется шириной шельфа, верхнего и глубоководного склонов, а также промежуточной глубиной на интервалах между точками излома шельфа. Боковой стенка, представляющая собой граничащую с береговой зоной границу, принимается равной 5 м.

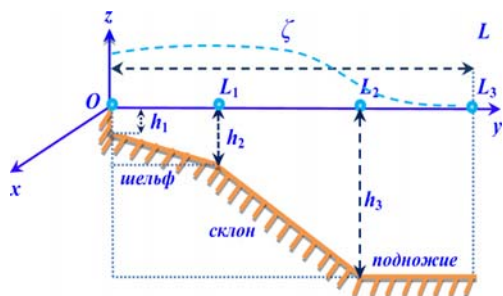


Рис.1. Профили дна для тестовых расчетов.

Для решения краевой задачи (5), (7) заменяем производные их конечно-разностными аппроксимациями, используя центральные разности в (5) и односторонние разности в (7). Задача на собствен-

ные значения (1) – (3) решается численно с использованием резонансных итераций по ω при заданном k . Пространственная дискретизация по y (Δy) в конечно-разностной аппроксимации задана равной 1 км. Параметр Кориолиса принимается равным $f = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, что характерно для района черноморского побережья. Решение соответствует точкам пересечения линий постоянной фазовой скорости $c_f = \omega/k = f/M$ с дисперсионными кривыми захваченных волновых мод. Положительные собственные значения (действительные волновые числа) соответствуют волновым модам, распространяющимся вдоль берега. Номер режима идентифицируется числом нулевых пересечений в структуре моды (собственный вектор). Вычисления повторяются при разных значениях M , как положительных (нисходящее распространение волнового режима), так и отрицательных (восходящее распространение).

Нулевой режим имеет два асимптотических решения, соответствующих двум различным механизмам захвата энергии волны. На низких частотах соответствует волне Кельвина, которая улавливается на вертикальной стенке в океане постоянной глубины h_3 из-за вращения Земли и описывается дисперсионным соотношением $\omega = (gh_3)^{1/2}k$. На высоких частотах напоминает нулевой режим краевых волн, образованный длинноволновым преломлением над наклонным дном. На промежуточных частотах дисперсионные кривые горизонтальны в случае достаточно широкого шельфа и их групповая скорость $C_g = \partial\omega/\partial k$ будет близка к нулю (рис.2). На этих промежуточных частотах нулевой режим представляет собой гибрид волны Кельвина и краевой волны [8].

На высоких частотах волновая структура смещается довольно близко к береговой линии и нечувствительна к положению обрыва шельфа. Поскольку мы применяем условие вертикальной стенки на побережье, дисперсия волн в нашем случае будет отличаться от (6) на высоких частотах и асимптотически приблизится к фазовой скорости $c = (gh_1)^{1/2}$ над наклонной топографией. Действительно, наблюдается сближение дисперсионных кривых при различных L_1 на высоких частотах (рис.2). На низких частотах волна распространяется далеко за пределы территории континентального шельфа и склона, и ее скорость близка к фазовой скорости волны Кельвина.

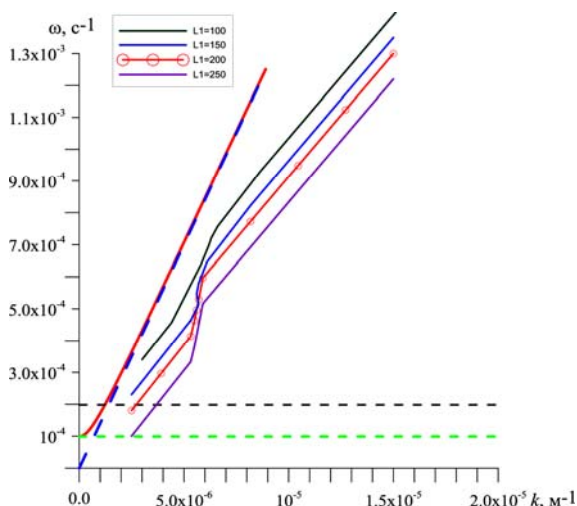


Рис. 2. Дисперсионные кривые нулевых волновых мод, соответствующие разным значениям ширины шельфа. Пунктирные линии ограничивают континуум волн Пуанкаре, суточную и полусуточную инерционные частоты.

Пространственно-временные характеристики краевых волн для района Анатолийского побережья. Выбор района Турецкого побережья Черного моря обоснован наличием такого континентального шельфа черноморского побережья, где ожидается наличие топографически модифицированных волн Кельвина. В этом районе имеет место сложный рельеф дна, связанный с активностью тектонических процессов. Черты рельефа области шельфа Анатолийского побережья представлены на рис. 3. Выбранные профили глубин отражают также характерные особенности рельефа прибрежной зоны всего черноморского бассейна: ширина шельфа составляет 5 – 30 км (и лишь в отдельных районах достигает 50 км и более), свал глубин начинается со 100-метровой изобаты. Геометрия склона существенно меняется в разных районах моря, однако ширина области максимальных уклонов редко превышает 20 км, при этом наиболее крутой склон наблюдается на глубинах 200 – 1000 м. Свал глубин простирается до изобаты 2000 м, хотя на глубинах 1000 м уклон дна уменьшается. В области открытого моря глубина составляют 2000 – 2200 м. Для района Анатолийского побережья, характеризующегося сложной конфигурацией берега и резкими перепадами глубин, параметры топографических волн оценены на частотах, близких к инерционным. Возможность существования таких волн над резкими уклонами дна была отмечена при расчетах баротропно-бароклинной неустойчивости основного черноморского потока [9].

Исходными данными для моделирования исследуемой области является рельеф дна Черного моря, представленный файлом глубин (<http://www.gebco.net>). Эти данные получены на основании комбинирования глубинных батиметрических зондирований, выполненных судовыми приборами с контролем качества данных, с интерполяцией между точками зондирования и усвоением спутниковых наблюдений. Сетка *ГЕВСО-2014* представляет собой сплошную рельефную модель для океана и суши с пространственным разрешением $0,5^\circ$. Данные в файле представлены в следующем формате: долгота с шагом $0,008337676^\circ$ в.д., широта с шагом $0,008342022941^\circ$ с.ш. и глубина в метрах. Номера профилей (профили 21 – 30) выбраны в соответствии с классической схемой расположения нормальных к берегу профилей рельефа дна шельфовой зоны Черного моря [10].

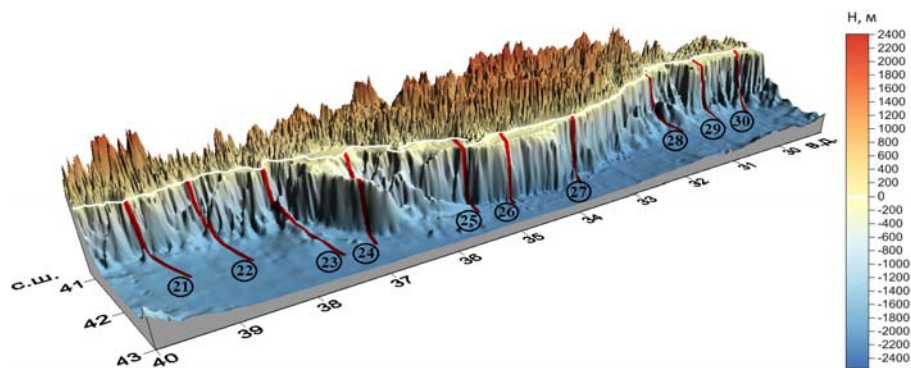


Рис. 3. Схема расположения профилей рельефа дна (21 – 30) в районе Анатолийского побережья Черного моря.

Т а б л и ц а . Параметры профилей шельфа в районе Анатолийского побережья.

про- филь	шельф			склон			подножие		
	h_1 , м	L_1 , км	α	h_2 , м	L_2 , км	α	h_3 , м	L_3 , км	α
21	1	2,1	14,9	23	18,8	108,3	1884	53,1	2,7
22	12	2,1	51,3	86	29,3	67,6	1833	53,8	4,4
23	15	4,2	28,3	115	61,5	31,6	1915	46,6	5,2
24	8	6,9	25,4	162	61,2	43,9	1959	24,6	5,3
25	3	23,4	5,3	109	18,5	178,7	2188	17,1	4,9
26	17	19,3	5,5	110	15,1	116,9	1961	10,3	15,8
27	27	4,1	31,8	144	15,1	118,7	2064	19,2	14,1
28	10	16,7	7,6	111	24,4	73,8	1864	26,2	7,1
29	1	19,4	11,2	165	18,0	94,6	1834	28,3	6,4
30	15	14,6	8,9	151	36,7	56,4	2002	13,1	4,9

В таблице приведены параметры шельфовых зон для различных профилей в районе Анатолийского побережья. Для каждого профиля указаны значения глубины (у берега (h_1), склона (h_2) и открытого моря (h_3)), ширины шельфа (L_1) континентального склона (L_2) и подножия (L_3), а также безразмерный коэффициент уклона участков профиля $\alpha = 10^3 (\partial H/\partial x)$.

Особенностью Анатолийского побережья является подводная терраса (профиль 23 и 24) на глубине 500 м. Профили 25, 26 и 29 имеют наибольшую ширину шельфовой отмели 19,3 – 23,4 км. Резкий переход к континентальному склону (где имеет место абсолютный максимум $\alpha = 51,3$) имеет место на профиле 22. Профили 21 – 24, расположенные в восточной части Турецкого побережья, наиболее специфичны. Здесь шельф практически отсутствует (L_1 составляет 2,1 – 4,2 км), прибрежная отмель узка, с небольшими уклонами дна, профиль $h(y)$ близок к квазилинейному (рис.4, 5).

Как видно из рис.5, пространственный масштаб шельфовых волн определяется шириной шельфа. На наиболее широком шельфе на профиле 25 (23,4 км) длина волны первой моды равна 20 км, на профиле 23 с шириной шельфа 4,2 км (в 4,7 раза более узком, чем на профиле 25) длина волны первой моды меньше 8 км. Увеличение ширины континентального склона приводит к более медленному затуханию волны в сторону открытого моря, однако положение точки ζ_{\max} меняется незначительно: на профиле 26 она удалена от берега на 12 км, на профиле 23 – на 10 км, хотя ширина склона возросла от 15,1 до 61,5 км.

Радиус захвата шельфовых волн первой моды не равен ширине зоны переменных глубин, определяется шириной шельфа. На профилях дна с широким и пологим склоном (профили 21 – 23, 26, 27, 30), значительно превосходящим ширину шельфа, затухание волны в сторону открытого моря происходит над серединой склона. Наоборот, на профилях, где $L_1 > L_2$, радиус захвата значительно шире зоны переменных глубин. Длина шельфовой волны первой моды растет быстрее при увеличении ширины шельфа, чем при увеличении ширины склона. Роль геометрии склона возрастает для волн

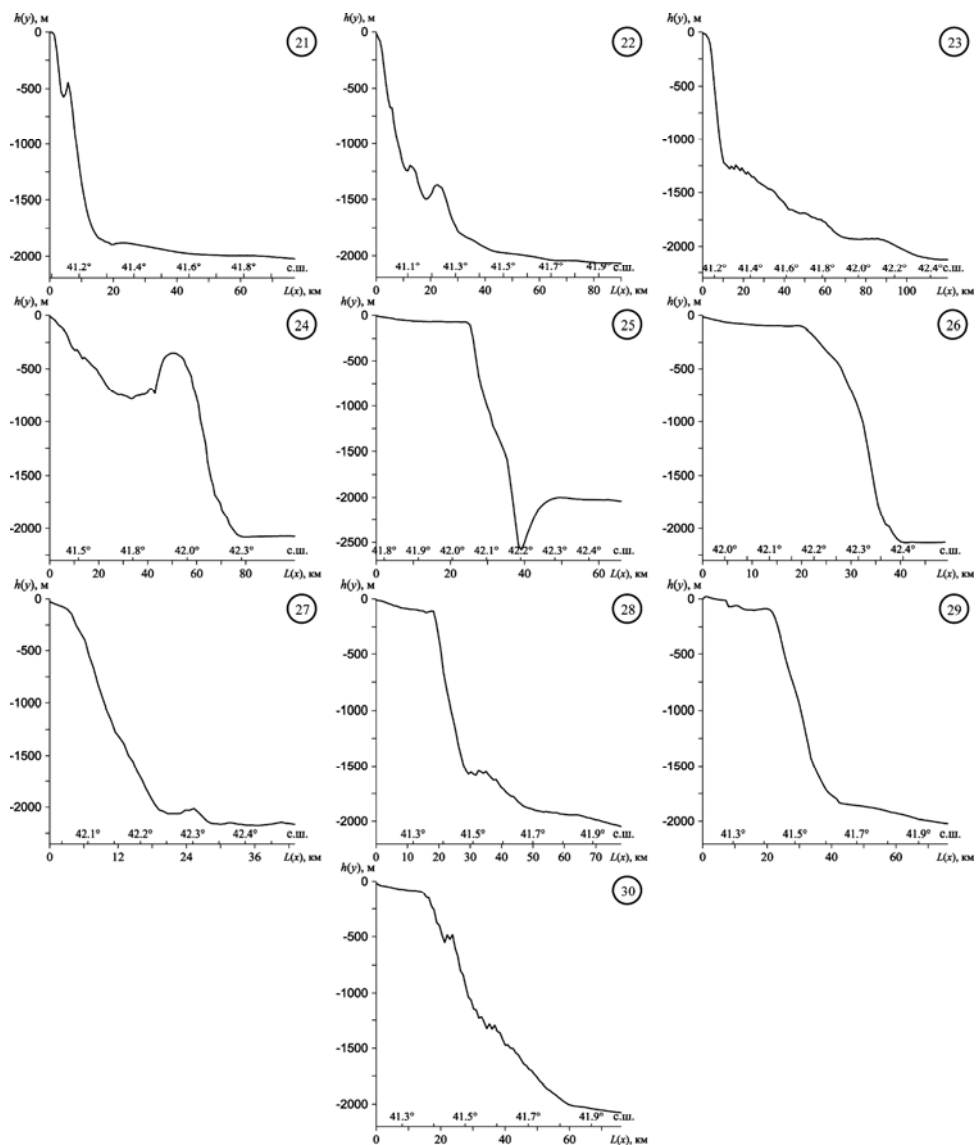


Рис. 4. Профили рельефа дна для десяти местоположений в районе Анатолийского побережья, показанных числами в кругах на рис.3.

второй моды. В этом случае длина волны и фазовая скорость растут как при увеличении ширины шельфа, так и при увеличении ширины склона. У волн второй моды первая узловая линия расположена над шельфом, вторая – над континентальным склоном вблизи кромки шельфа. На профилях дна, у которых ширина шельфа сравнима или меньше ширины склона, максимум наблюдается у берега.

Нулевой волновой режим захваченных волн представляет собой гибридную волну, объединяющую свойства волны Кельвина и волны Стокса в определенной частотной области, когда существенны как вращательные, так и топографические эффекты. В экспериментах с реальной топографией полу-

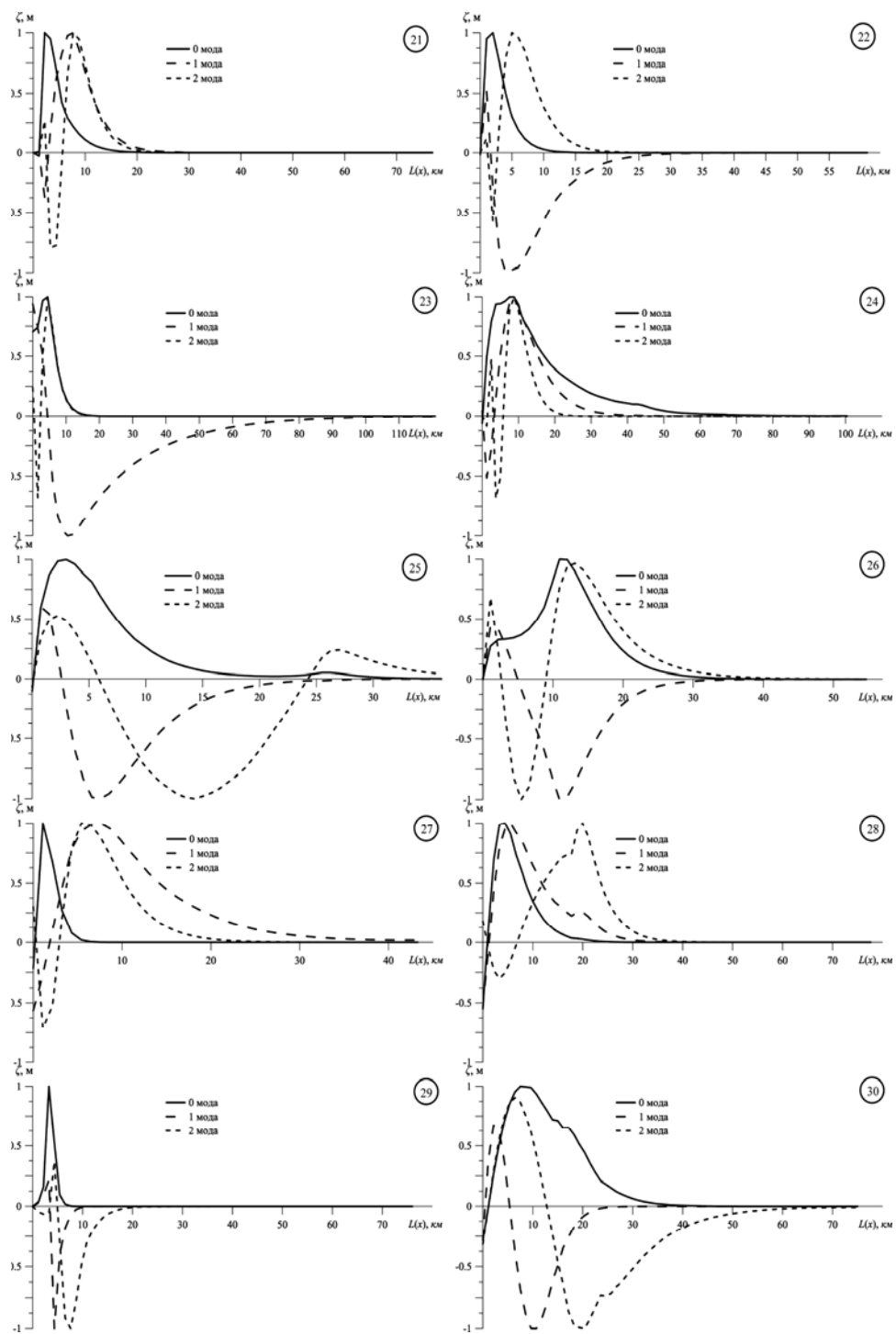


Рис. 5. Амплитудные функции $\zeta(x)$ нулевой, первой и второй моды для десяти местоположений в районе Анатолийского побережья, показанных числами в кругах на рис.3.

чено, что профиль шельфовых волн определяется прежде всего топографией шельфа и в меньшей степени – материкового склона. Максимальная амплитуда отмечается вблизи кромки шельфа. Ширина материкового склона практически не влияет на амплитуду шельфовых волн.

Роль геометрии склона возрастает для волн второй моды. В этом случае длина волны и фазовая скорость растут как при увеличении ширины шельфа, так и при увеличении ширины склона. Радиус захвата соответствует ширине зоны переменных глубин. У волн второй моды первая узловая линия ζ расположена над шельфом, вторая – над континентальным склоном вблизи кромки шельфа. На профилях дна, у которых ширина шельфа сравнима или меньше ширины склона, максимум ζ наблюдается у берега. в случае, когда ширина шельфа превосходит ширину склона, максимум ζ смещается от береговой линии. В результате этого волны второй моды более чувствительны к изменениям геометрии шельфа по сравнению с волнами первой моды.

В **заключении** сформулируем основные результаты проведенной работы. Нулевой волновой режим захваченных волн объединяет свойства волны Кельвина и волны Стокса. На достаточно широком шельфе эти волны существуют в пределах полусуточных частот, а и их групповая скорость может стать нулевой. Установлено, что групповая скорость волны 12 ч близка к нулю при ширине шельфа 300 км. В экспериментах с реальной топографией получено, что профиль шельфовых волн определяется, прежде всего, топографией шельфа и в меньшей степени – материкового склона. Максимальная амплитуда отмечается вблизи кромки шельфа. Ширина материкового склона практически не влияет на амплитуду шельфовых волн.

Работа выполнена в рамках НИР № 0827-2014-0010 «Фундаментальная океанология».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ефимов В.В., Куликов Е.А. и др.* Волны в пограничных областях океана.– Л.: Гидрометеиздат, 1985.– 280 с.
2. *Ле Блон П., Майсек Л.* Волны в океане. Т.1 / Пер. с англ.– М.: Мир, 1981.– 480 с.
3. *Mysak L.A.* Recent advances in shelf wave dynamics // *Rev. Geophys. Space Phys.*– 1980.– v.18, № 1.– P.211-241.
4. *Munk W.H., Snodgrass F.E. et al* Tides off shore: Transition from California coastal to deep-sea waters // *Geophys. Fluid Dyn.*– 1970.– v.1.– P.161-235.
5. *Gill A.E.* Atmosphere-Ocean Dynamics.– Academic Press, 1982.– 662 p.
6. *Ke Z., Yankovsky A.E.* The hybrid Kelvin-edge wave and its role in tidal dynamics // *J. Phys. Oceanogr.*– 2010.– № 40.– P.2757-2767.
7. *Huthnance J.M.* On trapped waves over a continental shelf // *J. Fluid. Mech.*– 1975.– № 69.– P.689-704.
8. *Yankovsky A.E.* Large-scale edge waves generated by hurricane landfall // *J. Geophys. Res.*– 2009.– v.114.– P.1-13.
9. *Блатов А.С., Булгаков Н.П. и др.* Изменчивость гидрофизических полей Черного моря.– М.: Гидрометеиздат, 1984.– 240 с.
10. *Блатов А.С., Иванов В.А.* Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря.– Киев: Наукова думка, 1992.– 244 с.

V.A.Ivanov, T.Ya.Shulga, T.V.Plastun

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF BOTTOM RELIEF ON THE OF SHELF
WAVE PARAMETERS NEAR THE ANATOLIAN COAST OF THE BLACK SEA

The influence of bottom relief on the spacial and temporal parameters of barotropic trapped waves is studied in the framework of linear shallow water equations. The continental shelf under study consists of sections of various widths, shared by normals to the shoreline to study in detail. The calculations were showed that the topography of continental shelf influences on the spatial scale of shelf waves, while the group velocity reaches a minimum at the intermediate wave numbers. An increase in the width of continental slope leads to lower decay of wave to the open sea. It is shown that the waves of the second mode are more sensitive to the shelf geometry changes compared to the waves of the first mode.

KEYWORDS: Kelvin wave, phase velocity, shelf, barotropic trapped waves, continental slope