

УДК 551.465.755

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ФРОНТОВ НА СВОБОДНЫЕ И ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ АЗОВСКОГО МОРЯ

В. А. Иванов¹, Т. Я. Шульга^{1,*}

Представлено академиком РАН В.М. Котляковым 24.03.2018 г.

Поступило 15.10.2018 г.

Методом математического моделирования изучено влияние неоднородных движущихся полей атмосферного давления на течения и свободные и вынужденные колебания уровня Азовского моря, генерируемые постоянным ветром. Проверена гипотеза о роли резонансного механизма в возникновении экстремально высоких амплитуд сгонно-нагонных и сейшевых колебаний, генерируемых барическим полем, движущимся со скоростью, равной скорости свободной длинной волны. Установлено, что при одном и том же ветре движущиеся над Азовским морем барические возмущения вызывают вынужденные колебания, а после прекращения возмущений — свободные с амплитудами, на 14% превышающими полученные при постоянном атмосферном давлении. Показано, что движение барического фронта (скорость и время его движения выбираются с учётом допущения о генерации волн с максимальными амплитудами) принадлежит важная роль в формировании структуры течения и колебаний уровня Азовского моря.

Ключевые слова: Азовское море, сигма-координатная модель, сейши, узловые линии, атмосферный фронт, скорость свободной длинной волны.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524866737-741>

ВВЕДЕНИЕ

Важную роль в формировании экстремальных уровней в прибрежных областях морских бассейнов имеют сгонно-нагонные, сейшевые и сейшеобразные колебания, представляющие собой волновые движения с периодами от нескольких часов до нескольких суток [1]. Структура доминирующих собственных продольных колебаний в Азовском море такова, что их вершины приходятся на районы, расположенные вблизи крупных населённых пунктов [2, 3]. Возникающее при этом усиление скорости течений представляет существенную опасность для проходящих судов и расположенных на побережье гидротехнических сооружений, актуальную проблему эксплуатации и проектирования транспортных комплексов.

Причиной экстремальных колебаний в природных бассейнах является резкое изменение атмосферного давления, обусловленного прохождением барических систем, вызывающих повышение уровня водной поверхности и распространение анемобарической волны [4, 5]. Сейши со значительными амплитудами возникают при явлении резонанса, когда период собственных колебаний бассейна совпадает с периодом вынуждающих сил. Барический фронт, двигаясь над водной поверхностью со скоростью, соответствующей скорости свободной длин-

ной волны, может приводить к формированию экстремальных нагонов и сгонов, переходящих в сейши с большой амплитудой [5]. Поведение волн в области атмосферных фронтов начали изучать недавно [6, 7], и практического опыта прогнозирования пока недостаточно. Изучение сейшеобразных колебаний в Азовском море и анализ данных натурных наблюдений проведены в [2]. В рамках двумерной линейной модели в [3] исследованы сейшевые колебания уровня и течения, возникающие в море в результате нагонов величиной 1 м на его границе.

Сообщение посвящено изучению течений, сгонно-нагонных и сейшеобразных колебаний уровня Азовского моря в поле возмущений атмосферного давления. Исследование является продолжением анализа этих явлений, проведённого в [8] на основе трёхмерной гидродинамической модели *ПОМ* (*Princeton Ocean Model*) [9]. В настоящей работе обсуждается роль резонансных механизмов, формирующих экстремальные амплитуды сейшевых и сгонно-нагонных колебаний перемещающимся барическим полем со скоростью свободной длинной волны и периодом действия, кратным периоду собственных колебаний бассейна.

ИСПОЛЬЗУЕМАЯ МОДЕЛЬ И ЕЁ ПАРАМЕТРЫ. ИНФОРМАЦИЯ О ПОЛЯХ ВЕТРА И АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Исследование свободных и вынужденных колебаний в Азовском море выполнено с использова-

¹ Морской гидрофизический институт Российской Академии наук, Севастополь

* E-mail: shulgaty@mail.ru

нием баротропной нелинейной модели (POM), основанной на системе примитивных уравнений гидродинамики океана, записанной в приближениях несжимаемости, гидростатики и Буссинеска [9]. Модель учитывает переменную глубину водоёма, силу Кориолиса, переменное атмосферное давление, трение на дне и свободной поверхности. Используются равномерные шаги по сигма (11 уровней) и горизонтальным координатам (1,4 км). Выбор шагов по временным и пространственным координатам осуществляется в соответствии с критерием устойчивости Courant–Friedrichs–Lewy для баротропных волн. Топография дна расчётной области на модельную сетку интерполирована из массива глубин, взятого из морских навигационных карт.

Согласно наблюдениям, на территориях морских акваторий в переходные сезоны возникают фронтальные зоны, имеющие значительные градиенты давления, температуры воздуха, влажности и других метеорологических параметров [10–12]. В работе воспроизведены сценарии прохождения сезонных атмосферных фронтов над Азовским морем. В них значения барического градиента, ширины фронтальной зоны в областях повышенного и пониженного давлений принимаются на основе анализа обобщенных справочных гидрометеорологических данных [10, 11]. Скорость и время движения выбраны с учётом предположения о генерации волн с максимальными амплитудами [5].

Одноузловая продольная сейша, доминирующая в Таганрогском заливе, влияющая на сгонно-нагонные колебания, может быть существенной при совпадении периодов собственных и вынужденных колебаний. Период свободных колебаний, отвечающих структуре моды с вершинами в Таганрогском заливе и вблизи Геническа, определяем по данным наблюдений и аналитическим расчётам. Так, в [2, 10, 11] отмечены сейши с периодами 6–7 и 23 ч. Теоретическая оценка периода (24,1 ч) получена по формуле Мериана с поправкой Рэлея [2]:

$$T = \frac{2L(1 + \varepsilon)}{\sqrt{gh}}; \quad \varepsilon = \frac{b(3/2 - \ln[\pi b/l] - C_\varepsilon)}{\pi l},$$

где $C_\varepsilon = 0,577$ — 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. Сравнивая теоретические и наблюдаемые значения, полагаем период собственных колебаний (T) равным 24 ч.

АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предположение о возникновении экстремальных амплитуд уровня Азовского моря при прохождении атмосферного фронта, исследована на основе анализа результатов двух серий численных экспериментов. Условия их проведения различаются резонансными механизмами генерации волн, в качестве которых принимаются скорость ($|U_\gamma|$) и время прохождения фронта (t_f) по линии Геническ–Перебойный. В первой серии экспериментов исследовано влияние длительности интервала времени, за который область атмосферного давления проходит от крайней западной до крайней восточной границы моря. Время перемещения атмосферных возмущений (t_f) выбирается кратным периоду свободных колебаний (T), скорость его движения находится по формуле $|U_\gamma| = 2L/T$. Результаты второй серии экспериментов позволяют определить реакцию уровня моря, возникающую при совпадении скоростей движения барического фронта и свободной длинной волны ($|U_\gamma(H)| = \sqrt{gH}$), продолжительности действия — $t_f = L/|U_\gamma(H)|$.

В каждом эксперименте развитие фронта происходит в поле фоновых стационарных течений, генерируемых постоянным западным ветром скорости 10 м/с, начало его движения соответствует времени установления жидкости ($t_{st} = 48$ ч) [13]. На этом этапе ($0 \leq t \leq t_{st}$) атмосферное давление постоянно по всей акватории моря и равно стандартному атмосферному ($P_{atm} = 1013,25$ гПа). Следующий этап соответствует прохождению фронта, от начала движения которого вся акватория моря (Ω) разделяется на две части с изменяющимися по времени размерами — область постоянного атмосферного давления (D) и область переменного атмосферного давления ($\Omega \setminus D$). Функция, моделирующая давление во фронте, задается аналитическим выражением:

$$P_a(x, y, t) = \begin{cases} P_{atm} = \text{const}, & (x, y) \in D, \\ P_{atm} + a(t - t_{st}), & (x, y) \in \Omega \setminus D, \end{cases}$$

зависящим от времени, изменяющемся в промежутке $t_{st} \leq t \leq t_f$. Коэффициент a подобран так, что $P_a(x, y, t)$ имеет единственный скачок с амплитудой, равной градиенту приземного давления вдоль линии фронта ($a(t_f - t_{st}) = \Delta P_f$), ΔP_f рассчитывается по известной скорости ветра на основании формулы, предложенной в [14]. Области D и $\Omega \setminus D$ разнесены по обе стороны от линии фронта $\gamma(x(t), y(t))$, параметрические уравнения которой задают конфигурацию границы (рис. 1).

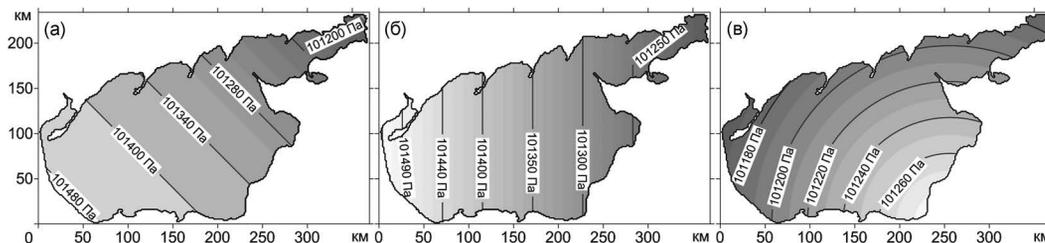


Рис. 1. Движение области переменного атмосферного давления со скоростью 8 м/с в направлении Геническ–Перебойный при различной геометрии её границ: прямые под наклоном 135° (а) и 90° (б) к оси *x*; кривая с заданным радиусом кривизны (в). Изолинии отвечают моменту времени 9 ч от начала движения фронта.

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

Станция	P_{atm}					$P_a(x, y, t)$				
	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

Результаты расчётов амплитуд отклонений уровня моря, полученные при постоянном атмосферном давлении (приведены в левой части табл. 1) и при прохождении барического фронта (приведены в правой части табл. 1) в поле действующего ветра. Здесь же даны первые последовательные экстремумы амплитуд сейшеобразных колебаний с соответствующими им моментами времени, отсчитываемыми от t_{st} . Из анализа приведённых данных, следует, что действующий ветер вызывает максимальные стационарные нагоны в Геническе (2,02 м), сгоны — в Ейске (2,44 м), Приморско-Ахтарске (1,75 м) и Таганроге (1,58 м). В сравнении с экстремумами амплитуд уровня, вызванных прохождением барического поля, видно, что наибольшие различия на указанных станциях составляют 14%. Прохождение барического фронта приводит к изменениям значений размахов и периодов свободных колебаний, которые в Ейске существенно различаются. После прекращения возмущений давления понижение уровня на 2,62 м формирует свободные колебания с размахами 2,55 и 0,32 м. 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.

В табл. 2 представлена зависимость экстремальных амплитуд колебаний уровня Азовского моря от скорости перемещения границы барического фронта в направлении действующего ветра. Скорость барического фронта, как и свободной длинной волны, изменяется в зависимости от глубины моря (7–14 м). Сравнение результатов, представленных в табл. 2, с результатами расчётов, проведённых при постоянном значении атмосферного давления [13], подтверждает гипотезу о влиянии проходящих барических систем на колебания уровня и скорости течений. Увеличения экстремумов амплитуд уровня и максимумов скоростей течений (ζ_{max} , ζ_{min} и $|U|_{max}$) по сравнению с их значениями при постоянном нормальном давлении (P_{atm}) соответствует 20, 23 и 14%. Анализ представленных данных, демонстрирует, что прохождение фронта от крайней западной до восточной границы моря со скоростью 9,4 м/с за 10 ч 40 мин генерирует наибольшие скорости течений и амплитуды колебаний уровня. Фронт, перемещающийся дольше (например, со скоростью 8,3 м/с в течение 12,8 ч), оказы-

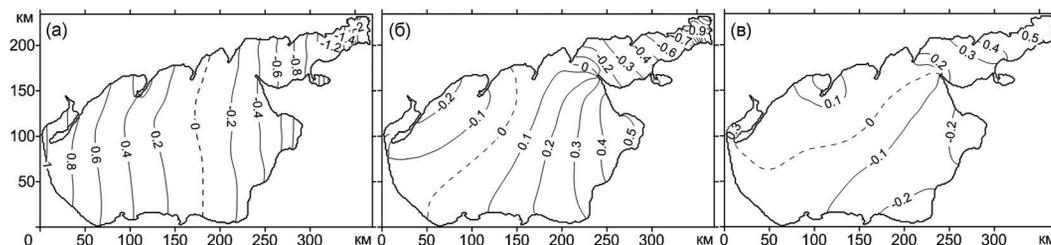


Рис. 2. Изолинии уровня (м) Азовского моря: при установившемся движении (а); через 6 ч (б) и через 12 ч (в) от момента прекращения действия ветра.

Таблица 2. Зависимость экстремальных характеристик волнения от скорости ($|U_{\gamma}(H)|$) перемещения атмосферных полей над Азовским морем

$ U_{\gamma}(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

вает меньшее воздействие на параметры волновых движений.

На рис. 2 представлены поля уровня Азовского моря, генерируемые прохождением барического фронта в поле постоянного западного ветра скорости 10 м/с. Граница раздела областей D и $\Omega \setminus D$ движется со скоростью свободной длинной волны 8,29 м/с, отвечающей глубине моря 7 м. При установившемся движении (рис. 2а), динамика вод определяется узловой линией, проходящей через центр бассейна, и максимумом амплитуд его западной и восточной частях. При развитии свободных колебаний возрастает генерация вихревых возмущений, узловая линия асимметрично вращается, занимая продольное положение. Свободные колебания через 6 ч после прекращения действия ветра (рис. 2б) представляют собой двухузловую сейшу с центральной узловой линией, практически повторяющей её конфигурацию в начальный момент времени. Наименьшая интенсивность свободных колебаний отмечается в центральной области бассейна. Через 9 ч система двухузловых сейш перемещается на восток, дальнейшее развитие свободных колебаний (через 12 ч; рис. 2в) приводит к объединению участков малых узловых линий в одну, проходящую по диагонали бассейна, разделяющую его на области возвышения и опускания уровня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа результатов численного моделирования установлено, что атмосферные 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 перемещении границы барических возмущений со скоростью 9,4 м/с. Движение барических полей в течение полупериода собственных колебаний бассейна, вызывает вынужденные, а затем свободные колебания с амплитудами, отличающимися не более чем на 14% от полученных при постоянном атмосферном давлении и одном и том же ветре. Возмущению атмосферного давления принадлежит важная роль при формировании структуры течений и колебаний уровня Азовского моря.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827–2018–0004 “Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Чёрного и Азовского морей”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монин А.С. Классификация нестационарных процессов в океане // Изв. АН СССР. 1972. № 7. С. 26–30.
2. Герман В.Х. Исследование и расчет вероятностных характеристик экстремальных уровней моря // Тр. ГОИН. 1971. Вып. 107. 148 с.
3. Матишов Г.Г., Инжебейкин Ю.И. Численные исследования сейшеобразных колебаний уровня Азовского моря // Океанология. 2009. Т. 49. № 4. С. 485–493.
4. Weisse R., von Storch H., Niemeier H.D., Knaack H. Changing North Sea Storm Surge Climate: An Increasing Hazard? // Ocean & Coastal Management. 2012. № 68. P. 58–66.
5. Лабзовский Н.А. Непериодические колебания уровня моря. СПб.: Гидрометеиздат, 1971. 238 с.

6. Быков Ф.Л., Гордин В.А. Трехмерный объективный анализ структуры атмосферных фронтов // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 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. Demyshev S.G., Cherkesov L.V., Shul'ga T.Y. Analysis of Effects of Constant Wind on the Velocity of Currents and Seiche Oscillations in the Azov Sea Level // Russ. Meteorol. and Hydrol. 2017. V. 42. Iss. 6. P. 388–393.
9. Blumberg A.F., Mellor G.L. A Description of Three Dimensional Coastal Ocean Circulation Model // Three-Dimensional Coastal Ocean Models. / Washington, D. C.: American Geophys. Union, 1987. V. 4. P. 1–16.
10. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Том III. Азовское море. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 218 с.
11. Гидрометеорологический справочник Азовского моря. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 247 с.
12. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Бердников С.В., Со-рокина В.В., Левитус С., Смоляр И.В. Внутривековые флуктуации климата Азовского моря (по термохалинным данным за 120 лет) // ДАН. 2008. Т. 422. № 1. С. 106–109.
13. Черкесов Л.В., Шульга Т.Я. Волны, течения, сгонно-нагонные процессы и трансформация загрязнений в Азовском море. Севастополь: ФГБУН МГИ РАН, 2017. 228 с.
14. Мастерских М.А. Методическое пособие по составлению прогноза фронтальной боры. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 35 с.

INFLUENCE OF ATMOSPHERIC FRONTS ON FREE AND FORCED OSCILLATIONS OF THE LEVEL IN THE SEA OF AZOV

V. A. Ivanov, T. Ya. Shul'ga

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russian Federation.

Presented by Academician of the RAS V.M. Kotlyakov March 24, 2018

Received October 24, 2018

The influence of inhomogeneous moving atmospheric pressure fields on currents and free and forced oscillations of the level of the Sea of Azov, induced by constant wind, is studied by the method of mathematical modeling. The hypothesis about the role played by a resonant mechanism in the occurrence of extremely high amplitudes of surge and seiche oscillations, generated by the baric field moving at a speed equal to that of a free long wave, is tested. It is found that, under the same wind, baric disturbances moving over the Sea of Azov induce forced oscillations, and after the disturbances stop, they induce free ones with amplitudes that are higher by 14% than those obtained at constant atmospheric pressure. It is shown that the baric front movement (speed and time of its movement are selected under the assumption that waves with maximum amplitudes are generated) plays an important role in the formation of the current structure and level oscillations in the Sea of Azov.

Keywords: The Sea of Azov, sigma-coordinate model, seiches, nodal lines, atmospheric front, free long wave velocity.