

З.Н. АЛЬТМАН, А.Е. БУКАТОВ,
А.Д. ПУХТЯР, Л.В. ЧЕРКЕСОВ

Влияние некоторых составляющих водного баланса Черного моря на внутренние волны

ЗАВИСИМОСТЬ внутренних волн в центральной части Черного моря от стока речных вод изучалась в [2]. Исследование внутренних волн с учетом вертикальной турбулентной диффузии в предположении отсутствия потока массы через свободную поверхность проведено для прибрежной зоны в статье [4].

В настоящей работе рассматривается влияние речного стока и потока массы через свободную поверхность на внутренние волны в прибрежной зоне моря.

Анализ зависимости внутренних волн в прибрежной зоне от речного стока проведем, исходя из системы уравнений движения

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial u}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial u}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial u}{\partial z} + f v &= -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \mu \Delta_h u, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial v}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial v}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial v}{\partial z} - f u &= -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \mu \Delta_h v, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial w}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial w}{\partial y} - g \frac{\rho}{\bar{\rho}} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \mu \Delta_h w,$$

уравнения неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

уравнения диффузии плотности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \rho}{\partial z} = \nu_p \Delta_h \rho \quad (3)$$

и условий

$$\rho + \rho g z = \rho_0 \quad \text{при} \quad z=0, \quad w=0 \quad \text{при} \quad z=H, \quad (4)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial z}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial z}{\partial y} = w \quad \text{при} \quad z=0. \quad (5)$$

Здесь ρ и ρ — возмущения давления и плотности под влиянием движения; u, v, w — горизонтальные и вертикальная составляющие вектора скорости волнового возмущения; $\bar{u}, \bar{v}, \bar{\rho}, \bar{\nu}_p, \mu$ — средние распределения по глубине в невозмущенном состоянии составляющих скорости течения, плотности, коэффициентов горизонтальной турбулентной диффузии и

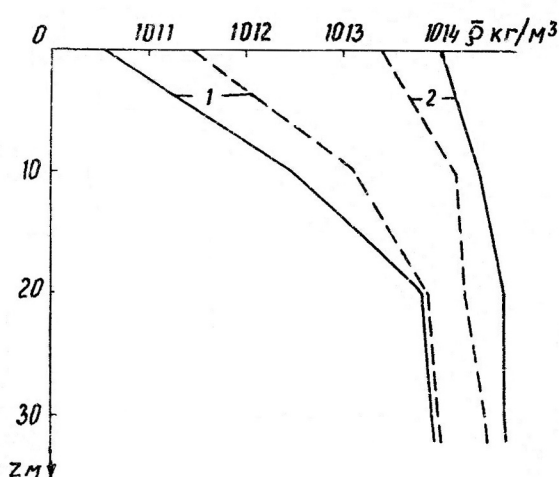


Рисунок. Среднегодовые (1) и среднесезонные (2) распределения плотности по глубине в 1970 г. (—) и 1973 г. (---)

Рассмотрим два экстремальных по водности года за 1965–1975 гг.: 1970 г. с наибольшим ($431,6 \text{ км}^3$) и 1973 г. с наименьшим ($287,4 \text{ км}^3$) объемом стока [1, 2]. Среднесезонные и среднегодовые распределения плотности по глубине для этих лет, построенные по значениям на стандартных горизонтах 0, 10, 20, 30 м путем линейной интерполяции, представлены на рисунке. Глубина в районе наблюдений составляла $\sim 32 \text{ м}$.

Видно, что уменьшение речного стока привело к увеличению значений среднегодовой плотности. Особенно значительны они в верхнем двадцатиметровом слое. Среднесезонная плотность морской воды зимой при уменьшении годового речного стока не увеличилась. В 1970 г. ее значения на всех горизонтах оказались большими, чем в 1973 г.

Аналогично работе [2], сведем задачу (1)–(5) к системе двух обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка для вертикальной составляющей скорости при соответствующих граничных условиях и решим ее численно. Расчеты выполним для $\bar{\rho}(z)$ из рисунка при характерных распределениях скорости течения, горизонтальной турбулентной диффузии и вязкости [3, 5]. При этом положим, что $A_0 = 100 \text{ Па}$, а длина λ и период T волны давлений изменяются в пределах $5H \leq \lambda \leq 30H$; $0,14 \leq T \leq 1,5 \text{ ч}$.

Результаты расчетов для среднегодовой плотности приведены в табл. 1, а для среднесезонной зимней плотности в табл. 2. Здесь k – номер моды внутренних волн; T_k – период соответствующей моды; $L = \lambda/H$; A_k^* , A_k , B_k – максимальные по глубине значения амплитуды, вертикальной и продольной составляющих волновой скорости. В скобках приведены глубины (м), на которых достигаются соответствующие

вязкости; f – параметр Кориолиса; z – отклонение свободной поверхности от невозмущенного состояния; $H = \text{const}$ – глубина неограниченного в горизонтальных направлениях бассейна; $\rho_0 = A_0 \exp[i(m\chi + ny - \delta t)]$ – возмущения атмосферного давления; ось z направлена вертикально вниз.

За исходные примем данные гидрологических наблюдений в северо-западной части Черного моря, так как наиболее значительные изменения плотности воды под влиянием речного стока наблюдаются в мелководных, и осо-

Таблица 1
Характеристики внутренних волн, рассчитанные по среднегодовым гидрологическим данным

L	k	τ_k ч		$A_k \cdot 10^5$ м/с		$B_k \cdot 10^3$ м/с		A_k^* м	
		1970 г.	1973 г.	1970 г.	1973 г.	1970 г.	1973 г.	1970 г.	1973 г.
5	1	0,12	0,20	87,3(15)	48,7(12,5)	1,6(10)	1,3(0,5)	0,060	0,056
	2	0,18	0,25	43,0(19,5)	8,0(18)	1,7(12,5)	0,3(12,5)	0,044	0,011
	3	0,22	-	9,8(22)	-	0,6(8,5)	-	0,012	-
	4	0,24	-	4,6(23,5)	-	0,3(5,5)	-	0,006	-
10	1	0,23	0,39	105,0(15)	58,0(12,5)	5,0(1)	3,0(0)	0,140	0,130
	2	0,36	0,50	35,0(19)	8,8(18)	2,9(12)	0,6(9,5)	0,072	0,025
	3	0,43	0,56	7,0(22)	2,2(20)	0,8(8)	0,3(6,5)	0,017	0,007
	4	0,48	0,59	3,4(24)	1,2(20)	0,5(6)	0,2(0)	0,010	0,004
	5	0,52	0,61	2,8(25)	0,6(21)	0,4(9,5)	0,1(0,5)	0,008	0,002
20	1	0,45	0,77	185,4(14,5)	28,2(12,5)	13,3(5)	2,8(8)	0,478	0,124
	2	0,71	1,00	15,5(19,5)	15,5(18,5)	2,5(12,5)	2,1(9,5)	0,063	0,088
	3	0,87	1,10	7,3(22)	2,0(20)	1,7(8,5)	0,5(6)	0,036	0,013
	4	0,97	1,17	4,2(24)	1,1(20)	1,1(11,5)	0,4(8,5)	0,023	0,008
	5	1,08	1,20	1,6(25)	0,9(20)	0,5(8)	0,04(9,5)	0,010	0,007
	6	1,11	-	1,7(25,5)	-	0,7(9,5)	-	0,011	-
30	1	0,67	1,16	164,0(14,5)	27,0(13)	17,5(0)	4,1(0)	0,630	0,18
	2	1,07	-	50,0(19,5)	-	12,3(12,5)	-	0,306	-
	3	1,29	-	6,9(21,5)	-	2,4(8)	-	0,051	-

Таблица 2
Характеристики внутренних волн, рассчитанные по среднесезонным гидрологическим данным

L	k	τ_k ч		$A_k \cdot 10^5$ м/с		$B_k \cdot 10^3$ м/с		A_k^* м	
		1970 г.	1973 г.	1970 г.	1973 г.	1970 г.	1973 г.	1970 г.	1973 г.
5	1	0,16	0,17	118,0(8,5)	35,2(12)	3,7(5)	1,0(1)	0,108	0,034
	2	0,21	0,23	11,0(21,5)	10,7(17,5)	0,3(30)	0,4(10)	0,013	0,014
	3	0,24	0,26	8,9(3,5)	3,9(19)	0,8(6,5)	0,3(0,5)	0,012	0,006
	4	0,27	0,28	2,8(2)	1,9(19,5)	0,4(0)	0,2(0,5)	0,004	0,003
10	1	0,31	0,34	160,0(8,5)	67,0(12)	9,8(0)	3,4(0)	0,284	0,123
	2	0,42	0,45	11,5(21)	21,3(17,5)	0,7(30)	1,5(9,5)	0,028	0,055
	3	0,48	0,51	6,4(3,5)	5,4(18,5)	1,1(8,5)	0,7(6)	0,018	0,016
	4	0,54	0,56	2,0(2,5)	1,4(19,5)	0,6(5)	0,3(8,5)	0,006	0,005
20	1	0,62	0,64	66,2(8,5)	113,0(12)	8,2(0)	11,6(0)	0,240	0,410
	2	0,85	0,89	11,8(21,5)	11,6(17,5)	1,5(30)	1,6(9,5)	0,057	0,060
	3	0,95	1,02	9,0(3)	5,9(19)	3,0(6,5)	1,7(6)	0,050	0,035
	4	1,07	1,15	2,0(2)	1,3(19,5)	1,1(8)	0,5(10)	0,012	0,009
	5	1,13	1,20	1,2(1,5)	0,5(19,5)	0,9(8,5)	0,4(9)	0,008	0,003
	6	1,17	-	0,7(13,5)	-	0,6(9)	-	0,005	-
30	1	0,92	0,96	66,0(3,5)	66,0(12)	12,0(0)	10,2(0)	0,348	0,363
	2	1,26	1,34	16,6(21,5)	11,2(17,5)	3,1(30)	2,4(9,5)	0,120	0,086

значения. Из данных табл.1 следует, что период фиксированной моды внутренних волн в год минимального речного стока больше, чем в год максимального стока. Для 1-й моды это увеличение составляет $\sim 70\%$. С ростом номера моды оно убывает, составляя для 5-й моды $\sim 11\%$. Первая мода является преобладающей как при максимальном, так и при минимальном стоке. Однако наибольшая амплитуда внутренних волн 1-й моды приходится на год максимального стока. Она составляет 0,83 м при $\lambda = 30 \text{ Н}$, $\tau_r = 0,67 \text{ ч}$. Максимальные амплитуды волн в 1970 г. расположены на больших глубинах, чем в 1973 г. Для 1-й моды эта глубина при большом стоке составляет 14,5-15 м, при малом 12-13 м, для 5-й моды - соответственно 25 м и 20-21 м. Максимальные значения горизонтальной волновой скорости достигаются на глубинах 0-12,5 м. Однако при малом стоке эти максимумы находятся ближе к поверхности, чем при большом стоке.

В зимний сезон также преобладает 1-я мода внутренних волн. Однако ее амплитуда в многоводный год может быть меньшей, чем в год минимального стока. Например, при $\lambda = 20 \text{ Н}$ в 1973 г. амплитуда 1-й моды примерно на 70 % больше, чем в 1970 г. Зимой в год минимального стока глубина залегания максимума амплитуды также может быть большей, чем в 1970 г. Периоды соответствующих мод внутренних волн, реализующихся в зимний сезон, для 1970 и 1973 гг. отличаются не более чем на 6 %.

Таким образом, вычисленные по среднегодовой плотности значения максимумов амплитуд мод внутренних волн и глубин залегания этих максимумов при большом стоке большие, чем при малом. Среднесезонные же значения максимумов амплитуд и глубин их расположения зимой в многоводный год могут быть меньшими, чем в год минимального стока.

Приведем результаты численного анализа влияния на внутренние волны такой части водного баланса, как испарение с поверхности моря. Исследование выполнено, исходя из системы (1) при $\mu = 0$ и уравнения неразрывности (2). Уравнение для плотности взято в виде

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} = \nu_v \Delta_h \rho + \nu_n \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2},$$

где ν_n - коэффициент вертикальной турбулентной диффузии. Учет вертикальной турбулентной диффузии кроме граничных условий (4), (5) требует еще двух условий

$$\nu_n \frac{\partial \rho}{\partial z} = q_0 \exp [i (m x + n y - \sigma t)] \quad \text{при} \quad z=0,$$

$$\rho(x, y, z, t) = 0 \quad \text{при} \quad z=H.$$

Первое из них характеризует существование турбулентного потока массы через свободную поверхность моря, опреде-

ляемого функцией $Q = Q_0 \exp[i(m x + n y - \sigma t)]$, а второе является следствием того, что отсутствует поток массы через горизонтальное дно ($z = H$). После сведения, аналогично работе [4], к системе двух обыкновенных дифференциальных уравнений четвертого порядка с действительными переменными коэффициентами для вертикальной составляющей скорости задача решалась численно методом Рунге-Кутты. Расчеты выполнены при Q_0 в диапазоне $0 - 3 \cdot 10^{-3}$ кг/м²с. Значение среднегодового испарения с водной поверхности в северо-западной части моря, согласно работе [6], равно $2,7 \cdot 10^{-5}$ кг/м²с (850 мм/год), период колебаний и длина волны давления - соответственно 0,2-2 ч, 10 H - 40 H.

Результаты расчетов показали, что изменение величины Q мало сказывается на характеристиках внутренних волн в рассматриваемом районе моря. Увеличение волновых скоростей за счет роста Q_0 составляет всего 1,8%. При этом периоды мод внутренних волн и глубины наиболее интенсивного волнового движения почти не меняются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтман Э.Н., Лабунская Л.С., Агарков А.К. Современный баланс пресных вод северо-западного района Черного моря - В кн.: Гидрология и гидрохимия южных морей. - Тр. ГОИН. Вып. 145. - М., 1978, с. 3-15.
2. Альтман Э.Н., Букатов А.Е., Пухтяр Л.Д., Черкесов Л.В. Влияние речного стока на внутренние волны в Черном море. - Тр. ГОИН. Вып. 168. - М., 1983, с. 12-18.
3. Комплексные океанографические исследования Черного моря Богуславский С.Г., Ефимов В.В., Черкесов Л.В. и др. - Киев: Наук. думка, 1980. - 240 с.
4. Букатов А.Е., Пухтяр Л.Д., Черкесов Л.В. Влияние вертикальной диффузии плотности на внутренние волны. - В кн.: Теоретическое моделирование волновых процессов в океане. Севастополь, 1982, с. 98-106.
5. Букатов А.Е., Ерыго Г.Г., Пухтяр Л.Д., Черкесов Л.В. Внутренние волны в прибрежной зоне Черного моря. - В кн.: Комплексные гидрофизические и гидрохимические исследования Черного моря. Севастополь, 1980, с. 22-32.
6. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 6. Вып. 2. - Л.: Гидрометеоздат, 1971. - 654 с.