

**ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЯ СКОРОСТИ
ТЕЧЕНИЙ ЛОКАЛИЗОВАННЫМ
ПОДНЯТИЕМ УРОВНЯ
В АЗОВСКОМ МОРЕ**

А.Е. Букатов, Д.Д. Завьялов

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: ocean@alpha.mhi.iuf.net

В данной работе на основе уравнений движения мелкой воды методом конечных элементов выполнено исследование эволюции в Азовском море возвышения уровня, начально-локализованного в Таганрогском заливе. Выявлены региональные особенности распределений максимумов горизонтальных скоростей в пунктах морского побережья вдоль его периметра.

Постановка задачи. Рассмотрим поле скорости течений, формируемого в Азовском море при эволюции возвышения уровня, начально-локализованного в Таганрогском заливе. 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 [1]

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

Уравнение неразрывности имеет вид

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

где $q_1 = \rho \int_{-h}^{\zeta} v_x dz$; $q_2 = \rho \int_{-h}^{\zeta} v_y dz$; 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 моделируются. На границе расчетной области задаются условие непротекания

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

Начальные условия принимаются в виде

$$H(x, y, t) = H_0,$$

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

Применяя к (1)–(4) процедуру метода взвешенных невязок [1] 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) применяется метод трапеций.

На основе построенной конечно-элементной модели выполнены численные расчеты поля скорости волновых течений, формируемых при эволюции начально-локализованного в Таганрогском заливе смещения участка свободной поверхности.

Для рассмотренного случая общий объем воды, находящейся в начальный момент времени выше невозмущенного уровня, составляет 6 км³. Расчеты осуществлялись на сетке конечных элементов, представленной в работе [2]. 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. Параметр Кориолиса f , определенный для 46° с.ш., равнялся $1.046 \cdot 10^{-4}$ 1/с. Шаг по времени Δt принимался равным 180 с в соответствии с критерием

$$\Delta t < \frac{1}{\sqrt{2}} \Delta x (gh)^{-1/4}$$

Анализ результатов. Эволюция возмущения модуля горизонтальных волновых течений показана на рисунке 1. В качестве критерия прихода возмущения в ту или иную точку акватории принималась скорость более 1 см/с. Как показали расчеты, за первые 15–20 мин возмущения поля скорости охватывают на севере большую часть Бердянского залива, а на востоке доходят до северных границ Ясенского залива.

Примерно через час возмущения охватывают около половины акватории моря, дойдя на севере до Обиточной косы, а на юго-востоке, огибая область южнее Железнодорожной банки и примыкающей к побережью в районе Ачуевского, до восточных краев Темрюкского залива.

В последующий час распространение возмущений в западном направлении замедляется и наблюдается их продвижение от Обиточной косы на юг в направлении мыса Казантип. Далее эти возмущения в районе мыса Хрони смыкаются со своей юго-восточной ветвью, распространяющейся вдоль восточного и южного побережья.

В интервале времени между 2 и 3 часами после начала распространения площадь моря, охваченного возмущениями поля скорости от 1 до 5 см/с меняется незначительно. Свободной от возмущений остается лишь западная прибрежная часть моря. Вместе с этим растет интенсивность волновых течений. Видно, что через три часа уже примерно на половине акватории моря от восточной части Обиточного залива на севере до мыса Ахиллеон на юге амплитуды течений достигают значений 10–15 см/с.

Между 3 и 4 часами возмущения с амплитудами 1–5 см/с доходят до западных берегов, и после этого весь бассейн будет охвачен такими движениями еще около суток. В это же время (3–4 часа) скорость волновых течений с амплитудами 10–15 см/с не распространяется западнее Бердянского залива. Интенсификация горизонтальных течений происходит в направлении на юг и юго-запад и доходит до восточной части Арабатского залива, минуя прибрежную область от западного берега Керченского пролива до мыса Чаганы.

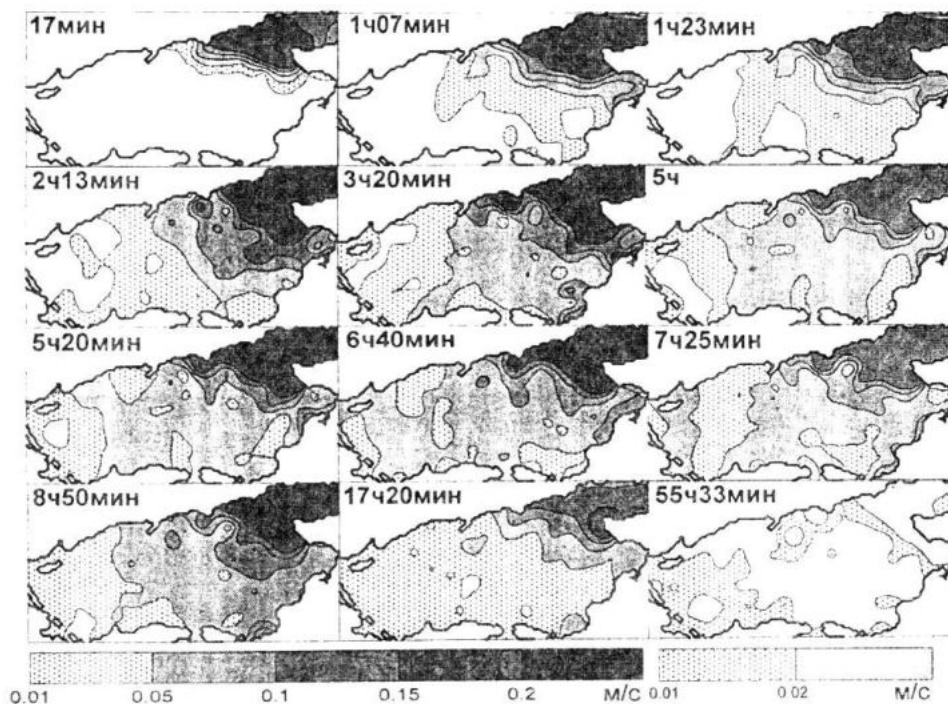


Рисунок 1 - Эволюция возмущения модуля горизонтальных волновых течений

В период между 4 и 5,5 часами картина меняется на противоположную – изолинии 5–10 см/с смещаются на запад около северного побережья, в то время как в южных областях структурных перестроений поля скорости не происходит.

Примерно через 7 часов интенсивность движений 5–10 см/с достигнет западного побережья. Дальнейшая эволюция будет характеризоваться медленным постепенным затуханием горизонтальных движений сначала в западной глубоководной области, а потом и у западного побережья. Примерно через сутки амплитуда скоростей во всем бассейне не будет превышать 5 см/с. Через двое с половиной суток свободной от горизонтальных движений будет вся центральная часть моря, а через трое – горизонтальные течения, вызванные начальным поднятием уровня в Таганрогском заливе, прекратятся.

На рисунке 2 показаны первый и абсолютный максимумы модуля скорости горизонтальных волновых течений вдоль побережья. Соотношение амплитуд первых и абсолютных максимумов для рассматриваемых районов отражают круговые диаграммы.

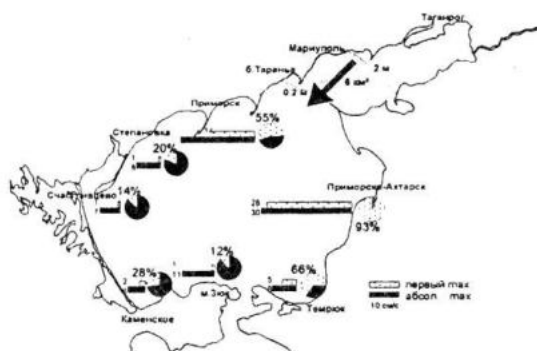


Рисунок 2 – Амплитуды первого и абсолютного максимумов горизонтальной волновой скорости, а также их соотношения вблизи пунктов вдоль побережья

Видно, что наибольшие скорости реализуются в северо-восточной и восточной областях, т.е. в областях, прилегающих к району начального возмущения. Следующая по величине амплитуда скорости будет наблюдаться на противоположном начальному возмущению южном берегу. Примерно одинаковые по величине амплитуды реализуются у северо-западного и юго-восточного побережья и самыми маленькими они будут в отдаленной юго-западной

части (Арабатский залив). Для удаленных по отношению к начальному возмущению северо-восточного, восточного и южного побережья амплитуда первого максимума не превышает 30 % от абсолютного, реализующегося в этих районах. В районах Приморска и Темрюка это соотношение составляет чуть более 50 %, а у Приморско-Ахтарска амплитуды первого и абсолютно-го максимума близки между собой.

Первыми по времени реализуются максимумы скоростей (рисунок 3) у северо-восточного (Бердянский залив) и восточного (Ясенский залив) берегов.



Рисунок 3 – Времена и очередность реализации первого (тонкая линия, меньшие цифры в кружках) и абсолютного (жирная линия, большие цифры в кружках) максимумов горизонтальной волновой скорости вблизи пунктов вдоль побережья

Затем в интервале от 5 до 9 часов – вдоль берега в направлении против часовой стрелки северо-запад (залив Обиточный), запад (Счастливецво), юг (м. Зюк) и юго-восток (Темрюк). Наиболее поздняя реализация максимума будет в районе Арабатского залива – почти в конце первых суток.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. – М.: Мир, 1976. – 464 с.
2. А.Е. Букатов, Д.Д. Завьялов, Т.А. Соломаха. Численное моделирование динамики Азовского моря при сгонно-нагонных явлениях// Метеорология и гидрология. – 2006. – № 6. – С. 69–75.