

УДК 556.54(262.5)

Коморин В. Н., к.г.н., Тучковенко Ю.С., к.ф.-м.н.

Гидрометцентр Черного и Азовского морей

Одесский филиал Института биологии южных морей НАН

Украины

Использование численной гидродинамической модели для прогноза сгонно-нагонных колебаний уровня моря в портах северо-западного шельфа Черного моря

Рассматриваются результаты использования в оперативной практике Гидрометцентра Черного и Азовского морей численной гидродинамической модели для прогноза сгонно-нагонных колебаний уровня моря в портах северо-западной части Черного моря.

Введение. В прибрежной зоне Черного моря инициируемые ветром сгонно-нагонные колебания уровня поверхности существенно влияют на безопасность мореплавания, а также определяют динамическое воздействие волн и течений на берега и морские гидротехнические сооружения. В северо-западном шельфе Черного моря (СЗЧМ) наиболее значительные сгонно-нагонные колебания уровня (>30 см) отмечаются в осенне-зимний период. Например, у Одессы максимальное повышение уровня относительно среднего многолетнего его значения (отмеченное 6 января 1985 г.) составило 100 см, а максимальное падение (отмеченное 26 ноября 1964 г.) - 182 см. Сгонно-нагонные явления у Одессы проявляются на протяжении всего года, при этом наблюдается преобладание сильных сгонов над нагонами [1]. Своевременное предупреждение об опасных сгонно-нагонных явлениях позволяет создать условия для нормального судоходства и избежать возможного ущерба хозяйству прибрежных регионов. Одним из способов, позволяющих прогнозировать сгонно-нагонные колебания уровня моря, является метод численного математического моделирования.

Цель работы заключается в обобщении опыта и изложении результатов использования численного метода прогноза опасных сгонно-нагонных колебаний уровня моря отделом морских прогнозов Гидрометцентра Черного и Азовского морей (ГМЦ ЧАМ) для портов Одесского региона СЗЧМ: Одесса, Ильичевск и Южный.

Описание модели. Расчет интегральной по глубине циркуляции вод и колебаний уровня моря в СЗЧМ выполнялся на основе уравнений теории мелкой воды в двумерном приближении [2] -[5]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{1}{\rho_w H} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \xi}{\partial y} = \frac{1}{\rho_w H} (\tau_{sy} - \tau_{by}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Здесь u, v - компоненты вектора \vec{V} средней по глубине скорости течений по осям x и y ; $H = h + \xi$ - полная глубина; h - глубина на невозмущённой воде; ξ - отклонение уровневной поверхности от невозмущённого состояния; ρ_w - плотность воды; $\vec{\tau}_s (\tau_{sx}, \tau_{sy})$, $\vec{\tau}_b (\tau_{bx}, \tau_{by})$ - векторы касательных напряжений поверхностного и донного трения, соответственно; $f = 2\omega \sin \varphi$ - параметр Кориолиса; ω - вертикальная составляющая вектора углового вращения Земли; φ - широта места; g - ускорение свободного падения; t - время.

Уравнения (1)–(3) считаются заданными в некоторой области изменения пространственных переменных с достаточно гладкой границей, совпадающей с естественными границами акватории СЗЧМ.

В качестве граничных условий на твердых границах $\Gamma_{ТВ}$ для системы (1) – (3) ставится условие непротекания: $V_n = 0$; на жидкой границе $\Gamma_{ж}$ – условие излучения [2,3]: $V_n = \xi \sqrt{g/H}$, $\partial V_\tau / \partial n = 0$ (V_n, V_τ – соответственно нормальная и тангенциальная к границе составляющие вектора скорости течения, n – единичная внешняя нормаль к граничному контуру Γ).

Вектор касательного напряжения трения ветра определяется по следующей формуле:

$$\vec{\tau}_s = \rho_a C_d |\vec{W}_a| \vec{W}_a, \quad (4)$$

где ρ_a - плотность воздуха ($\rho_a = 1,25 \text{ кг/м}^3$); \vec{W}_a - вектор скорости ветра;

$$C_d = \begin{cases} 1.1 \cdot 10^{-3} & \text{при } |W_a| \leq 6 \text{ м/с} \\ 10^{-3} (0.61 + 0.063 |W_a|) & \text{при } 6 < |W_a| < 22 \text{ м/с} \end{cases}$$

Вектор касательного напряжения донного трения определяется квадратичным законом сопротивления:

$$\vec{\tau}_b = \rho_w C_H |\vec{V}| \vec{V}, \quad (5)$$

где $C_H = 2.6 \cdot 10^{-3}$ - коэффициент донного трения.

Уравнения модели с соответствующими граничными условиями аппроксимируются на перемежающейся пространственной сетке с

помощью численного конечно - разностного метода, подробное описание которого представлено в [5].

В начальный момент времени $t=0$ принимается $\vec{V}(x, y)=0$, $\xi(x, y)=0$. Это вполне оправдано, поскольку время приспособления течений к внешнему воздействию невелико (несколько часов) и значительно меньше рассматриваемых временных (прогностических) масштабов изменчивости (естественно - синоптический период).

Поскольку для рельефа дна СЗЧМ характерен резкий свал глубин с 5 до 20 м в узкой прибрежной полосе, ширина которой значительно меньше пространственного шага расчетной сетки, то возрастание амплитуды колебаний уровня моря при выходе длинной волны на мелководье учитывалось введением пересчетного множителя:

$$\xi_{ш} = \xi_{Г} \sqrt{H_{Г} / H_{ш}} \quad (6)$$

Здесь $\xi_{Г}$ – уровень моря в глубокой части моря (модельный), $\xi_{ш}$ – уровень моря в точке наблюдения (в прибрежной полосе), $H_{Г}$ и $H_{ш}$ – глубины в ближайшей к берегу расчетной точке и в точке наблюдения соответственно. Соотношение (6) следует из условия неразрывности полного потока $Q = \xi \sqrt{g/H}$ при выходе длинной волны на кромку шельфа [6] и фактически представляет собой упрощенную форму телескопизации.

Использование модели в оперативной практике. Модель была введена в эксплуатацию в отделе морских прогнозов ГМЦ ЧАМ в январе 1998 г. для прогноза опасных сгонно-нагонных колебаний уровня моря в портах Одесса, Ильичевск и Южный. Заблаговременность прогноза составляет одни сутки. Исходными данными являются рельеф дна, конфигурация береговой линии северо-западного шельфа Черного моря, а также временной ряд изменчивости однородного над акваторией СЗЧМ поля ветра, задаваемого с дискретностью три часа. Расчет отметок уровня моря проводится в течение восьмисуточного отрезка модельного времени. Для первых семи суток расчета вводятся наблюдаемые в портах СЗЧМ значения направления и скорости ветра, с целью восстановления предыстории изменчивости отметок уровенной поверхности. В восьмые (прогностические) сутки модельного времени используются оперативные прогностические значения направления и скорости ветра (однородные по пространству), получаемые в ГМЦ ЧАМ.

Для работы с вышеописанной моделью в оперативном режиме была создана программа Leviathan 1.0. Программа позволяет подготовить данные к расчету уровня моря, провести расчеты и в необходимом виде получить результаты.

Использование данных в модельных расчетах предполагает создание базы данных, поскольку для прогноза необходима информация о предыстории прогнозируемых процессов. Эти данные необходимы также

для верификации и усовершенствования модели. База данных системы Leviathan 1.0 предназначена для занесения и хранения информации, поступающей в Гидрометцентр Черного и Азовского морей (ГМЦ ЧАМ) по кодам КН-01, КН-01с, КН-02с. Это реляционная база данных в формате DBASE IV - Clipper 5.01. Система базы данных позволяет также осуществлять пространственно-временные выборки по заданным параметрам, проводить расчет некоторых статистических характеристик, используемых в оперативной работе отдела морских прогнозов.

Анализ прогностических возможностей модели. Надежность и эффективность численного метода прогноза уровня моря были оценены на основании инструкции [7]. Испытание метода проводилось для пунктов Одесса, Ильичевск и Южный в период с января 1998 г. по июль 1998 г. Для каждого из пунктов были отобраны 34 синоптические ситуации, которые характеризуются большими значениями модуля скорости ветра (> 10 м/с). С заблаговременностью одни сутки были рассчитаны прогностические значения уровня моря для каждого из названных пунктов. К рассмотрению принимались лишь те случаи, когда оправдался прогноз ветра. Для описания истории процесса использовались значения направления модуля вектора скорости ветра, наблюдаемого в п.Одесса, с дискретностью три часа.

Для каждого случая было рассчитано значение ошибки (погрешности) прогноза, которое равно модулю разности между наблюдаемой и вычисленной величинами. Если значение погрешности прогноза было не больше принятого значения допустимой погрешности, то прогноз считался оправдавшимся. Оправдываемость метода была рассчитана как доля оправдавшихся прогнозов от общего их количества, выраженная в процентах. Статистические характеристики наблюдаемого уровня и значения оправдываемости метода для Одессы, Ильичевска и Южного представлены в табл. 1.

Критерием применимости и качества методов прогнозов принимается отношение средней квадратичной ошибки корреляционной связи к среднему квадратичному отклонению от нормы предсказываемого явления S/σ . Для каждого из пунктов значения S были рассчитаны по формуле [7]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (\xi - \xi_B)^2}{n - 1}} \quad (7)$$

где ξ – наблюдаемое значение уровня моря в рассматриваемой точке, ξ_B – рассчитанное значение уровня моря в рассматриваемой точке, n – число случаев ($n = 34$)

Чем меньше отношение S/σ , тем надежнее метод. В случае существования функциональной зависимости отношение $S/\sigma = 0$, в случае

отсутствия связи $S/\sigma = 1$. Допустимые в прогнозах значения отношения S/σ в зависимости от числа наблюдений n должны находиться в следующих пределах:

при $n < 16$ $S/\sigma = 0,57$;

при $15 < n < 25$ $S/\sigma < 0,62$;

при $n > 25$ $S/\sigma < 0,67$.

Значения величины S/σ для портов Одесса, Ильичевск и Южный составили соответственно 0,57; 0,62; 0,62. Следовательно, метод можно признать достаточно точным для использования в оперативной практике, поскольку для 34 случаев ($n > 25$), предельное значение величины S/σ равно 0,67.

Таблица 1. Статистические характеристики наблюдаемого уровня и оправдываемость метода для портов Одесса, Ильичевск и Южный

Характеристика	Одесса	Ильичевск	Южный
Средняя набл. отметка, см	483	486	489
Миним. набл. отметка, см	424	414	452
Максим. набл. отметка, см	550	564	531
Среднее квадр. откл. набл. уровня σ , см	32	39	30
Допустимая погрешность прогноза $0.674 \cdot \sigma$, см	21.6	26.3	20.2
Оправдываемость метода прогноза (%)	88	76	85

Эффективность внедряемого метода может быть охарактеризована разностью между обеспеченностью рассматриваемого метода и обеспеченностью инерционных прогнозов [8]. Если в качестве допустимой погрешности использовать величину $\pm 0,674\sigma$, то для п.Одесса эффективность прогноза составляет 48%, для п.Ильичевск - 26%, для п.Южный - 55%.

Для более глубокого анализа ошибок верифицируемых прогнозов для каждого из анализируемых пунктов были построены графики обеспеченности метода (рис. 1-3.), где на оси ординат отложены погрешности, выраженные в долях от значения среднего квадратичного отклонения наблюдаемого уровня (σ), а на оси абсцисс их повторяемость в процентах. На этих же графиках приведены кривые обеспеченности инерционного метода и природная обеспеченность.

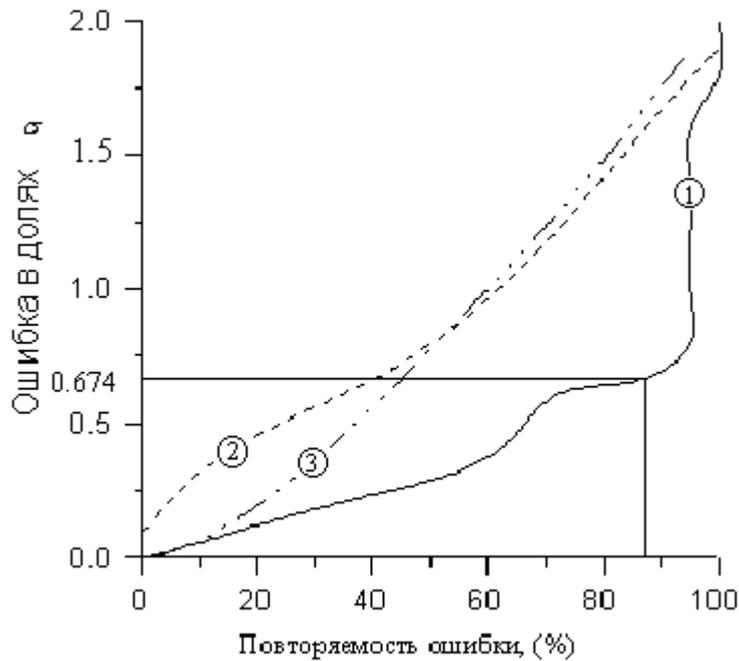


Рис. 1. Кривые обеспеченности численного метода прогноза (1), инерционного метода (2) и природная обеспеченность (3) для п.Одесса.

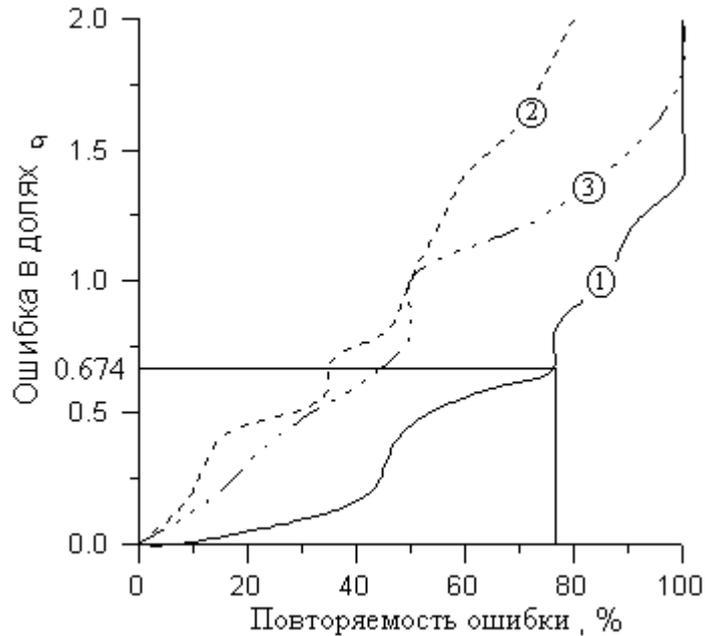


Рис. 2. Кривые обеспеченности численного метода прогноза (1), инерционного метода (2) и природная обеспеченность (3) для п.Ильичевск.

Высокое значение эффективности метода для п.Южный обусловлено исключительно низкими значениями обеспеченности инерционного

прогноза. Значения оправдываемости метода для пп.Одесса, Южный и Ильичевск при допустимой погрешности $\pm 0,674\sigma$ равны соответственно 88 %, 76 % и 85%. Низкая оправдываемость для п.Ильичевск вызвана завышенными значениями прогностического уровня при нагонных ситуациях. Анализ этого эффекта потребовал привлечения большего количества наблюдений. По-видимому, на колебания уровня в морском пункте наблюдения п.Ильичевск существенное влияние оказывает водообмен моря с лиманом Сухой, что в модели не учтено.

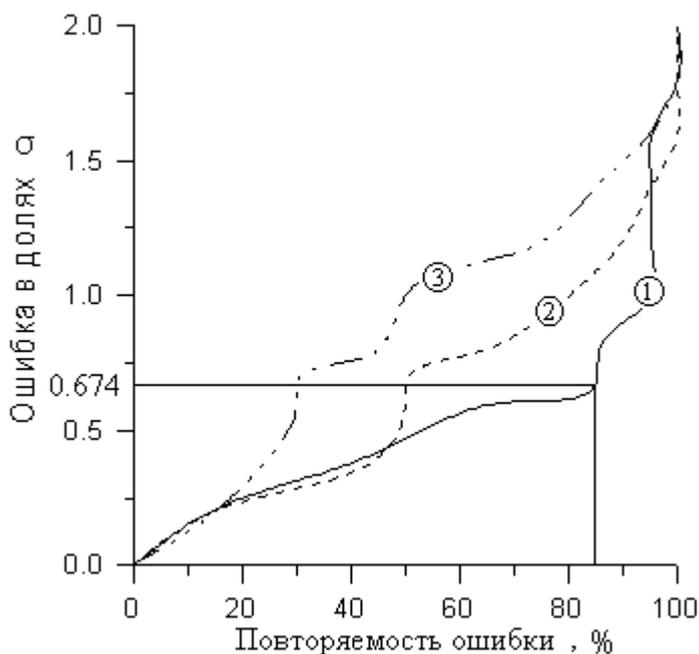


Рис. 3. Кривые обеспеченности численного метода прогноза (1), инерционного метода (2) и природная обеспеченность (3) для п.Южный.

Выводы. Приведенные результаты позволяют утверждать, что качество рассматриваемого метода прогноза можно оценить как "хорошее". При этом, для портов Одесса и Южный показатели надежности и эффективности метода выше, чем для п.Ильичевск. Повысить эффективность метода возможно, если учесть влияние на изменение уровня в п.Ильичевск водообмена Сухого лимана с морем, а также если в качестве исходной информации использовать неоднородное по пространству прогностическое поле ветра, полученное с помощью мезомасштабной метеорологической модели. Представленную модель можно использовать в оперативной практике отдела морских прогнозов.

Благодарности. Авторы считают своим долгом отметить, что данная работа была выполнена по инициативе и под руководством Е.А. Собченко. Благодаря его вниманию и поддержке работа была успешно

завершена. В настоящее время внедряется рассмотренный метод прогноза сгонно-нагонных явлений в портах Азовского моря.

Авторы также выражают свою благодарность за оказанную при испытании метода помощь всем сотрудникам отдела морских прогнозов ГМЦ ЧАМ.

Список литературы

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. -Т. IV.- Черное море.– Вып. 1. –Гидрометеорологические условия/ Под ред. А. И. Симонова, Э. Н. Альтмана. –СПб: Гидрометеоиздат.– 1991. – 430 с.
2. Блатов А. С., Иванов В. А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря. – Киев: Наук. Думка.– 1992. –344с.
3. Вольцингер Н. Е., Пясковский Р. В. Теория мелкой воды. Океанологические задачи и численные методы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 207.
4. Герман В. Х., Левиков С. П. Вероятностный анализ и моделирование колебаний уровня моря. Л.: Гидрометеоиздат.– 1988. –229 с.
5. Лонин С.А., Тучковенко Ю.С. Имитация сгонно-нагонных колебаний уровня моря в портах северо-западной части Черного моря //Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: МГИ.– 1999.– С.58-66.
6. Некрасов А. В. Приливные волны в ораинных морях. – Л.: Гидрометеоиздат.– 1975. – С.195-200.
7. Наставление по службе прогнозов. Служба морских прогнозов.– Раздел 3.– Часть III.– Л: Гидрометеоиздат.– 1982. – 144 с.
8. Кудрявая К.И., Серяков Е.И., Скриптунова Л.И. Морские гидрологические прогнозы/ Под ред. Кудрявой К.И. и Николаева Ю.В.–Л: Гидрометеоиздат.–1974.– 312 с.

Usage of numerical hydrodynamic model for the forecast of the fluctuations of a sea level, initiated by a wind, in ports of the northwest shelf of Black Sea

Komorin V.N., Tuchkovenko Y.S.

It is considered the results of numerical hydrodynamical modelling for forecasting of fluctuations, initiated by a wind, of a sea level in operative practice of Hydrometeorological Centre of the Black and Azov Sea.