

УДК 551.46: 532.59

А.Е. Букатов, Д.Д. Завьялов

Эволюция начального смещения участка свободной поверхности в Азовском море

На основе уравнений движения мелкой воды методом конечных элементов выполнено исследование эволюции в Азовском море начально-локализованного возмущения уровня в Таганрогском заливе и у Керченского пролива. Выявлены региональные особенности распределений высоты смещений уровня и времени прихода максимально высокой и низкой воды от рассматриваемых начально-локализованных возмущений в пунктах морского побережья вдоль его периметра.

Введение

Гидродинамические процессы в Азовском море представляют не только научный, но и прикладной интерес для решения задач экологии бассейна, морского транспорта и хозяйственной деятельности в прибрежных зонах моря, а также при освоении морских ресурсов. Их изучению посвящено значительное количество работ, в которых, в частности, выполнен анализ результатов экспериментальных наблюдений динамического состояния вод [1 – 3], проведены теоретические исследования сейшевых [4] и сгонно-нагонных колебаний [5, 6].

В данной работе на основе уравнений движения мелкой воды методом конечных элементов выполнено исследование эволюции в Азовском море начально-локализованного возмущения уровня в Таганрогском заливе и у Керченского пролива. Выявлены региональные особенности вертикальных смещений уровня в пунктах морского побережья вдоль его периметра.

Постановка задачи

За основу математической модели, описывающей динамику воды в Азовском море, приняты проинтегрированные по вертикали уравнения движения мелкой воды, записанные через две компоненты горизонтального потока количества жидкости $q_{1,2}$ и сумму $H = \zeta + h$ отклонения свободной поверхности ζ от невозмущенного уровня и глубины h бассейна [7, 8]:

$$\frac{\partial q_1}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_1^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_1 q_2}{H} \right) \right] = B_1, \quad \frac{\partial q_2}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_1 q_2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_2^2}{H} \right) \right] = B_2,$$
$$B_1 = f q_2 + \gamma^2 \rho_a W^2 \cos \theta - \left(\frac{g}{C^2} \right) \frac{1}{\rho} \frac{q_1 (q_1^2 + q_2^2)^{1/2}}{H^2} - \rho g H \frac{\partial (H - h)}{\partial x} - H \frac{\partial P_a}{\partial x}, \quad (1)$$
$$B_2 = -f q_1 + \gamma^2 \rho_a W^2 \sin \theta - \left(\frac{g}{C^2} \right) \frac{1}{\rho} \frac{q_2 (q_1^2 + q_2^2)^{1/2}}{H^2} - \rho g H \frac{\partial (H - h)}{\partial y} - H \frac{\partial P_a}{\partial y}.$$

© А.Е. Букатов, Д.Д. Завьялов, 2008

Уравнение неразрывности имеет вид

$$\frac{\partial q_1}{\partial x} + \frac{\partial q_2}{\partial y} + \frac{\partial(\rho H)}{\partial t} = 0. \quad (2)$$

Здесь $q_1 = \rho \int_{-h}^{\zeta} v_x dz$, $q_2 = \rho \int_{-h}^{\zeta} v_y dz$ (v_x , v_y – мгновенные скорости жидких частиц); g – ускорение силы тяжести; f – параметр Кориолиса; C – коэффициент трения (или коэффициент Шези); γ – коэффициент ветрового напряжения; W – скорость ветра; θ – угол между осью x и направлением ветра; P_a – атмосферное давление на поверхности воды; ρ и ρ_a – плотность воды и воздуха соответственно. Для решения полученной системы дополним ее граничными и начальными условиями. Втекающие по горизонтали потоки не моделировались. На границе расчетной области задавалось условие непротекания

$$q_n = 0. \quad (3)$$

Начальные условия принимались в виде:

$$H(x, y, t) = H_0, \quad q_1(x, y, t) = q_{01}, \quad q_2(x, y, t) = q_{02}, \quad t = 0. \quad (4)$$

Применяя к (1) – (4) процедуру метода взвешенных невязок [7], получим конечно-элементную формулировку поставленной задачи. Общая система дифференциальных уравнений для всей расчетной области, объединяющая записанные для каждого ее элемента уравнения, приводится к виду

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{L}} = \mathbf{F}(\mathbf{L}_0). \quad (5)$$

Здесь \mathbf{M} – матрица массы для всей области, $\dot{\mathbf{L}}$ – производные по времени от массового расхода и возвышения поверхности во всех узлах расчетной сетки. Все другие члены включены в \mathbf{F} и вычисляются при $t = t_0$ или, при использовании итераций, в конце временного шага по предыдущей итерации. Для интегрирования по времени уравнения (5) применялся метод трапеций.

На основе построенной конечно-элементной модели выполнены численные эксперименты эволюции в Азовском море начального смещения участка свободной поверхности как при отсутствии, так и при попутном и встречном ветрах. Расчеты осуществлялись на сетке конечных элементов, представленной в работе [9]. Коэффициент придонного трения рассчитывался по формуле $C = \kappa^2 / \ln^2(H/z_0)$, где $\kappa = 0,4$ – постоянная Кармана, $z_0 = 0,01$ – параметр шероховатости донной поверхности [10]. Параметр Кориолиса f , определенный для 46° с.ш., равнялся $1,046 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Шаг по времени Δt принимался равным 200 с в соответствии с критерием $\Delta t < \frac{1}{\sqrt{2}} \Delta x (gh)^{-1/4}$.

Топография трех рассмотренных вариантов начальных смещений уровня показана на рис.1. Вариант I моделирует случай распространения в акватории возмущений от высокой воды, пришедшей со стороны Таганрогского залива. Одной из причин такого явления, в частности, может быть сброс воды из Цимлянского водохранилища. Варианты II и III отвечают случаям распространения начального возмущения, возникающего у Керченского пролива.

Рассматривались начальные смещения уровня как непосредственно у выхода из него (поднятие по линии, соединяющей противоположные берега пролива, – вариант II), так и в самом Азовском море вблизи пролива (кулолообразное поднятие уровня на расстоянии ~ 11 км от выхода из пролива – вариант III). Изолинии на рис. 1 проведены через интервал 0,2 м.



Рис. 1. Топография начальных поднятий свободной поверхности

Анализ результатов

Расчеты, проведенные для вариантов I – III при отсутствии ветра, выявили региональную особенность распределения возмущений, обусловленных заданным типом начального смещения. В случае варианта I первая высокая вода (заметное повышение уровня) наблюдалась сначала вблизи Приморска, а затем у противоположного южного побережья в районе Темрюка и м. Зюк. Далее возвышение уровня происходит у восточного (Приморско-Ахтарск) и северо-западного (Степановка) берегов. Последним отреагирует на рассматриваемое начальное поднятие варианта I уровень воды у юго-западного (Каменское) и западного (Счастливцево) берега моря. Разница по времени между приходом первой высокой воды в районы Приморска и Счастливцево составила порядка 5,5 часа.

Как правило, максимальные отклонения уровня в рассматриваемых пунктах реализуются через некоторое время после прихода первой высокой воды. У северного и северо-западного побережья максимально высокая вода наблюдалась через 8 – 9 ч после первой высокой воды, тогда как на юге, в районе м. Зюк, величина этого временного интервала составила 26 – 27 ч. Следует отметить, что в Темрюкском заливе первая высокая вода, пришедшая примерно через 4 ч после начала распространения возмущения из Таганрогского залива, и была максимальной.

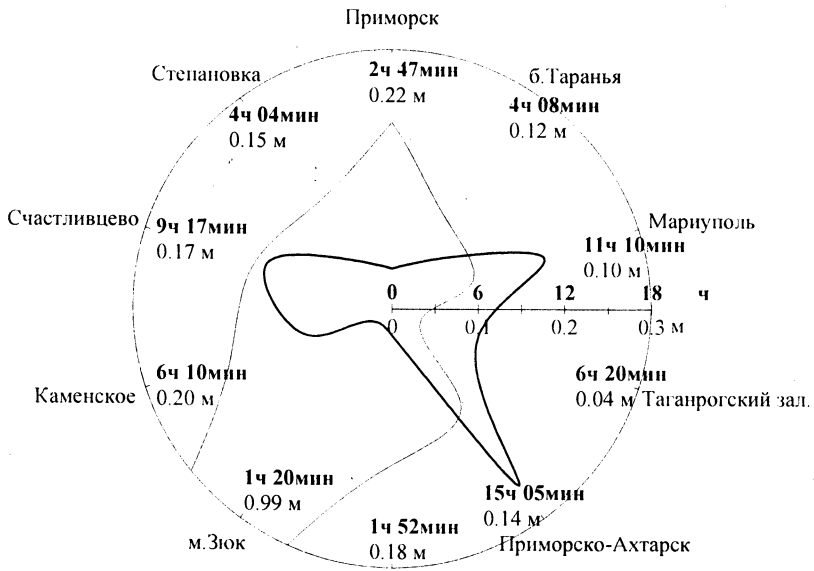
Абсолютные значения возвышения свободной поверхности, конечно же, будут зависеть от величины начального поднятия. Для рассмотренного случая общий объем воды, находящейся в начальный момент времени выше невозмущенного уровня, составлял 6 км³. Амплитуды первых и максимальных воз-

вышений по районам моря, а также время их реализаций, отсчитанное от начального расчетного момента, представлены в таблице. Видно, что амплитуда первой высокой воды на западном, восточном и южном побережья достигает 70 – 100% от максимальной, реализуемой в этих районах. На севере (Приморск) и юго-западе (Каменское) моря это соотношение амплитуд составляет порядка 50%, на северо-западе (Степановка) – лишь 40%.

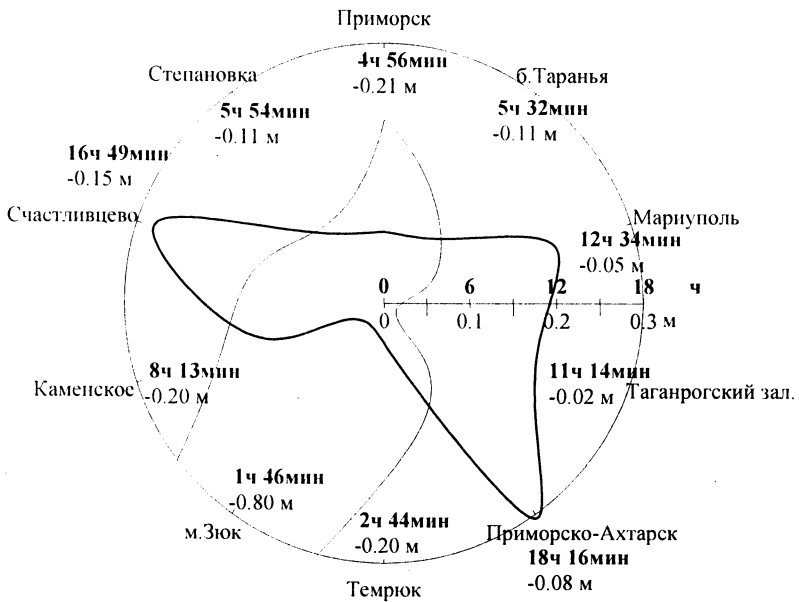
Амплитуды первых и максимальных возвышений в прибрежных районах моря, а также время их реализаций, отсчитанное от начального расчетного момента для варианта I

Пункты побережья	t_1	$\xi_{1-см}$	t_{max}	$\xi_{max-см}$	Δt	ξ_1/ξ_{max}
Приморск	3 ч 05 мин	10	12 ч 40 мин	20	9 ч 35 мин	0.5
Степановка	5 ч 45 мин	8	13 ч 50 мин	20	8 ч 05 мин	0.4
Счастливецво	8 ч 40 мин	19	27 ч 40 мин	22	19 ч	0.86
Каменское	6 ч 55 мин	11	30 ч 20 мин	22	23 ч 25 мин	0.5
М. Зюк	4 ч 25 мин	13	31 ч	18	26 ч 35 мин	0.72
Темрюк	3 ч 50 мин	21	–	–	0	1.0
Приморско-Ахтарск	5 ч 20 мин	20	19 ч 25 мин	21	14 ч 05 мин	0.95

Эволюцию начального смещения свободной поверхности, образовавшегося вблизи Керченского пролива, характеризуют распределения возвышений уровня вдоль морского берега, представленные на рис. 2, 3 для вариантов II, III соответственно. Длина радиус-вектора от центра окружностей до точек на тонких линиях характеризует максимумы возвышений (рис. 2, а; 3, а) и понижений (рис. 2, б; 3, б) уровня. Интервал изменения амплитуд отклонений уровня, отмеченный на рисунках цифрами ниже полярных осей, составляет 0 – 0,3 м. Расстояние от центра до жирных линий показывает время наступления максимально высокой (рис. 2, а; 3, а) и низкой (рис. 2, б; 3, б) воды. Временной интервал (0 – 18 ч), отсчитываемый от момента начала распространения возмущения заданного характера, обозначен на рисунках жирными цифрами выше полярных осей. Видно, что характерной для обоих вариантов чертой временной реализации максимально высокой воды является поднятие уровня сначала непосредственно вблизи очага начального возмущения (м. Зюк, Темрюк), а затем – у противоположного северного берега (Приморск). Дальнейшее распространение возмущений, вызванных начальными поднятиями уровня, для вариантов II и III имеет свои особенности. В случае варианта II максимально высокая вода придет сначала к северо-восточному и северо-западному берегам (примерно через 4 ч), затем (примерно через 6 ч) – в район Каменского и в Таганрогский залив и далее – последовательно по линии Счастливецво – Мариуполь – Приморско-Ахтарск. Для варианта III последовательность наступления высокой воды будет такой: сначала (через 3 – 4 ч) Каменское – бух. Таранья, затем (через 6 ч) Счастливецво – Приморско-Ахтарск и далее – у пунктов побережья вблизи Степановки, Мариуполя и Таганрога.

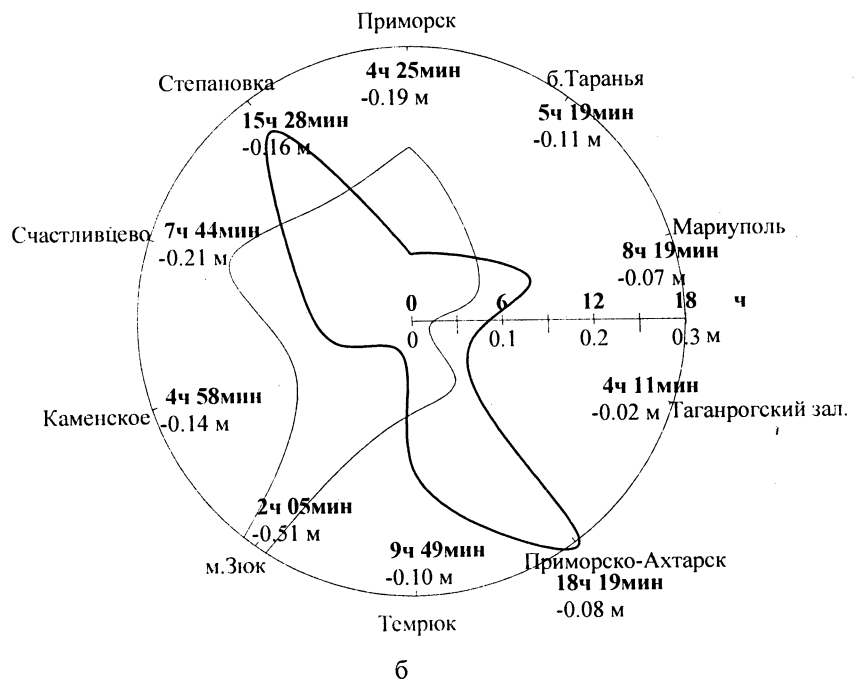
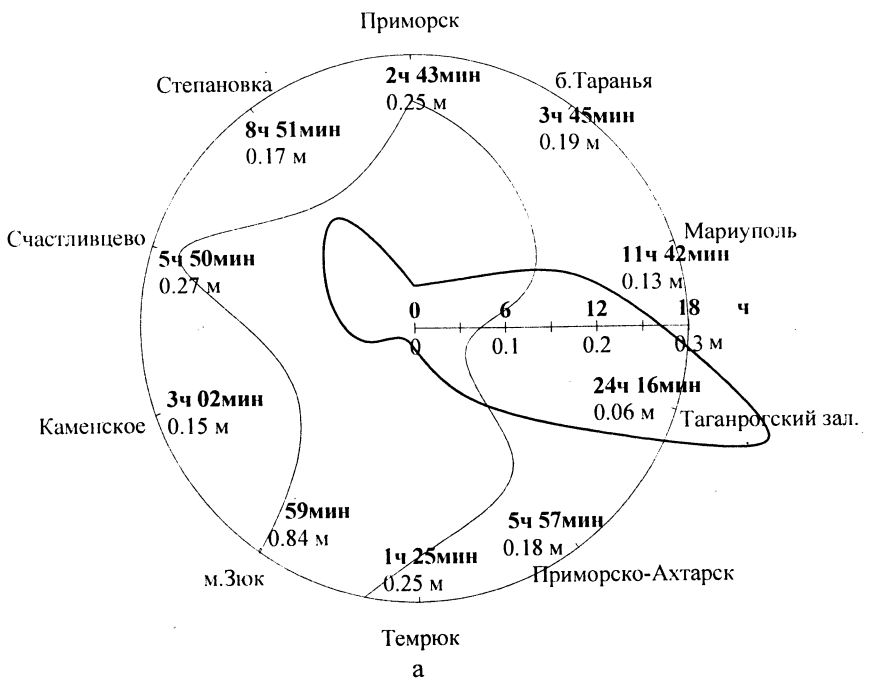


Темрюк
а



б

Р и с. 2. Максимальные возвышения – а и понижения – б уровня (тонкие линии), а также время наступления максимально высокой – а и максимально низкой – б воды (жирные линии) вдоль побережья Азовского моря для варианта II

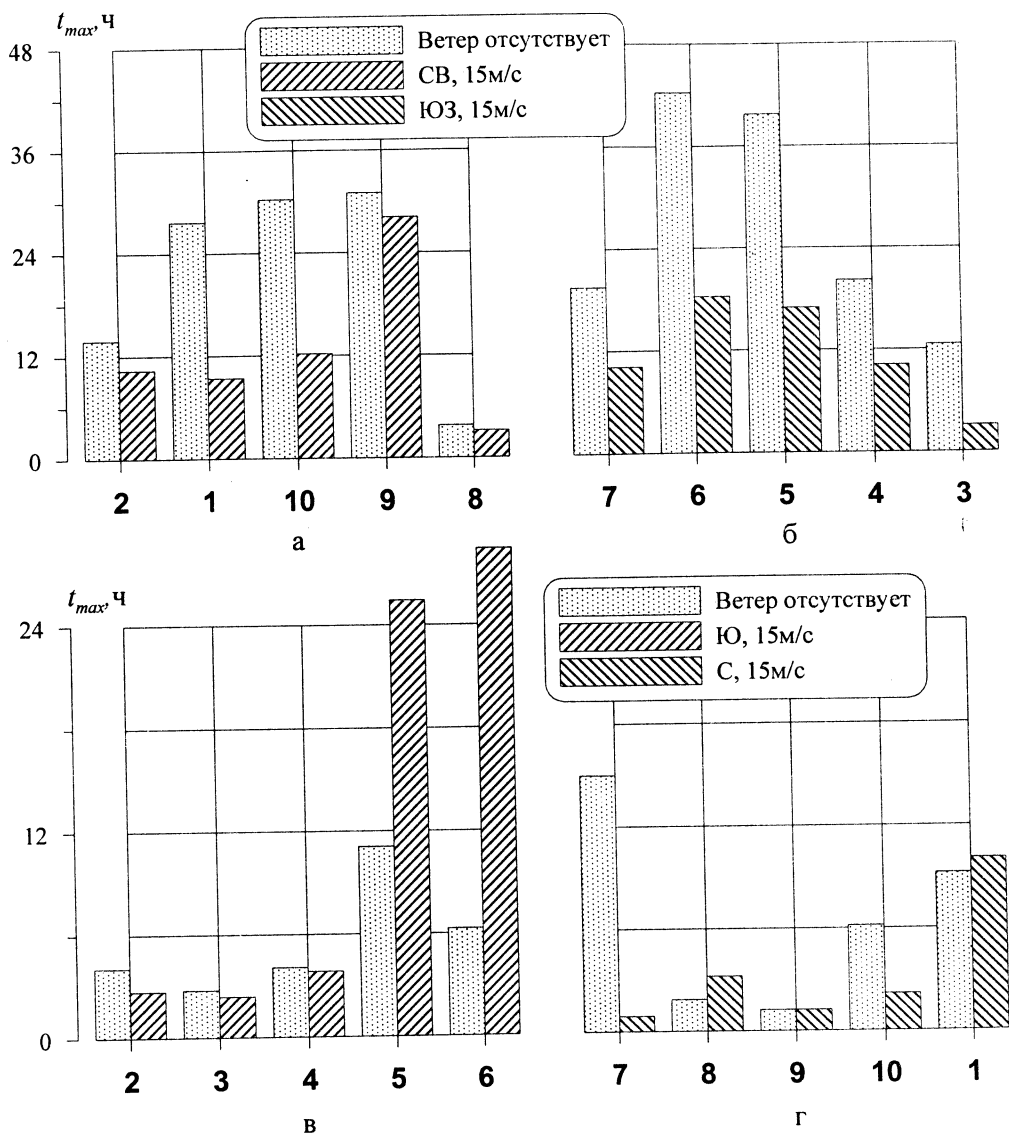


Р и с. 3. То же, что на рис. 2, для варианта III

Временные картины реализации максимально низкой (рис. 2, б; 3, б) и высокой (рис. 2, а; 3, а) воды в целом качественно сходны. Однако для варианта II следует отметить более существенное запаздывание максимального понижения уровня на северо-востоке в районе Таганрогского залива по сравнению с юго-западом, у Каменского (рис. 2, б). Напомним, что максимально высокая вода в этих районах наступала практически одновременно (рис. 2, а). В случае варианта III просматриваются некоторые отличия в форме временных диаграмм (рис. 3) для пунктов вблизи Таганрогского залива. Это объясняется тем, что первое по времени опускание уровня в этом районе и было самым глубоким (рис. 3, б) в отличие от максимального поднятия, реализующегося лишь через 4-5 колебаний (рис. 3, а).

Для вариантов II и III амплитуды отклонения уровня от невозмущенного состояния в северо-восточной части моря (Таганрогский залив) являются минимальными по сравнению с остальной акваторией. Наибольший размах колебаний поверхности при рассмотренных начальных смещениях для варианта II имеет место вблизи пунктов Приморск – Каменское – Темрюк, для варианта III – вблизи пунктов Счастливцево – Приморск – Темрюк (в порядке убывания). Отметим, что вблизи каждого из наиболее удаленных от очага начального смещения пунктов (Счастливцево, Мариуполь, Таганрогский залив) колебания уровня происходят практически синфазно для вариантов II и III.

Рассмотрим теперь влияние попутного (направленного от локализованного начального поднятия в сторону открытой части моря) и встречного (из открытой части в сторону начального поднятия уровня) ветров на характеристики возмущений, вызванных заданными начальными условиями. Воздействие ветра при распространении начального возмущения приводит к увеличению поднятия уровня со стороны наветренных и его опускания – со стороны подветренных берегов. Причем при наличии ветра для наветренных берегов максимальные поднятия реализуются, как правило, раньше, чем в случае распространения начального возмущения в безветренную погоду. Наибольшие смещения по времени максимумов поднятия наблюдаются, когда под воздействием достаточно сильного ветра они переходят из диапазона второго в диапазон первого максимума колебаний уровня для данного района при отсутствии ветра. Это иллюстрирует рис. 4, на котором приведены времена достижения максимальных поднятий уровня для подветренных берегов в условиях северо-восточного (рис. 4, а), юго-западного (рис. 4, б), южного (рис. 4, в) и северного (рис. 4, г) ветров скоростью 15 м/с. При этом случаю распространения начального возмущения варианта I соответствует рис. 4, а, б, варианта II – рис. 4, в, г. Цифрами вдоль горизонтальных осей указаны пункты побережья (см. рис. 1). Видно, что для волновых возмущений, вызванных начальным смещением варианта I (рис. 4, а, б), воздействие ветра существенно сокращает время реализации максимума амплитуды колебаний у наветренного берега практически для всех рассматриваемых пунктов. Исключение составляют районы Степановки и Темрюка, где и при северо-восточном ветре, и в случае безветренной погоды времена реализации максимальных поднятий мало отличаются от времени реализации первого максимума. В случае варианта II (рис. 4, в, г) в пунктах 5, 6 под воздействием ветра уровень практически монотонно повышается до своего максимального установившегося состояния, что обуславливает большие времена, изображенные на диаграмме.



Р и с. 4. Времена достижения максимальных поднятий уровня для подветренных берегов в условиях северо-восточного – а, юго-западного – б (начальное возмущение варианта I), а также южного – в и северного – г (начальное возмущение варианта II) ветров скоростью 15 м/с

Заключение

На основе построенной конечно-элементной гидродинамической модели выполнено исследование региональных особенностей колебаний уровня, вызванных начальным поднятием участка свободной поверхности в районе Таганрогского залива и Керченского пролива. Определены интервалы времени, через которые в заданном пункте побережья реализуются максимальные

подъем и опускание уровня. Показано, что в Темрюкском заливе первая высокая вода, наступившая после начала распространения возмущения из Таганрогского залива, является максимальной. В других пунктах побережья максимальные смещения реализуются через некоторое время после первой высокой воды. Максимальный отклик на возмущение у Керченского пролива имеет место в районе Приморска и Счастливецов. Воздействие северо-восточного ветра при распространении возмущений, вызванных начальным смещением варианта I, существенно сокращает время реализации максимума амплитуды колебаний уровня практически для всех рассматриваемых пунктов, расположенных вдоль наветренного берега.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Велокурова Н.И., Старов Д.К.* Гидрометеорологическая характеристика Азовского моря. – Л.: Гидрометеоздат, 1947. – 116 с.
2. *Белов В.П., Филипов Ю.Г.* Основные черты динамики вод Азовского моря и Керченского пролива // Труды ГОИН. – 1978. – Вып. 139. – С. 11 – 20.
3. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. V. Азовское море.* – С.-Пб.: Гидрометеоздат, 1991. – 236 с.
4. *Иванов В.А., Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В.* О сейшах Азовского моря // Метеорология и гидрология. – 1994. – № 6. – С. 105 – 110.
5. *Фомин В.В.* Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Научные труды УкрНИГМИ. – 2002. – Вып. 249. – С. 246 – 255.
6. *Иванов В.А., Коновалов А.В., Черкесов Л.В.* Влияние циклонов на изменение уровня поверхности Азовского и Черного морей // Метеорология и гидрология. – 2003. – №4. – С. 73 – 80.
7. *Коннор Дж., Бреббиа К.* Метод конечных элементов в механике жидкости. – Л.: Судостроение, 1970. – 269 с.
8. *Оден Дж.* Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. – М.: Мир, 1976. – 464 с.
9. *Букатов А.Е., Завьялов Д.Д., Соломаха Т.А.* Численное моделирование динамики Азовского моря при стогно-нагонных явлениях // Метеорология и гидрология. – 2006. – №6. – С. 69 – 75.
10. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A description of three-dimensional coastal ocean circulation model in Three-Dimensional Coast Ocean Models // Coast. Estuar. Sci. – 1987. – 4. – P. 1 – 16.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 01.09.06
После доработки 08.11.06

ABSTRACT Based on the equations of long waves the evolution of the initially localized level disturbances in the Taganrog Gulf and near the Kerch Strait in the Azov Sea is investigated by the method of final elements. Regional features of height distributions of the level displacements and the occurrence time of maximum high and low water differing from the considered initially localized disturbances in the points of the sea coast along its perimeter are revealed.