

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ НАН УКРАИНЫ



*100-летию со дня рождения основателя
Морского гидрофизического
института в г. Севастополе
профессору А.Г. Колесникову
посвящается*

**СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Средства, модели и мониторинг

Сборник научных трудов

Севастополь

2007

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

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

$$\text{где } q_1 = \rho \int_{-h}^{\zeta} v_x dz; \quad q_2 = \rho \int_{-h}^{\zeta} v_y dz; \quad v_x, v_y -$$

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

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

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 км^3 . 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 $1.046 \cdot 10^{-4} \text{ 1/с}$. 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 $15\text{--}20 \text{ мин}$ 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 Железинской банки и примыкающей к побережью в районе Ачуевского, до восточных окраин 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, по 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 в восточной части Обиточного залива на севере до мыса Ахиллеон на юге амплитуды течений достигают значений $10\text{--}15 \text{ см/с}$.

Между 3 и 4 часами возмущения с амплитудами $1\text{--}5 \text{ см/с}$ доходят до западных берегов, и после этого весь бассейн будет охвачен такими движениями еще около суток. В это же время ($3\text{--}4$ часа) скорость волновых течений с амплитудами $10\text{--}15 \text{ см/с}$ 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.

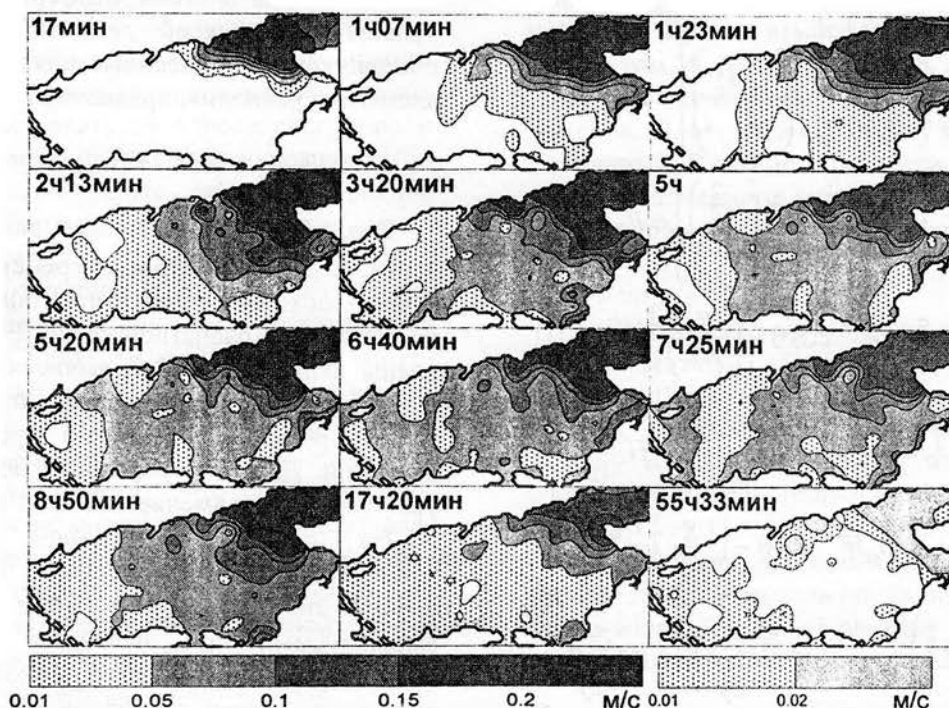


Рисунок 1 - Эволюция возмущения модуля горизонтальных волновых течений

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.

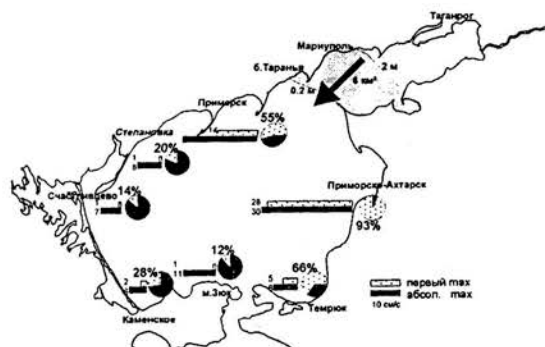


Рисунок 2 – Амплитуды первого и абсолютного максимумов горизонтальной волновой скорости, а также их соотношения вблизи пунктов вдоль побережья

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 абсолютного 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 (Счастьлицево), 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.