

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ
СЕЙШЕВЫХ КОЛЕБАНИЙ В
АЗОВСКОМ МОРЕ ХАРАКТЕРНЫМИ
ДЛЯ ДАННОГО РЕГИОНА
ЦИКЛОНАМИ

Ю.В. Манилюк, Л.В. Черкесов

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

Одной из характерных особенностей Азовского моря является наличие сейш большой амплитуды, возникающих после прохождения циклонических образований, вызывающих сгонно-нагонные колебания уровня. Амплитуды сейшевых колебаний могут достигать 40 - 60% от экстремальных значений нагона или сгона [1]. Время затухания сейшевых колебаний изменяется в широких пределах (от 2 до 8 суток [1]) и существенно зависит от характера возмущений. В силу этого, наводнение, вызванное подъемом уровня, или понижение уровня в портах и судоходных каналах, являющееся следствием сгона, могут повториться неоднократно после прекращения действия возмущающих сил. Отсюда следует, что задача определения периодов сейшевых колебаний и их пространственной структуры, а также условий, при которых генерируется та или иная мода сейш, является весьма важной.

Циклоны перемещаются в район Азовского моря в течение всего года, но чаще всего зимой и весной (с ноября по март). Наиболее часто циклоны приходят из западных регионов Черного моря, низовьев Дуная и севера Италии, несколько реже - из центральных районов Европы и Венгерской низменности (западные циклоны), а также из Малой Азии и с Черного моря (южные). Северо-западные "ныряющие" циклоны преобладают зимой и осенью, а северные (с Баренцева моря) перемещаются в район

Азовского моря только зимой. В конце весны и в начале лета общее число циклонов резко уменьшается, а летом снова увеличивается за счет образования местных циклонов. В летние месяцы наиболее часто наблюдаются юго-восточные циклоны, возникающие на юго-востоке Европейской части России под действием местных факторов [1].

Здесь рассмотрены случаи прохождения циклонов трех наиболее характерных для Азовского моря типов: южного, сделавшего характерный для этого типа циклонов поворот на восток над акваторией Азовского моря, северного, перемещающегося в южном направлении, северо-западного "ныряющего", проходящего над морем в юго-восточном направлении. Во всех расчетах принималось, что циклон имеет круговую форму, поле давления определяется выражением (4), радиус циклона r_c равен 600 км, перепад давления между центром и периферией (p_0) задавался равным 10 гПа, скорость перемещения циклонов выбиралась равной 5, 10, 15 м/с. Такие значения параметров часто отмечаются у реальных циклонов, проходящих над Азовским морем [1].

Будем предполагать жидкость однородной и несжимаемой, волны длинными. Для описания движения жидкости воспользуемся системой уравнений мелкой воды в полных потоках [2]:

$$U_t + gH\zeta_x - fV = -\frac{H}{\rho} p_x + \frac{1}{\rho} (\tau_1^w - \tau_1^h),$$

$$V_t + gH\zeta_y + fU = -\frac{H}{\rho} p_y + \frac{1}{\rho} (\tau_2^w - \tau_2^h),$$

$$\zeta_t = -U_x - V_y.$$

(1)

Здесь U, V - проекции вектора полного потока на горизонтальные оси x, y соответственно; H - глубина жидкости; ζ - возвышение свободной поверхности; p - возмущение атмосферного давления; τ_1^w, τ_2^w - проекции касательного напряжения ветра на оси x, y ; τ_1^h, τ_2^h - проекции напряжения придонного трения; ρ -

плотность жидкости; g - ускорение свободного падения; f - параметр Кориолиса; индекс снизу означает дифференцирование по соответствующей переменной.

На вертикальной боковой границе бассейна Γ потребуем равенства нулю нормальной составляющей полного потока

$$U_n|_{\Gamma} = 0 \quad (2)$$

Предположим, что в начальный момент времени $t = 0$ жидкость в бассейне покоится, свободная поверхность горизонтальна, возмущения атмосферного давления отсутствуют:

$$U(x, y, 0) = 0, V(x, y, 0) = 0, \zeta(x, y, 0) = 0, p(x, y, 0) = 0. \quad (3)$$

Циклон моделируется в виде движущейся с постоянной скоростью области возмущений атмосферного давления

$$p(x, y, t) = \begin{cases} p_0 \cos^2 \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{r_c}{R} \right) \right], & r_c \leq R; \\ 0 & , r_c > R, \end{cases} \quad (4)$$

с соответствующим ей полем касательных напряжений ветра.

Здесь r_c - расстояние от точки (x, y) до центра циклона (x_0, y_0) , $x_0(t) = x_0(0) + c_1 t$, $y_0(t) = y_0(0) + c_2 t$, R - радиус циклона, p_0 - максимальное отклонение давления от фонового (невозмущенного) значения, c_1 и c_2 - проекции вектора скорости движения циклона на горизонтальные оси.

Исходная система (1) аппроксимируется неявной разностной схемой переменных направлений [3,4]. Решение задачи ищется для сеточных функций $\{U, V, \zeta\}_{m,n}^k$, определенных в узлах расчетной сетки, состоящей из квадратных ячеек. Граница области интегрирования аппроксимируется ломаной, отрезки которой параллельны одной из горизонтальных осей. В итоге, исходная двумерная нестационарная задача сводится к последовательности одномерных разностных краевых задач, решаемых на каждом временном шаге методом прогонки. Контроль устойчивости

вычислительного процесса осуществляется путем расчета на каждом временном шаге полной механической энергии жидкости в бассейне. Аналогичная математическая модель была использована в [3] для исследования стонно-нагонных колебаний в Черном море. Для адаптации выбранной численной модели к условиям Азовского моря сформирована расчетная область и выполнена аппроксимация береговой черты моря на разностной сетке размерностью 55×40 точек (шаг по пространственным переменным - 6,5 км). Во внутренних узлах сетки заданы реальные значения глубины моря. В граничных точках бассейна глубина принята равной 2 м. Выполненные тестовые расчеты позволили определить оптимальное значение временного шага численной модели (4 минуты). Для анализа изменений уровня, вызываемых движущимися циклонами, выбраны пункты, расположенные по всему периметру побережья моря: Мысовое, Темрюк, Приморско-Ахтарск, Должанская, Ейск, Таганрог, Ново-Азовск, Мариуполь, Бердянск, Геническ. В таблице 1 приведены (в часах) периоды сейшевых колебаний, найденные на основе спектрального анализа рассчитанных полей отклонения свободной поверхности. Здесь показаны основной период T_1 , которому соответствует наибольшая энергия колебаний, и период T_2 , соответствующий второму по величине максимуму энергии колебаний, если он есть. $V_1 = 5$ м/с, $V_2 = 10$ м/с, $V_3 = 15$ м/с. Как видно из этой таблицы, рассмотренные циклоны приводят к возникновению сейшевых колебаний в Азовском море со следующими периодами: 27 ч., 21,5 ч., 16,3 ч., 14,5 ч., 7,2 ч. Наличие в спектре свободных колебаний жидкости составляющей с околосуточным периодом отмечается как на основе анализа данных натуральных наблюдений [5], так и теоретических расчетов [6]. Как показал анализ результатов наших численных экс-

Таблица 1

Периоды колебаний уровня в ряде пунктов побережья Азовского моря

Пункты		Южный циклон			Северный циклон			Северо-западный циклон		
		V_1	V_2	V_3	V_1	V_2	V_3	V_1	V_2	V_3
Мысовое	T_1	27	16.3	16.3	16.3	14.5	16.3	27	16.3	7.2
	T_2	16.3		7.2					7.2	16.3
Темрюк	T_1	27	16.3	16.3	16.3	16.3	16.3	27	16.3	7.2
	T_2	16.3	7.2	7.2						16.3
Приморско-Ахтарск	T_1	27	16.3	16.3	16.3	16.3	16.3	27	16.3	16.3
	T_2	16.3						14.5		11
Должанская	T_1	27	14.5	16.3	16.3	16.3	16.3	27	21.5	16.3
	T_2	16.3								7.2
Ейск	T_1	27	14.5	16.3	16.3	14.5	16.3	43	16.3	16.3
	T_2								21.5	7.2
Таганрог	T_1	27	14.5	16.3	16.3	14.5	14.5	27	27	14.5
	T_2								14.5	27
Ново-Азовск	T_1	27	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	27	27	14.5
	T_2								14.5	27
Марнуполь	T_1	27	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	27	21.5	14.5
	T_2	16.3							14.5	7.2
Бердянск	T_1	16.3	14.5	16.3	16.3	14.5	16.3	27	14.5	7.2
	T_2	27	7.2	7.2				14.5	7.2	14.5
Геническ	T_1	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	27	14.5	14.5
	T_2	27						14.5		8.5

равным 27 часам, может служить прохождение над морем медленных циклонов (со скоростью 5 м/с) любого из рассмотренных здесь типов. Наиболее эффективными являются воздействия южного и северо-западного циклонов. Мода с указанным периодом, как свидетельствуют наши расчеты, наиболее сильно проявляется в Таганроге. Эти результаты находятся в соответствии с оценками для относительных амплитуд сейш, полученными в [6], где для Таганрога относительная амплитуда составляет 94% от максимальной по морю. Из анализа, выполненного в работах [5,6], следует, что колебание с периодом 27 ч. является одноузловой продольной сейшей. Узловая линия этой волны проходит от Бердянска в юго-восточном направлении и заканчивается в районе Приморско-Ахтарска. Отметим, что одноузловая сейша в чистом виде в результате прохождения над морем циклона не образуется, а имеет ме-

сто сложное колебание, представляющее собой суперпозицию нескольких мод.

Сейшевые колебания с периодами 14,5 и 16,3 часа отмечаются после прохождения над морем циклонов всех рассмотренных здесь типов, но интенсивность этих колебаний существенно зависит от скорости движения циклонов. Так, в случае прохождения над морем южного циклона, колебания с указанными выше периодами преобладают для скоростей от 10 до 15 м/с, в случае северного циклона - для всего рассмотренного интервала изменения скоростей, для северо-западного циклона - лишь при скорости 10 м/с. Отметим, что в результате решения задачи на собственные значения в [6] получены следующие периоды сейшевых колебаний: 16,3 часа (вторая мода, имеющая вид двухузловой продольной сейши) и 12,5 часа (третья мода, представляющая собой трехузловую продольную сейшу).

По результатам наших расчетов период, имеющий значение 16,3 часа (см. табл. 1) выделяется для Мысового, Темрюка, Примоско-Ахтарска, Должанской. Это можно объяснить тем, что относительные амплитуды сейш второй моды для этих пунктов, полученные в [6], в несколько раз больше аналогичных относительных амплитуд третьей моды. Как показано в [6], ни для одного из рассмотренных пунктов побережья относительные амплитуды третьей моды не превышают относительных амплитуд второй. Они, как правило, в два и более раз меньше относительных амплитуд второй моды. Исключение составляют Мариуполь и Геническ, в которых относительные амплитуды третьей моды в 1,5 раза меньше соответствующих относительных амплитуд второй моды. В силу этого период, отвечающий третьей моде собственных колебаний и равный 12,5 часам, не выделяется в результате спектрального анализа колебаний уровня моря. Вместо этого периода, отмечается период, имеющий значение около 14,5 часа и отвечающий суперпозиции второй и третьей мод свободных колебаний. О возможности подобного механизма образования сейшевых колебаний с периодами, отличающимися от периодов собственных колебаний в бассейне, указывается в [7]. По мнению авторов указанной статьи, это может быть связано с возникновением комбинационных мод, обязанных своим происхождением взаимодействию собственных колебаний с близкими периодами.

Продemonстрируем механизм образования комбинационных мод на простом примере. Пусть в точке $x=x_0$ колебания свободной поверхности жидкости $\zeta(x_0, t)$ представляет собой суперпозицию двух периодических колебаний $\zeta_1(x_0, t)$ и $\zeta_2(x_0, t)$. Таким образом

$$\zeta(x_0, t) = \zeta_1(x_0, t) + \zeta_2(x_0, t), \quad (5)$$

где

$$\zeta_1(x_0, t) = a_1 \cos \sigma_1 t, \quad \zeta_2(x_0, t) = a_2 \cos \sigma_2 t. \quad (6)$$

Будем считать для определенности, что $a_2 > a_1$. Тогда $\zeta(x_0, t)$ можно записать так:

$$\zeta(x_0, t) = \zeta_3(x_0, t) + \zeta_4(x_0, t). \quad (7)$$

Здесь $\zeta_3(x_0, t) = a_3(t) \cos \sigma_3 t$, $\zeta_4(x_0, t) = a_4 \cos \sigma_4 t$, $a_3(t) = 2a_1 \cos \sigma_4 t$, $a_4 = a_2 - a_1$, (8)

$$\sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_2)/2, \quad \sigma_4 = |\sigma_1 - \sigma_2|/2$$

Из (7), (8) следует, что колебание (5) можно рассматривать также как суперпозицию двух колебаний: $\zeta_3(t)$ и $\zeta_4(t)$. При этом $\zeta_3(t)$ представляет собой колебание с частотой σ_3 , имеющее огибающую с периодом $\tau_4 = 2\pi\sigma_4^{-1}$ и амплитуду $2a_1$. Это колебание будем называть комбинационным. Оно имеет период

$$\tau_k = \frac{4\pi}{\sigma_1 + \sigma_2} = \frac{2\tau_1\tau_2}{(\tau_1 + \tau_2)} \quad (9)$$

Расчет по формуле (9) периода комбинационной моды, возникающей в результате взаимодействия мод сейшевых колебаний с периодами 16,3 ч. и 12,5 ч., дает 14,2 ч.. Это в определенной степени подтверждает наше предположение о том, что колебание с периодом 14,5 ч. является комбинационной модой.

Кроме этого, сделаем еще одно предположение. В силу того, что третья мода оказывает заметное влияние на энергетический спектр колебаний, имея при этом в рассмотренных пунктах относительную амплитуду намного меньшую, чем у второй моды, можно заключить следующее: амплитуда сейши второй моды, образующейся в результате прохождения циклонов над Азовским морем, намного меньше амплитуды сейши третьей моды.

Отметим также, что в Азовском море может существовать комбинационная мода с периодом равным 21,5 часа, возникающая после прохождения над морем северо-западного циклона со скоростью 10 м/с. Эта мода является следствием взаимодействия мод с периодами 27 и 16,3 часа. В результате спектрального анализа она выделяется в Ейске, Мариуполе и Должанской.

Наряду с достаточно длиннопериодными колебаниями (от 14,5 часов до суток), прохождение циклонов над

Азовским морем может приводить к возникновению сейш с периодом равным 7,2 часа. На наличие сейши с таким периодом в юго-западной части моря указывается в [8], а также в [6], где получено решение задачи на собственные значения. Наши расчеты показали, что причиной образования сейши с периодом 7,2 часа может служить перемещение над морем северо-западного циклона со скоростью 15 м/с. При этом в Мысовом, Темрюке, Бердянске главный максимум в энергетическом спектре отмечается на этом периоде. Данному факту можно предложить следующее объяснение. В [6] установлено, что для указанных пунктов относительный максимум амплитуды собственных колебаний седьмой моды, имеющей период 7,4 часа, больше, чем относительные максимумы первой и третьей мод, и очень мало отличается от относительной амплитуды второй моды.

Итак, основываясь на результатах математического моделирования прохождения над Азовским морем типичных для данного региона циклонов, на анализе решения задачи на собственные значения [6] и результатах обработки данных натуральных наблюдений [5,8], имеем следующую картину сейшевых колебаний в Азовском море. Модовый состав сейшевых колебаний, вызванных прохождением над морем циклонических образований, представлен первой модой, имеющей период равный 27 часам, второй модой с периодом 16,3 часа, третьей модой с периодом 12,5 часа и седьмой модой, период которой равен 7,2 часа. Мода с периодом 27 часов возникает после прохождения над морем медленных южных и северо-западных циклонов со скоростью 5 м/с. В результате суперпозиции второй и третьей мод сейшевых колебаний в большинстве рассмотренных пунктов образуется волна с периодом 14,5 часа. Для пунктов Мысовое, Темрюк, Приморско-Ахтарск, Бер-

дянск, Должанская, в которых оценка максимумов относительных амплитуд сейш [6] дает значительное преобладание второй моды над третьей, отмечается период равный 16,3 часам, соответствующий второй моде собственных колебаний жидкости в бассейне Азовского моря. В результате прохождения над морем быстрых (со скоростью 15 м/с) северо-западных циклонов возникают сейши с периодом равным 7,2 часа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проект "Моря СССР". Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, т. V, Азовское море. С.-Петербург: Гидрометеоздат, 1991, - 200 с.
2. Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В. Основные океанологические задачи теории мелкой воды. - Л.: Гидрометеоздат, 1968. - 300 с.
3. Коновалов А.В., Черкесов Л.В. Моделирование длинных баротропных волн в Черном море, вызываемых движущимися барическими возмущениями// *Океанология*, 1996, №2, с. 191-196.
4. Марчук Г.И., Каган Б.А. Океанские приливы.- Л.: Гидрометеоздат, 1977.- 296 с.
5. Герман В.Х. Спектральный анализ колебаний уровня Азовского моря в диапазоне частот от одного цикла за несколько часов до одного цикла за несколько суток// *Труды ГОИН*, вып. 103, 1970.
6. Иванов В.А., Мянцлюк Ю.В., Черкесов Л.В. О сейшах Азовского моря// *Метеорология и гидрология*, 1994, №6, с. 105-110.
7. Вольцингер Н.Е., Демиров Е.К., Каган Б.А. Резонансное усиление длинноволновых возмущений на северо-западном шельфе Черного моря// *Доклады Академии Наук СССР*, 1991, том 320, № 2., с. 456-460..
8. Курчатова И.В. Сейши в Черном и Азовском морях// *Известия центрального гидрометбюро*, вып. 4, Л., 1925.