

Исследование влияния параметров барических образований на свободные и вынужденные колебания уровня и течения в Азовском море

© 2016 Л.В. Черкесов, Т.Я. Шульга

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
E-mail: shulgaty@mail.ru

Поступила в редакцию 14.04.2016 г. После доработки 19.05.2016 г.

Методом математического моделирования исследовано влияние неоднородных перемещающихся полей атмосферного давления на течения, свободные и вынужденные колебания уровня Азовского моря, вызываемые действием постоянного ветра. Проверена гипотеза о роли резонансного механизма в возникновении экстремально высоких амплитуд сгонно-нагонных колебаний и сейш, генерируемых перемещающимся барическим полем со скоростью, равной скорости свободной длинной волны. Установлено, что при одном и том же ветре перемещающиеся над акваторией Азовского моря барические возмущения вызывают вынужденные, а после прекращения их действия – свободные колебания с амплитудами, которые на 14% больше, чем полученные при постоянном атмосферном давлении. Показано, что перемещению барического фронта, скорость и время движения которого выбраны с учетом предположения о генерации волн с максимальными амплитудами, принадлежит важная, но не решающая роль при формировании структуры течений и колебаний уровня Азовского моря.

Ключевые слова: Азовское море, сигма-координатная модель, свободные колебания жидкости, сейши, стационарные течения, штормовые сгоны и нагоны, узловые линии, атмосферный фронт, скорость свободной длинной волны.

Введение. Колебания уровня и течений в морях и океанах формируются под действием различных внешних и внутренних сил, многообразие влияния которых приводит к образованию разномасштабных океанологических процессов с периодами от нескольких секунд до нескольких десятков лет. Важную роль в формировании экстремальных уровней и гидрологических процессов в прибрежной области Азовского моря имеют сгонно-нагонные, сейшевые и сейшеобразные колебания, представляющие собой волновые движения с периодами от нескольких часов до нескольких суток [1, 2]. При этом структура доминирующих продольных собственных колебаний такова, что их вершины приходятся на районы, расположенные вблизи крупных населенных пунктов [3, 4]. Поэтому представляет интерес изучение влияния сейшеобразных колебаний на формирование экстремальных амплитуд колебаний уровня и течений Азовского моря.

Частой причиной сейшеобразных колебаний в природных бассейнах является изменение атмосферного давления. Резкое изменение давления в различных частях водоема приводит в колебательное движение всю массу воды в нем. Сейши со значительной амплитудой возникают при явлении резонанса, когда период собственных колебаний бассейна совпадает с периодом вынуждающей силы. При этом относительно малые перепады давления на краях водоема и соответствующие им малые разности уровней вызывают значительные сейши. Барический фронт, двигаясь над водной поверхностью со

скоростью, близкой к скорости свободной длинной волны, формирует экстремальные нагоны и сгоны, переходящие после прекращения действия атмосферных возмущений в сейши с большой амплитудой.

Поведение волн в области атмосферных фронтов начали изучать сравнительно недавно, и практического опыта прогнозирования свободных и вынужденных колебаний в этих условиях пока еще недостаточно [5 – 7]. В настоящее время исследование динамики вод природных морских бассейнов под действием мезомасштабных атмосферных процессов относят к числу наиболее важных [8, 9]. Изучение сейшеобразных колебаний в Азовском море и анализ данных натурных наблюдений проведены в [3]. Сейшевые колебания уровня и течения, возникающие в этом море в результате нагонов величиной 1 м на открытой границе, исследованы в [4] в рамках линейной двумерной математической модели.

Настоящее исследование является продолжением работ [10 – 12], посвященных изучению свободных и вынужденных колебаний уровня Азовского моря в рамках трехмерной нелинейной сигма-координатной модели. В данной работе на основании анализа результатов численного моделирования исследовано развитие течений, сгонно-нагонных и сейшеобразных колебаний уровня Азовского моря в поле возмущений атмосферного давления. Проверена гипотеза о роли резонансного механизма в возникновении экстремально высоких амплитуд сгонно-нагонных колебаний и сейш, генерируемых перемещающимся над морем барическим полем со скоростью, равной скорости свободной длинной волны [13]. При этом период возмущающих давлений равен периоду собственных колебаний жидкости в бассейне. Установлены пространственно-временные особенности сейшеобразных колебаний, возникающих после прохождения атмосферных образований. Сделаны выводы о зависимости характеристик штормовых нагонов и сейш от параметров атмосферных воздействий.

Постановка задачи. Используемая модель и ее параметры. Уравнения модели. Начальные и граничные условия. Исследование свободных и вынужденных колебаний в Азовском море выполнено методом математического моделирования. Для этого использована трехмерная баротропная нелинейная сигма-координатная модель *РОМ* [14, 15], которая базируется на системе дифференциальных уравнений динамики моря [16]. Эта модель учитывает переменную глубину водоема, силу Кориолиса, переменное атмосферное давление, трение на дне и свободной поверхности:

$$\frac{du}{dt} - fv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_M \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} + fu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} + g\rho = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Здесь использованы следующие обозначения: x, y, z – пространственные переменные; ось x направлена на восток, ось y – на север, ось z – вертикально вверх; t – время; $u(x, y, z, t), v(x, y, z, t)$ – компоненты вектора горизонтальной скорости течений; $w(x, y, z, t)$ – вертикальная компонента скорости течений; $P(x, y, z, t) = P_{\text{атм}} + g\rho_0(\zeta - z)$ – давление на глубине z на основании интегрирования (3) по вертикали, $P_{\text{атм}} = 1013,25$ гПа – стандартное атмосферное давление при температуре 0°C на широте 45° ; ρ – плотность воды;

$\rho_0 = (\zeta + H)^{-1} \int_{-H}^{\zeta} \rho dz$ – средняя плотность воды по глубине; g – ускорение

свободного падения; f – параметр Кориолиса; K_M – коэффициент вертикальной турбулентной вязкости, для определения которого используется теория Меллора – Ямады [17]; A_M – коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости, вычисляемый по формуле Смагоринского [18].

На поверхности моря задаются универсальное условие для w :

$$w|_{z=\zeta} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} \quad (5)$$

и граничные условия для горизонтальной скорости как поток импульса от напряжений трения ветра:

$$K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=\zeta} = (\tau_{0x}, \tau_{0y}), \quad (6)$$

где $(\tau_{0x}, \tau_{0y}) = \rho_a c_a |\mathbf{U}_W| (u_W, v_W)$, \mathbf{U}_W – вектор скорости ветра на стандартной высоте 10 м над поверхностью морской воды, u_W и v_W – компоненты вектора скорости ветра, ρ_a – плотность воздуха при стандартных атмосферных условиях, c_a – коэффициент поверхностного трения, который меняется в зависимости от скорости ветра:

$$10^3 c_a = \begin{cases} 2,5, & |\mathbf{U}_W| > 22 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \\ 0,49 + 0,065|\mathbf{U}_W|, & 8 \leq |\mathbf{U}_W| \leq 22 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \\ 1,2, & 4 \leq |\mathbf{U}_W| \leq 8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \\ 1,1, & 1 \leq |\mathbf{U}_W| \leq 4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}. \end{cases} \quad (7)$$

Выражение (7) следует из [19] для скорости ветра меньше 22 м/с, в других случаях c_a – константа, предложенная в [20].

На дне задаются условия непротекания, выраженные кинематическим граничным условием (отражающим факт отсутствия потока, нормального к границе)

$$\left(w + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) \Big|_{z=-H} = 0 \quad (8)$$

и квадратичной параметризацией придонного трения

$$K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=-H} = (\tau_{1x}, \tau_{1y}), \quad (9)$$

где $(\tau_{1x}, \tau_{1y}) = c_b |\mathbf{U}_b| (u_b, v_b)$, u_b и v_b – горизонтальные компоненты скорости течения в узлах сетки у дна бассейна, c_b – коэффициент донного трения, определенный как максимум между значением, вычисляемым по логарифмическому закону, и эмпирической постоянной 0,0025: $c_b = \max\{k^2(\ln(H+z_b)/z_0)^{-2}; 0,0025\}$. Здесь $z_0 = 3$ см – параметр шероховатости; z_b – ближайший к дну узел сетки; $k = 0,4$ – константа Кармана.

На боковых границах для скорости задаются условия отсутствия нормального потока $\mathbf{U}_n = 0$ и прилипания $\mathbf{U}_\tau = 0$, где \mathbf{n} и $\mathbf{\tau}$ – нормальное и тангенциальное направления. В качестве начальных (при $t = 0$) принимаются условия отсутствия движения жидкости и горизонтальности свободной поверхности до начала действия атмосферных возмущений.

Дискретизация модели проведена на C -сетке, операторы переноса аппроксимируются с помощью TVD-схемы (*Total Variation Diminishing*) [21]. Используются равномерные шаги по горизонтальным координатам $\Delta x = \Delta y = 1,4$ км и по σ -координате. Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам осуществляется в соответствии с критерием устойчивости для баротропных волн [22]. Топография дна расчетной области на модельную сетку интерполирована из массива глубин, взятого из навигационных карт. Изучение свободных и вынужденных колебаний жидкости в Азовском море проведено с использованием результатов численных расчетов по указанной баротропной модели динамики океана.

Входные метеорологические данные. Согласно наблюдениям, на территориях морских акваторий, пересекающихся либо соприкасающихся с континентами, в переходные сезоны возникают фронтальные зоны, которые перемещаются со скоростью 30 – 35 км/ч (8 – 10 м/с) и проходят за сутки 600 – 800 км. Ширина фронтальной поверхности составляет несколько десятков километров, покрывающих акваторию Азовского моря. Режимы ветра и волнения перед фронтом и за ним существенно различаются. В зонах фронтов, особенно холодных, имеют место значительные градиенты температуры воздуха, влажности и других метеорологических параметров, которые способствуют резкому усилению ветра до шквального [23, 24].

В ходе вычислительных экспериментов воспроизведены сценарии прохождения сезонных атмосферных фронтов над Азовским морем (рис. 1). Движение границы раздела областей давлений совершается по одной из заданных траектории: меридиональной (рис. 1, а), зональной (рис. 1, б, в), диагональной (рис. 1, г). Барический градиент, ширина фронтальной зоны, а также их значения в областях повышенного и пониженного давлений принимаются на основе анализа обобщенных справочных гидрометеорологических данных [23, 24].

Скорость и время движения барического поля выбраны с учетом предположения о генерации волн с максимальными амплитудами. Это возможно,

когда период вынуждающей силы приближается к периоду собственных колебаний бассейна. При этом барический фронт, перемещающийся над водной поверхностью со скоростью, близкой к \sqrt{gH} , формирует высокие нагоны у берегов, вызывающие затем сейши с большой амплитудой [13].

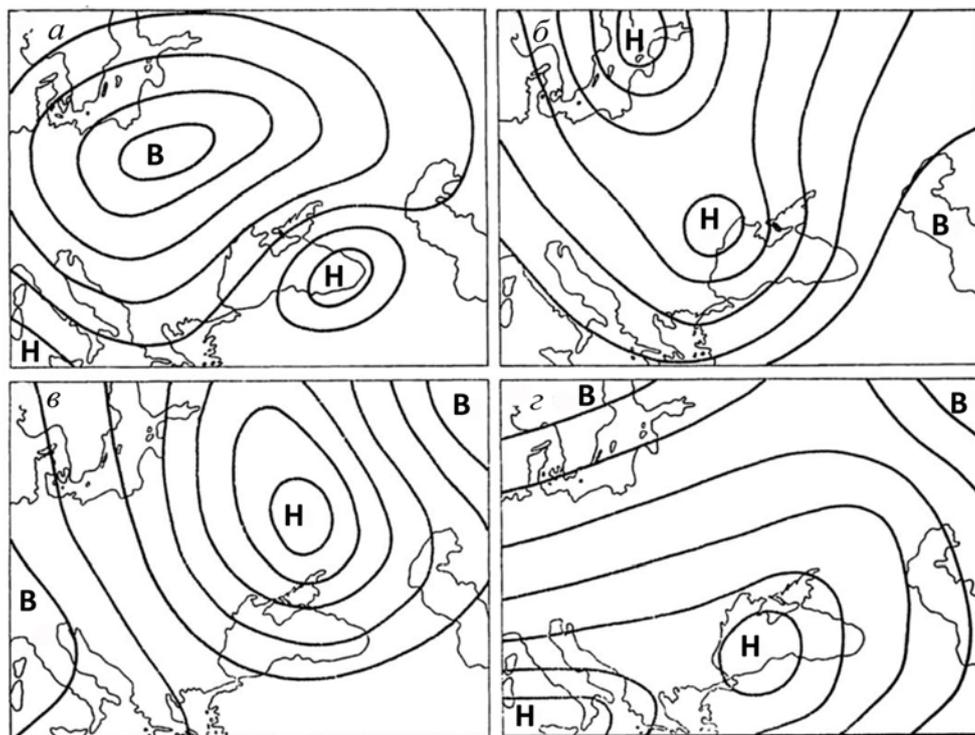


Рис. 1. Типы барических синоптических процессов для района Азовского моря: антициклон над центральными районами европейской части России (а), антициклон над Малой Азией и Казахстаном (б), антициклон с отрогом над Балканским п-овом (в), средиземноморские циклоны (г)

Время перемещения фронта (t_f) над всей акваторией моря задается равным первому наибольшему подъему уровня Азовского моря, происходящему в течение половины периода старшей моды свободных колебаний. Его значение определяется, исходя из данных наблюдений и результатов аналитических расчетов. Так, в [3, 23, 24] отмечены сейши с периодами 6 – 7 и 23 ч ($T_{\text{набл}}$). Теоретические значения периодов ($T_{\text{Мериан}}$) получены по формуле Мериана с учетом поправки Рэлея [3]:

$$T_{\text{Мериан}} = \frac{2L}{\sqrt{gh}}(1 + \varepsilon), \quad \varepsilon = \frac{b}{\pi l} \left(\frac{3}{2} - \ln \frac{\pi b}{l} - C_\varepsilon \right). \quad (10)$$

Здесь $C_\varepsilon = 0,5772$ – постоянная Эйлера; $L = 360$ км – длина моря (по линии Геническ – Перебойный); $h = 10$ м – средняя глубина моря; $b = 30,6$ км – ширина пролива у входа в Таганрогский залив; $l = 137$ км – длина Таганрогского залива. Период первой моды, вычисленный по формуле (10), равен 24,1 ч.

Таким образом, сравнивая значения $T_{\text{набл}}$ и $T_{\text{Мериан}}$, считаем, что доминирующие продольные собственные колебания первой моды уровня Азовского моря имеют период, близкий к $T = 24$ ч. Структура этой моды такова, что одна ее вершина находится в Таганрогском заливе, а противоположная – вблизи Геническа. Поэтому представляет интерес изучение влияния неоднородных барических полей на формирование сгонно-нагонных явлений и сейшеобразных колебаний в этих районах.

Исследование гипотезы о возникновении экстремальных сейш при изменении атмосферного давления в различных частях моря выполнено на основе анализа результатов двух серий численных экспериментов. Условия проведения экспериментов различались резонансными механизмами формирования экстремальных амплитуд сгонно-нагонных колебаний и сейш Азовского моря. В первой серии экспериментов характеристикой барического фронта является период действия неоднородного поля атмосферного давления, кратный периоду собственных колебаний бассейна, во второй серии экспериментов – скорость, близкая к скорости свободной длинной волны.

В каждом эксперименте развитие фронта происходит в поле фоновых стационарных течений, а начало его движения соответствует времени установления движения жидкости ($t_{\text{ст}} = 48$ ч) [10]. Установившиеся движения в Азовском море генерируются действием однородного по времени и пространству юго-западного ветра со скоростью $|\mathbf{U}_w| = 10$ м/с. На этом этапе ($0 \leq t \leq t_{\text{ст}}$) атмосферное давление постоянно по всей акватории моря, его значение равно стандартному атмосферному давлению ($P_{\text{атм}}$).

Следующий этап эксперимента соответствует прохождению по акватории Азовского моря неоднородного поля атмосферного давления. От начала его движения ($t_{\text{ст}} = 48$ ч) акватория моря разделяется на части: область D , над которой давление постоянно и равно нормальному атмосферному давлению $P_{\text{атм}}$, и область \bar{D} , над которой перемещается неоднородное барическое поле. Размеры областей D и \bar{D} изменяются с течением времени и ограничены размерами расчетной сетки бассейна Азовского моря ($0 \leq x \leq x_{\text{max}} = 350$ км, $0 \leq y \leq y_{\text{max}} = 250$ км). Функция $P_a(x, y, t)$, моделирующая давление в атмосферном фронте, задается двумя различными аналитическими выражениями для областей D и \bar{D} :

$$P_a(x, y, t) = \begin{cases} P_{\text{атм}} = \text{const}, & (x, y) \in D, \\ P_{\text{атм}} + a(t - t_{\text{ст}}), & (x, y) \in \bar{D}, \end{cases} \quad (11)$$

она также зависит от времени, которое изменяется в промежутке $t_{\text{ст}} \leq t \leq t_f$. Коэффициент a подобран так, что $P_a(x, y, t)$ имеет единственный скачок с амплитудой, равной градиенту призмного давления вдоль линии фронта ($a(t_f - t_{\text{ст}}) = \Delta P_{\phi}$). При этом ΔP_{ϕ} рассчитывается по известному в данном эксперименте значению скорости ветра на основании формулы $|\mathbf{U}_w| = 0,7 \sqrt{(4,8/\sin \varphi)^2 (\Delta P_{\phi}^2 + \alpha^2 \Delta t_{\phi}^2) + 64}$, предложенной в [25]. Здесь Δt_{ϕ} – перепад температуры воздуха в зоне фронта на расстоянии 50 км; α – переходный коэффициент; φ – географическая широта.

Области постоянного и переменного атмосферного давления (D и \bar{D}) разнесены по обе стороны от линии фронта γ , положение которой зависит от текущих координат (x , y) и времени (t). Задание пространственной кривой γ выполнено с использованием параметрических выражений γ : $x = x(t)$, $y = y(t)$. Вид параметрических уравнений определяет конфигурацию линий фронта: прямые – с определенным углом наклона, кривые – с заданным радиусом кривизны. Скорость и время передвижения возмущающих барических полей по акватории Азовского моря определяется по скорости U_γ и времени движения границы фронта t_f . Для указанных серий численных экспериментов эти величины находятся по-разному.

Для первой серии численных экспериментов период действия атмосферных возмущений t_f выбираем кратным периоду старшей моды свободных колебаний Азовского моря T . В этом случае модуль скорости передвижения границы фронта находим на основании формулы $|U_\gamma| = 2L/T$. Для второй серии расчетов скорость движения границы области атмосферного давления – величина переменная. Она равна скорости свободной длинной волны, зависящей от глубины моря ($|U_\gamma(H)| = \sqrt{gH}$). В этом случае время действия атмосферных возмущений при разной скорости их передвижения различно и также определяется из известного соотношения $t_f = L/|U_\gamma(H)|$.

Анализ результатов численного моделирования. В рамках математической модели выполнен расчет экстремальных нагонов и сгонов, вызванных действием барических возмущений, и определены максимальные характеристики свободных колебаний в Азовском море, возникающих после прохождения атмосферных фронтов. Величины амплитуд уровня, скоростей течений и периодов сейшеобразных колебаний подробно анализируются по расчетам, полученным на береговых станциях моря и в районах центральной части бассейна.

Таганрогский залив, расположенный в северо-восточной части Азовского моря, представляет собой бассейн почти прямоугольной формы протяженностью 137 км и максимальной шириной 30 км. Одноузловая продольная сейша, доминирующая в Таганрогском заливе, влияет на формирование сгонно-нагонных колебаний уровня, и это влияние может быть существенным при совпадении периодов собственных и вынужденных колебаний.

1. Целью численных экспериментов является исследование реакции свободных и вынужденных колебаний уровня Азовского моря на прохождение барического поля за время, равное периоду собственных колебаний бассейна. Воздух движется из области с высоким давлением в область с низким давлением под влиянием барического градиента. При этом как только воздух приходит в движение, начинает действовать и сила Кориолиса, которая отклоняет его поток вправо. С увеличением скорости ветра увеличивается и отклонение его направления под влиянием силы Кориолиса, в результате чего геострофический ветер движется уже не от области высокого в область низкого давления, а вдоль изобары.

Траектории движения неоднородных барических полей над Азовским морем, принятые в численных экспериментах, показаны на рис. 2. Изолинии

барических полей соответствуют моменту времени 9 ч, отсчитываемому от начала движения полей пониженного давления. На рис. 2, а, б показаны примеры распространения этих областей со скоростью $|U_y| = 8$ м/с в направлении действующего зонального ветра по линии Геничск – Перебойный. Они различаются геометрией линий раздела (γ): на рис. 2, а это прямая линия с углом наклона 135° к оси x . Движение границы раздела областей давлений по диагональной траектории (с углом наклона 90° к оси x) показано на рис. 2, б.

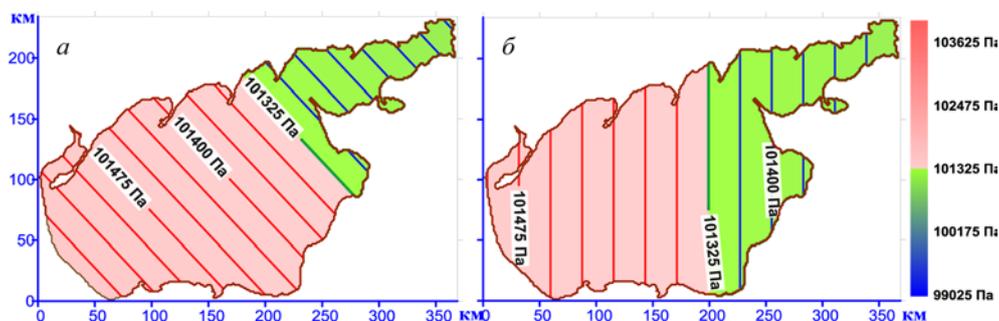


Рис. 2. Движение области переменного атмосферного давления со скоростью 8 м/с в направлении Геничск – Перебойный при различной геометрии ее границ: а – прямая под наклоном 135° к оси x ; б – прямая под наклоном 90° к оси x

Результаты расчетов экстремальных отклонений уровня моря, полученные при постоянном давлении, а также при прохождении неоднородного барического фронта, и вызванных действием одного и того же стационарного западного ветра скорости 10 м/с, приведены в табл. 1. Здесь даны максимальные и минимальные значения отклонений уровня на береговых станциях Азовского моря в момент прекращения действия ветра (ζ_{st} , ζ_{ext}) и первые последовательные экстремумы амплитуд сейшеобразных колебаний ($\zeta_{1, 2}$) с соответствующими им моментами времени ($t_{1, 2}$), отсчитываемыми от момента времени t_{st} . В левой части таблицы представлены результаты моделирования при неизменном давлении $P_{атм}$, в правой части – при прохождении через всю акваторию области переменного давления $P_a(x, y, t)$ со скоростью 8 м/с.

Из анализа данных, приведенных в левой части табл. 1, следует, что действующий ветер вызывает максимальные стационарные нагоны на ст. Геничск (2,02 м), сгоны – на ст. Ейск (2,44 м), Приморско-Ахтарск (1,75 м) и Таганрог (1,58 м). В сравнении с экстремумами амплитуд отклонений уровня, вызванных прохождением барического поля, видно, что наибольшие различия на указанных станциях составляют 14%.

Используя данные, приведенные в табл. 1, выполним анализ сейшеобразных колебаний, полученных на станциях, где имеют место наибольшие сгонно-нагонные явления. На ст. Ейск, где возникает наибольший сгон ($-2,44$ м; $t = t_{st}$), прекращение действия ветра вызывает последующее повышение уровня ($\zeta_1 = -0,06$ м; через 18,3 ч). При этом размах первого колебания составляет 2,38 м. В дальнейшем уровень продолжает повышаться и через 10,2 ч достигает наибольшего значения 0,21 м, размах второго колебания (0,27 м) в 8,8 раза меньше первого.

Стационарные сгоны и нагоны (ζ_{st} , м), экстремумы амплитуд вынужденных (ζ_{extr} , м) и двух первых сейшеобразных ($\zeta_{1,2}$, м) колебаний с соответствующими моментами времени ($t_{1,2}$, ч) при постоянном атмосферном давлении и после прохождения барического фронта со скоростью 8 м/с под действием стационарного ветра скорости 10 м/с

Станция	$P_{атм}$					$P_a(x, y, t)$				
	ζ_{st}	ζ_1	t_1	ζ_2	t_2	ζ_{extr}	ζ_1	t_1	ζ_2	t_2
Геническ	2,02	-0,27	9,5	0,33	16,5	2,15	-0,28	10,0	0,39	16,8
Бердянск	0,25	-0,57	2,5	0,46	7,7	0,25	-0,60	2,8	0,48	7,7
Мариуполь	-1,53	-0,01	12,3	-0,20	20,2	-1,82	-0,01	12,5	-0,21	20,6
Таганрог	-1,58	-0,89	24,3	0,30	31,5	-1,64	-0,97	24,4	0,35	31,5
Ейск	-2,44	-0,06	18,3	0,21	28,5	-2,62	-0,07	18,7	0,25	28,9
П.-Ахтарск	-1,75	0,92	5,3	-0,10	13,9	-1,88	0,95	5,5	-0,10	13,9
Темрюк	-0,18	1,03	2,7	-0,14	13,5	-0,18	1,07	3,1	-0,14	13,6
Опасное	0,32	0,93	1,7	-0,08	13,0	0,37	0,93	2,2	-0,09	13,1
Мысовое	0,98	-0,20	8,7	0,26	15,4	1,06	-0,22	8,7	0,30	15,6

Прохождение барического фронта приводит к изменениям значений размахов и периодов свободных колебаний, которые на ст. Ейск существенно различаются. Так, в момент прекращения действия возмущений понижение уровня на 2,62 м формирует последующие свободные колебания с размахами 2,55 и 0,32 м. Отметим, что величина стационарного сгона на этой станции на 7% меньше нестационарного, отличия размахов сейшеобразных колебаний не превышают 16%, а их периодов – 0,5 ч. Так как в обоих случаях основой генерации волн и течений являлся один и тот же ветер, то эта разница, очевидно, обусловлена прохождением барического фронта с перепадом давления 100 гПа.

На рис. 3 приведены поля течений в поверхностном слое Азовского моря через равные промежутки времени (3 ч) от момента прекращения всех внешних воздействий. Видно, что при различных скоростях действующего ветра максимумы скоростей течений смещены в сторону Таганрогского залива. Нулевые значения скоростей течений разбросаны по акватории. При этом одному и тому же направлению перемещения границы барических возмущений над акваторией соответствуют противоположные по направлению течения.

2. Следующая серия экспериментов проведена с целью анализа влияния резонансных характеристик, связанных со скоростью свободной длинной волны. Скорость движения полей атмосферного давления ($|U_\gamma(H)| = \sqrt{gH}$) над акваторией рассчитывается на основе известного дисперсионного соотношения и является функцией, зависящей от глубины природного бассейна.

В табл. 2 представлена зависимость экстремальных амплитуд колебаний уровня Азовского моря от скорости перемещения границы барического возмущения в меридиональном направлении в поле постоянного западного ветра скорости 10 м/с. Скорость барического фронта, как и свободной длинной волны, изменяется в зависимости от выбираемых значений глубины моря (7 – 14 м).

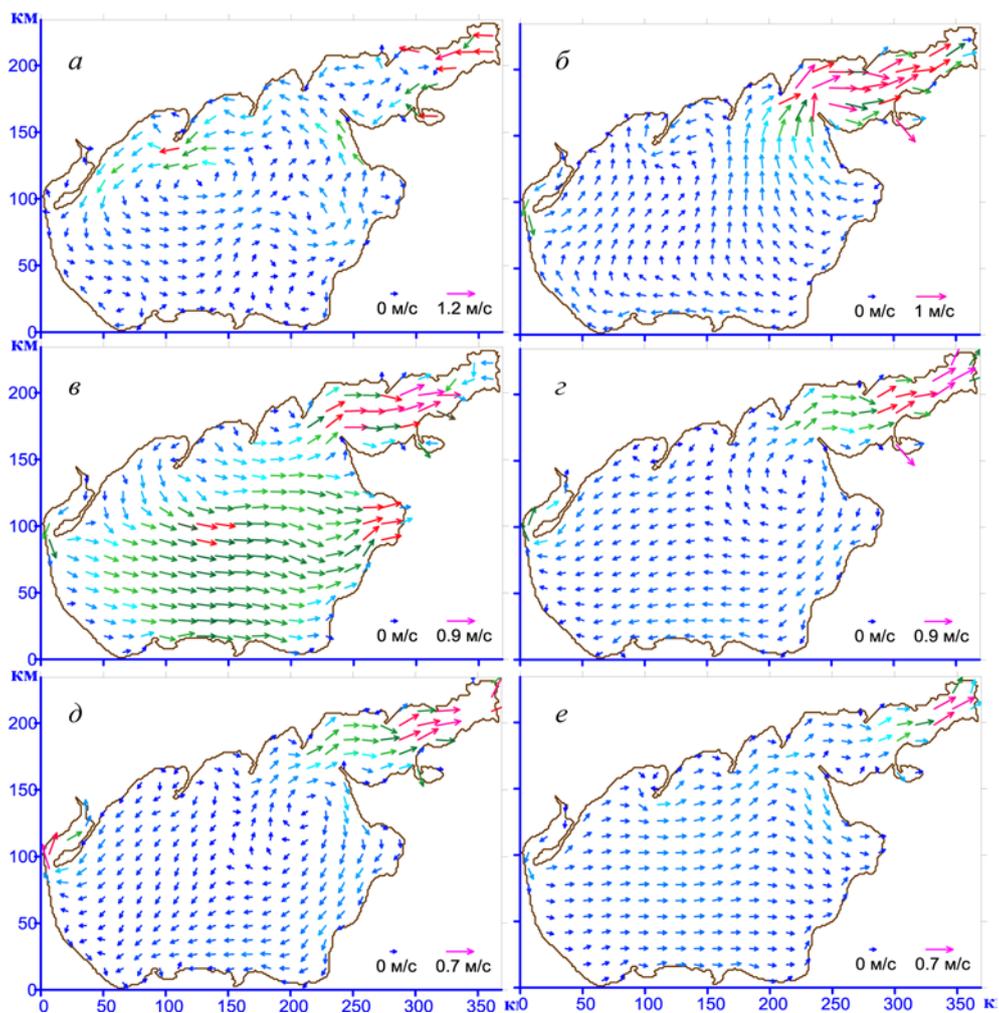


Рис. 3. Поля течений Азовского моря при установившемся движении (а), в момент прекращения действия ветра (б), через 3 ч (в), через 6 ч (з), через 9 ч (д), через 12 ч (е)

Т а б л и ц а 2

Зависимость экстремальных характеристик волнения от скорости перемещения полей атмосферного давления ($U_y(H)$) над Азовским морем

$ U_y(H) $, м/с	ζ_{\max} , м	ζ_{\min} , м	$ U _{\max}$, м/с
8,3	0,56	0,40	0,26
8,9	0,66	0,46	0,27
9,4	0,74	0,52	0,30
9,9	0,70	0,50	0,28
10,4	0,68	0,48	0,24
10,9	0,64	0,44	0,23
11,3	0,58	0,40	0,22
11,7	0,58	0,40	0,21

Сравнение данных результатов, представленных в табл. 2, с результатами расчетов, проведенных при постоянном значении атмосферного давления [20], подтверждает гипотезу о влиянии движущихся барических образований на колебания уровня и скорости течений Азовского моря. Увеличения экстремальных амплитуд колебаний уровня и максимальных скоростей течений ($\zeta_{\max} = 0,56$ м, $\zeta_{\min} = 0,4$ м, $|U|_{\max} = 0,26$ м/с) по сравнению с неизменной величиной давления ($P_{\text{атм}}$) достигают 20; 23 и 14%.

Из анализа данных, представленных в табл. 2, следует, что скорость передвижения барических возмущений влияет на максимальные скорости и отклонения уровня моря. Наибольшие значения этих величин достигаются при скорости фронта $|U_{\gamma}(H)| = 9,4$ м/с, соответствующей глубине моря 9 м. Время прохождения этого барического образования от крайней западной до крайней восточной границы Азовского моря составляет 10 ч 40 мин. Отметим, что фронт, перемещающийся дольше, например со скоростью 8,3 м/с (12,8 ч), оказывает меньшее воздействие на параметры волновых движений.

По результатам эксперимента исследуем изменение уровня свободной поверхности в момент установления движения жидкости, прохождения атмосферного возмущения над всей акваторией моря через равные промежутки времени (3 ч) от момента прекращения всех внешних воздействий.

На рис. 4 представлены результаты численного эксперимента прохождения барического возмущения над Азовским морем с запада на восток в поле постоянного ветра, дующего со скоростью 10 м/с в том же направлении. При этом перемещение границы раздела воздушных масс с перепадом атмосферного давления происходит со скоростью свободной длинной волны ($|U_{\gamma}(H)| = 8,29$ м/с), полученной по среднему значению глубины моря 7 м. Время прохождения атмосферного возмущения выбрано равным половине периода свободных колебаний ($t_f = T_{\text{Мериан}}/2 = 12$ ч).

В момент прекращения действия ветра (рис. 4, а) динамика вод определяется узловой линией, проходящей через центр бассейна, и максимумом амплитуды в западной и восточной частях бассейна.

При дальнейшем развитии процесса свободных колебаний возрастает генерация вихревых возмущений, узловая линия асимметрично вращается против часовой стрелки, занимая продольное (рис. 4, б) и диагональное (рис. 4, в) положение. Свободные колебания через 11 ч после прекращения действия ветра (рис. 4, г) представляют собой двухузловую сейшу с центральной узловой линией, повторяющей ее конфигурацию в начальный период времени ($t = t_{st}$; рис. 4, а). Две более короткие узловые линии симметричны, они являются полуокружностями, диаметры которых располагаются перпендикулярно направлению атмосферного фронта.

Наименьшая интенсивность свободных колебаний уровня отмечается в центральной области бассейна. Через 12 ч (рис. 4, д) система двухузловых сейш перемещается в восточном направлении, при этом наибольшие отклонения уровня имеют место в противоположных углах бассейна. Дальнейшее развитие процесса свободных колебаний (рис. 4, е) приводит к тому, что участки малых узловых линий компенсируются, объединяясь в одну, проходящую по диагонали бассейна, разделяющую его на области возвышения и опускания уровня.

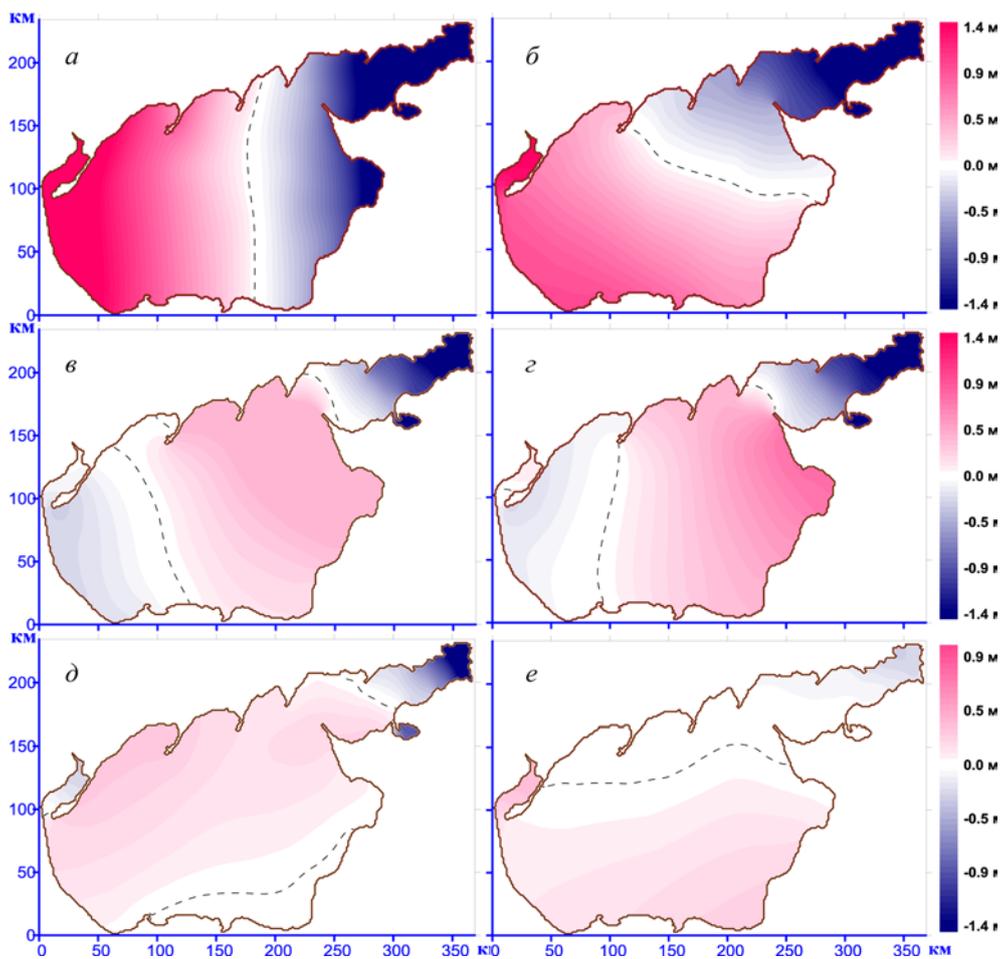


Рис. 4. Изолинии уровня (м) Азовского моря в те же моменты времени, что на рис. 3

Основные результаты исследования. На основе анализа результатов численного моделирования установлено, что возмущения, движущиеся со скоростью, близкой к скорости свободной длинной волны, вызывают генерацию волн с большими амплитудами, чем при том же ветре и постоянном атмосферном давлении. Их наибольшие значения достигаются при скорости перемещения границы барических возмущений 9,4 м/с, соответствующей глубине моря 9 м.

Перемещающиеся барические поля за время, равное полупериоду собственных колебаний бассейна, вызывают вынужденные, а затем свободные колебания с амплитудами, отличающимися не более чем на 14% от полученных при постоянном значении атмосферного давления и одном и том же ветре.

Возмущению атмосферного давления принадлежит важная, но не решающая роль при формировании структуры течений и колебаний уровня Азовского моря. В работе показано, что одному и тому же направлению перемещения границы барических возмущений над акваторией моря могут соответствовать противоположные по направлению течения, зависящие только

от направления действующего ветра. Важная роль в формировании течений и уровня принадлежит процессам, вызываемым длительно действующим постоянным ветром.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Монин А.С.* Классификация нестационарных процессов в океане // Изв. АН СССР. – 1972. – № 7. – С. 26 – 30.
2. *Каменкович В.М., Кошляков М.Н., Монин А.С.* Синоптические вихри в океане. – СПб.: Гидрометеоздат, 1987. – 512 с.
3. *Герман В.Х.* Исследование и расчет вероятностных характеристик экстремальных уровней моря // Тр. ГОИН. – 1971. – Вып. 107. – 148 с.
4. *Матишов Г.Г., Инжебейкин Ю.И.* Численные исследования сейшеобразных колебаний уровня Азовского моря // Океанология. – 2009. – 49, № 4. – С. 485 – 493.
5. *Сиротов К.М., Сидельникова Т.М.* Опыт расчета скорости ветра и высоты волн в зоне холодного фронта // Тр. Гидрометцентра СССР. – 1984. – Вып. 263. – С. 72 – 75.
6. *Быков Ф.Л., Гордин В.А.* Объективный анализ структуры атмосферных фронтов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2014. – 48, № 2. – С. 172 – 188.
7. *Нестеров Е.С.* Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в морях и океанах. – М.: Росгидромет, 2013. – 337 с.
8. *Ефимов В.В., Анисимов А.Е.* Численное моделирование влияния температурных контрастов суша – море на атмосферную циркуляцию в Черноморском регионе // Морской гидрофизический журнал. – 2011. – № 4. – С. 3 – 12.
9. *Ефимов В.В., Барabanов В.С., Крупин А.В.* Моделирование мезомасштабных особенностей атмосферной циркуляции в Крымском регионе Черного моря // Там же. – 2012. – № 1. – С. 64 – 74.
10. *Иванов В.А., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Динамические процессы и их влияние на распространение и трансформацию загрязняющих веществ в ограниченных морских бассейнах. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. – 178 с.
11. *Иванов В.А., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Динамические процессы и их влияние на трансформацию пассивной примеси в Азовском море // Океанология. – 2014. – 54, № 4. – С. 464 – 472.
12. *Иванов В.А., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование свободных колебаний уровня Азовского моря, возникающих после прекращения длительного действия ветра // Морской гидрофизический журнал. – 2015. – № 2. – С. 15 – 24.
13. *Лабзовский Н.А.* Непериодические колебания уровня моря. – СПб.: Гидрометеоздат, 1971. – 238 с.
14. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A description of three dimensional coastal ocean circulation model // Three-Dimensional Coastal Ocean Models / Ed. N. Heaps. – Washington, D. C.: American Geophysical Union, 1987. – 4. – P. 1 – 16.
15. *Фомин В.В.* Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Научные труды УкрНИГМИ. – 2002. – Вып. 249. – С. 246 – 255.
16. *Черкесов Л.В., Иванов В.А., Хартиев С.М.* Введение в гидродинамику и теорию волн. – СПб.: Гидрометеоздат, 1992. – 264 с.
17. *Mellor G.L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. Space Phys. – 1982. – 20. – P. 851 – 875.
18. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with primitive equations, I. The basic experiment // Mon. Wea. Rev. – 1963. – 91, № 3. – P. 99 – 164.
19. *Large W.G., Pond S.* Open ocean momentum fluxes in moderate to strong winds // J. Phys. Oceanogr. – 1981. – 11. – P. 324 – 336.

20. *Powell M.D., Vivkery P.J., Reinhold T.A.* Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones // *Nature*. – 2003. – 422, № 20. – P. 278 – 283.
21. *Sweby P.K.* High resolution schemes using flux limiters for hyperbolic conservation laws // *SIAM. J. Numer. Anal.* – 1984. – 21, № 5. – P. 995 – 1011.
22. *Courant R., Friedrichs K.O., Lewy H.* On the partial difference equations of mathematical physics // *IBM J.* – 1967. – March. – P. 215 – 234.
23. *Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Том III. Азовское море.* – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 218 с.
24. *Гидрометеорологический справочник Азовского моря.* – Л.: Гидрометеоиздат, 1962. – 247 с.
25. *Мастерских М.А.* Методическое пособие по составлению прогноза фронтальной ботры. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 35 с.

Investigation of the effect of the baric formations' parameters on free and forced oscillations of the level and flow in the Sea of Azov

L.V. Cherkesov, T.Ya. Shul'ga

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
e-mail: shulgaty@mail.ru*

Effect of inhomogeneous moving atmospheric pressure fields upon the flows, and free and forced oscillations of the Azov Sea level induced by constant wind is studied by the method of mathematical modeling. Tested is the hypothesis on the role of a resonance mechanism in occurring of extremely high amplitudes of surge and seiche oscillations generated by the baric field moving at the speed equal that of a free long wave. It is found that at one and the same wind, the baric disturbances moving over the Azov Sea induce the forced oscillations, and after the disturbances cease – the free ones with the amplitudes that are by 14% higher than those obtained at constant atmospheric pressure. It is shown that the baric front movement (the speed and time of its movement are selected with allowance for the assumption on generation of the waves with maximum amplitudes) plays the important, but not the decisive role in formation of the flows' structure and the level oscillations of the Azov Sea.

Keywords: Sea of Azov, sigma-coordinate model, free oscillations of liquid, seiches, stationary currents, storm surges, nodal lines, atmospheric front, free long wave velocity.