

УДК 551.46.0:551.465

РЕЗУЛЬТАТЫ АДАПТАЦИИ И ВЕРИФИКАЦИИ КОМПЛЕКСА ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Д. В. Кушнир¹, Ю. С. Тучковенко¹, Ю. И. Попов²

¹ Одесский государственный экологический университет, ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, dkush@ukr.net

² Филиал Одесского района Госгидрографии, пер. Маячный, 5, 65038, Одесса, Украина, office@hydro.od.ua

В 2014 году Украина лишилась национальной автоматизированной системы морского прогнозирования для Черного моря, которая была создана и функционировала на базе Морского гидрофизического института Национальной академии наук Украины, расположенного в Крыму.

В рамках научно-исследовательских работ по созданию новой системы морского прогнозирования рассматривается возможность использования известного комплекса интегрированных моделей Delft3D-FLOW + SWAN (Simulating WAVes Nearshore) для оперативного прогнозирования краткосрочной (5-10 суток) пространственно-временной изменчивости океанографических характеристик акватории украинской части Азово-Черноморского бассейна. Для обеспечения работы модельного комплекса в прогностическом режиме предполагается использовать прогноз изменчивости метеорологических характеристик на границе раздела «море-атмосфера», полученный при помощи глобальной численной модели прогноза погоды GFS (Global Forecast System).

В статье представлены результаты верификации моделей Delft3D-FLOW и SWAN, адаптированных к использованию в условиях северо-западной части Черного моря и ее Одесского района, в варианте с усвоением метеорологических данных (полей скорости и направления ветра, атмосферного давления) из архива прогнозов GFS. При адаптации модельного комплекса к условиям прогностической области использовался метод телескопизации пространственных криволинейных расчетных сеток с различной разрешающей способностью. Верификация моделей проводилась путем сравнения результатов моделирования с данными наблюдений за изменчивостью уровня моря в портах Одесского района северо-западной части Черного моря (Черноморск, Одесса, Южный), а также с данными о скорости и направлении ветра, дрейфовых течений, характеристик ветрового волнения, которые были зарегистрированы датчиками гидрометеорологического буя, стационарно установленного в Одесском заливе, в рассматриваемые периоды.

На основе анализа результатов верификации комплекса интегрированных численных математических моделей Delft3D-FLOW + SWAN сделан вывод о том, что данный комплекс имеет хорошие перспективы использования в системе оперативного прогноза изменчивости океанографических параметров состояния морской среды украинской части акватории Азово-Черноморского бассейна в варианте с ассимиляцией прогностической метеорологической информации, получаемой при помощи глобальной модели прогноза погоды GFS.

Ключевые слова: Черное море, северо-западная часть, океанографические характеристики, численное моделирование, верификация моделей, прогноз.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Европейском Союзе принята и действует программа Европейской Комиссии по исследованию и мониторингу земной поверхности – COPERNICUS, до декабря 2012 г. носившая название GMES (Global Monitoring for Environment and Security) [1]. В странах-участницах данной программы были созданы службы мониторинга, которые предос-

тавляют европейским институтам и органам управления информационные продукты и услуги по шести направлениям исследований:

- состав атмосферы (служба Copernicus Atmosphere Monitoring Service – CAMS);
- состояние и изменчивость морских экосистем мирового океана и европейских региональных морей (служба Copernicus Marine Environment Monitoring Service – CMEMS);

– изменчивость земного покрова, землепользование, круговорот воды и энергии на земной поверхности (служба Copernicus Land Monitoring Service – CLMS);

– исторические, текущие и будущие климатические условия в Европе и в остальном мире (служба Copernicus Climate Change Service – C3S);

– безопасность (служба Copernicus service for Security application);

– реагирование на чрезвычайные ситуации (служба Copernicus Emergency Management Service – EMS).

Для выполнения своих задач морская служба CMEMS программы COPERNICUS обеспечивает непрерывную работу центров по мониторингу и прогнозированию состояния морей Европы (Monitoring and Forecasting Centers – MFC), которые осуществляют гидротермодинамическое моделирование при помощи численных прогностических моделей с усвоением данных дистанционного зондирования и натурных наблюдений, полученных от тематических центров сбора данных (Thematic Data Assembly Centers – TAC), и генерируют данные ре-анализа (ретроспективного анализа), анализа (на текущий момент времени) и 10-ти суточного прогноза изменчивости гидрофизических параметров морской среды (морские течения, температура воды, ветер, соленость, уровень моря, ледовая обстановка и биогеохимический состав морских вод) [1, 2].

Для включения Украины в создаваемую систему морских центров мониторинга и прогнозирования службы CMEMS, в рамках реализации проектов MyOcean (2009-2012 гг.) и MyOcean-2 (2012-2014 гг.), на базе Морского гидрофизического института (МГИ) НАН Украины (г. Севастополь) был создан Экспериментальный центр морских прогнозов для Черного моря [3, 4], который должен был стать одним из европейских центров диагноза и прогноза состояния морской среды (MFC).

В работе центра для прогноза гидрофизических параметров состояния Черного моря (температуры, солености морской воды, уровня моря и горизонтальных компонент скоростей течений) использовалась гидродинамическая модель МГИ [5]. Прогноз выполнялся на срок до 5 суток и обновлялся ежедневно.

После выхода крымских научных организаций из-под юрисдикции Украины в 2014 г., данный центр перестал обслуживать потребности Украины в морских прогнозах и был исключен из числа европейских центров MFC.

В связи с этим, особую актуальность приобрела задача восстановления функционирования современной системы оперативного прогноза гидрологических и гидрофизических параметров состояния морской среды украинской части акватории Азово-Черноморского бассейна для обеспечения потребностей морехозяйственного комплекса Украины на базе Гидрометцентра Черного и Азовского морей – ГМЦ ЧАМ (Одесса). В решении этой задачи принимает участие Одесский государственный экологический университет, на базе которого, при финансовой поддержке Министерства образования и науки Украины, в настоящее время выполняется научно-исследовательский проект «Разработка составляющих национальной системы морских прогнозов Украины» (2017-2019 гг.).

Для прогнозирования краткосрочной (5-10 суток) пространственно-временной изменчивости океанографических характеристик акватории украинской части Азово-Черноморского бассейна предполагается использовать комплекс интегрированных моделей Delft3D-FLOW + SWAN. Гидродинамическая модель Delft3D-FLOW [6, 7] позволяет рассчитывать пространственно-временные изменения уровня моря, температуры и солености вод, трехмерных течений. Спектральная модель SWAN (Simulating WAVes Nearshore) [8, 9] используется для расчета распространения на мелководье и трансформации параметров ветрового волнения по заданным полям ветра, течений и топографии дна. Следует отметить, что указанные модели успешно применяются океанографическим офисом оперативной поддержки ВМС США NAVOCEANO [10] для прогнозирования волнения и циркуляции вод в прибрежных районах [11]. Данный модельный комплекс также широко используется гидрометеослужбами Европейского союза и США с целью оперативного прогнозирования параметров состояния морской среды и вынесения предупреждений об опасных гидрофизических явлениях [12-14].

В качестве исходной информации для прогнозирования океанографических характеристик, на данном этапе работ предполагается использовать метеорологические данные глобальной численной модели прогноза погоды GFS (Global Forecast System) Национальных центров по прогнозированию окружающей среды NCEP (National Centers for Environmental Predictions) США [15]. Пространственное разрешение прогностических данных модели GFS в горизонтальной плоскости составляет $0,25^\circ$

по широте и долготе. Использование в оперативной практике метеоданных модели GFS является оправданным и перспективным в связи с наличием открытого доступа к ним через веб-сервис NOMADS (National Operational Model Archive and Distribution System) Национальной метеорологической службы США [16, 17]. Пользователям сервиса NOMADS предоставлена возможность загружать прогнозные данные как с трехчасовым прогностическим интервалом (8 раз в сутки с заблаговременностью 240 часов), так и с интервалом в один час (с заблаговременностью не более 120 часов).

Цель работы заключается в представлении результатов адаптации комплекса интегрированных моделей Delft3D-FLOW + SWAN к условиям северо-западной части Черного моря (СЗЧМ) и верификации моделей с использованием архивных данных GFS-прогноза и наблюдений на прибрежных морских гидрометеорологических станциях, а также на морском гидрометеорологическом буе. На данном этапе

работ модельный комплекс использовался для расчета вызванных ветром колебаний уровня моря и характеристик ветрового волнения.

2. ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Модель Delft3D-FLOW базируется на численном решении трехмерных уравнений Навье-Стокса для несжимаемой жидкости на мелкой воде в приближении Буссинеска. Система дифференциальных прогностических уравнений модели состоит из уравнений движения, уравнения неразрывности, уравнения транспорта скалярных величин и замыкающей эти уравнения модели турбулентности [7].

Трехмерные уравнения движения модели Delft3D-FLOW, представленные для удобства чтения в прямолинейной системе координат по горизонтали и σ -системе координат по вертикали, имеют следующий вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - fv = -\frac{1}{\rho} P_u + F_u + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + fu = -\frac{1}{\rho} P_v + F_v + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = -\frac{\partial \zeta}{\partial t} - \frac{\partial [(d + \zeta)u]}{\partial x} - \frac{\partial [(d + \zeta)v]}{\partial y}, \quad (3)$$

где $u(x, y, \sigma, t)$, $v(x, y, \sigma, t)$ и $\omega(x, y, \sigma, t)$ – компоненты векторов скорости течения в горизонтальном (x, y) и вертикальном (σ) направлениях соответственно, м с⁻¹; $\zeta(x, y)$ – уровень воды выше отсчетной плоскости, м; $d(x, y)$ – глубина воды ниже отсчетной плоскости, м; $H(x, y) = d(x, y) + \zeta(x, y)$ – полная локальная глубина, м; t – время, с; $f = 2\Omega \sin \varphi$ – параметр Кориолиса; ρ – плотность воды, кг м⁻³; P_u и P_v – члены, описывающие горизонтальное давление; F_u и F_v – члены, описывающие горизонтальную вязкость жидкости; ν_V – коэффициент вертикальной турбулентной вязкости.

Силы F_u и F_v в уравнениях движения (1, 2) представляют собой горизонтальные напряжения Рейнольдса в упрощенной, согласно [18], форме:

$$F_u = \nu_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \quad (4)$$

$$F_v = \nu_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), \quad (5)$$

где ν_H – коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости.

Коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной вязкости определяются следующим образом:

$$\nu_H = \nu_{3D} + \nu_H^{back}, \quad (6)$$

$$\nu_V = \nu_{mol} + \max(\nu_{3D}, \nu_V^{back}), \quad (7)$$

где ν_{3D} – вязкость, рассчитываемая в k - ϵ модели

турбулентности; v_H^{back} , v_V^{back} – пороговые значения коэффициентов горизонтальной и вертикальной турбулентной вязкости соответственно; v_{mol} – коэффициент молекулярной вязкости.

Для уравнения скорости вертикального движения принимается гидростатическое приближение. Вертикальная скорость течения ω в σ -системе координат рассчитывается через уравнение неразрывности интегрированием по вертикали от дна до уровня σ ($-1 \leq \sigma \leq 0$).

Граничные условия для уравнений движения на верхней свободной поверхности моделируемой области ($\sigma = 0$) имеют следующий вид:

$$\frac{v_H}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=0} = \frac{1}{\rho_0} |\bar{\tau}_s| \cos(\theta), \quad (8)$$

$$c_d(U_{10}) = \begin{cases} c_d^A, & U_{10} < U_{10}^A \\ c_d^A + \frac{c_d^B - c_d^A}{U_{10}^B - U_{10}^A} (U_{10} - U_{10}^A), & U_{10}^A \leq U_{10} \leq U_{10}^B \\ c_d^B, & U_{10} \geq U_{10}^B \end{cases}, \quad (11)$$

где c_d^A , c_d^B – значения коэффициента ветрового трения при скоростях ветра U_{10}^A и U_{10}^B соответственно.

Граничные условия для уравнений движения на дне ($\sigma = -1$) имеют вид:

$$\frac{v_V}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=-1} = \frac{\tau_{bx}}{\rho}, \quad (12)$$

$$\frac{v_V}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=-1} = \frac{\tau_{by}}{\rho}. \quad (13)$$

Придонное напряжение трения на дне определяется через скорость придонного течения. Предполагается, что вектор придонного напряжения трения совпадает по направлению с вектором скорости придонного течения и его вели-

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (16)$$

где $N = E(\sigma, \theta, x, y) / \sigma$ – плотность волновой энергии; c_x, c_y – скорость переноса волновой энергии в плоскости (x, y) ; c_σ, c_θ – скорость пере-

$$\frac{v_H}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=0} = \frac{1}{\rho_0} |\bar{\tau}_s| \sin(\theta), \quad (9)$$

где θ – угол между вектором ветрового напряжения трения $\bar{\tau}_s$ и направлением локальной системы координат.

Ветровое напряжение трения на свободной поверхности моделируемой области $\bar{\tau}_s = (\tau_{sx}, \tau_{sy})$ определяется как

$$|\bar{\tau}_s| = \rho_a c_d U_{10}^2, \quad (10)$$

где ρ_a – плотность воздуха; $\bar{U}_{10} = (U_x, U_y)$ – скорость ветра на высоте 10 м; c_d – коэффициент поверхностного ветрового трения, который задается в соответствии со следующим соотношением:

чина определяется квадратичным законом

$$\bar{\tau}_b = \frac{g \rho_0 \bar{u}_b |\bar{u}_b|}{c_D^2}, \quad (14)$$

где $g = 9,81 \text{ м с}^{-2}$ – ускорение свободного падения; ρ_0 – начальная плотность воды; c_D – коэффициент придонного трения:

$$c_D = \frac{\sqrt[6]{H}}{n}, \quad (15)$$

где n – коэффициент Маннинга, $\text{м}^{-1/3} \text{ с}$.

В основу модели SWAN положена система решения спектрального уравнения сохранения энергии волн, с учетом ее источников и стоков [8]:

носа волновой энергии в частотно-угловой плоскости (σ, θ) ; S – функция источников и стоков волновой энергии.

Для расчета донного трения в модели SWAN используются эмпирическая модель JONSWAP [19], модель трения Коллинза [20] или турбулентная модель Мадсена [21]. Эти модели в общем виде могут быть представлены в следующей форме

$$S_{ds,b} = -C_b \frac{\sigma^2}{g^2 \sin H^2 kd} E(\sigma, \theta), \quad (17)$$

где C_b – коэффициент донного трения, который зависит от придонного орбитального движения; σ – относительная круговая частота; k – волновое число; $E(\sigma, \theta)$ – плотность энергии в частотно-угловой плоскости (σ, θ) .

Программные коды моделей Delft3D-FLOW и SWAN, скомпилированные в исполняемые файлы при помощи компиляторов Fortran и C++, выполняются последовательно на одних и тех же криволинейных расчетных сетках и используют один набор ядер процессора компьютерной станции (или узлов вычислительного кластера) (рис. 1). При проведении гидродинамических расчетов, модель Delft3D-FLOW разбивает задачу для ее параллельного выполнения на процессорных ядрах (узлах) при помощи программного интерфейса Message Passing Interface (MPI). Модель SWAN при расчетах по умолчанию выполняет параллельные вычисления на всех ядрах процессора в соответствии со стандартом OpenMP (Open Multi-Processing).

При выполнении модельных расчетов в интегрированном режиме (*coupled mode*), модуль WAVE (SWAN) на каждом расчетном шаге получает (через буфер обмена) от гидродинамического модуля FLOW поля течений, уровня моря, зональных и меридиональных компонент скорости ветра для расчета параметров ветрового волнения, которые, в свою очередь, затем передаются в гидродинамический модуль для дальнейших расчетов уровня моря и течений.



Рис. 1 – Схема работы комплекса интегрированных моделей Delft3D-FLOW + SWAN

3. УСЛОВИЯ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ

При проведении расчетов с использованием интегрированной 3D-модели течений, уровня моря и волнения использовался метод «телескопизации». Акватория Азово-Черноморского бассейна покрывалась базовой криволинейной расчетной сеткой, которая состояла из 31271 расчетных ячеек с переменными размерами Δ_{xy} от 2,5 до 5 км (1 на рис. 2а). Внутри базовой расчетной сетки были сгенерированы вложенные расчетные сетки с большей детализацией: Δ_{xy} – в пределах 800 м-1,5 км для северо-западной части Черного моря (СЗЧМ) (2 на рис. 2а) и 90-250 м – для акватории Одесского района СЗЧМ, где расположены морские порты Черноморск, Одесса, Южный (рис. 2б). При построении расчетных сеток были использованы оцифрованные топографические карты Генштаба Украины выпуска 1970-1980 гг. масштабов 1:50000, 1:100000, 1:200000; навигационные карты Черного и Азовского морей издательства ГУ «Госгидрография» «Укрморкартография» выпуска 2000-2008 гг. масштабов 1:50000, 1:100000, 1:200000, 1:10000; массив данных ФГУ «Одесский район Госгидрографии» о глубинах в северо-западной части Черного моря с пространственным разрешением $0,002^\circ$ по широте и долготе.

Адаптация вышеуказанного комплекса численных математических моделей проводилась при задании однородных в пространстве и стационарных по времени ветровых условий. Моделирование выполнялось в течение 4 суток модельного времени при стационарных штормовых ветрах скоростью 20 м с^{-1} разных направлений. Значения коэффициентов ветрового трения c_d^A и c_d^B при этом принимались равными соответственно $1,255 \times 10^{-3}$ (при $U_{10}^A \leq 7 \text{ м/с}$) и $2,425 \times 10^{-3}$ (при $U_{10}^B = 25 \text{ м с}^{-1}$). Отдельные результаты расчетов моделируемых океанографических характеристик для всего Азово-Черноморского бассейна представлены на рис. 3.

Для верификации численных моделей, из ряда наблюдений на гидрометеорологических станциях в портах Одесского района СЗЧМ за 2016-2017 гг. были выбраны отрезки времени со штормовыми ветрами, при которых наблюдались сильные сгонно-нагонные колебания уровня моря, ветровое волнение (как правило, соответствующее сильным нагонам).

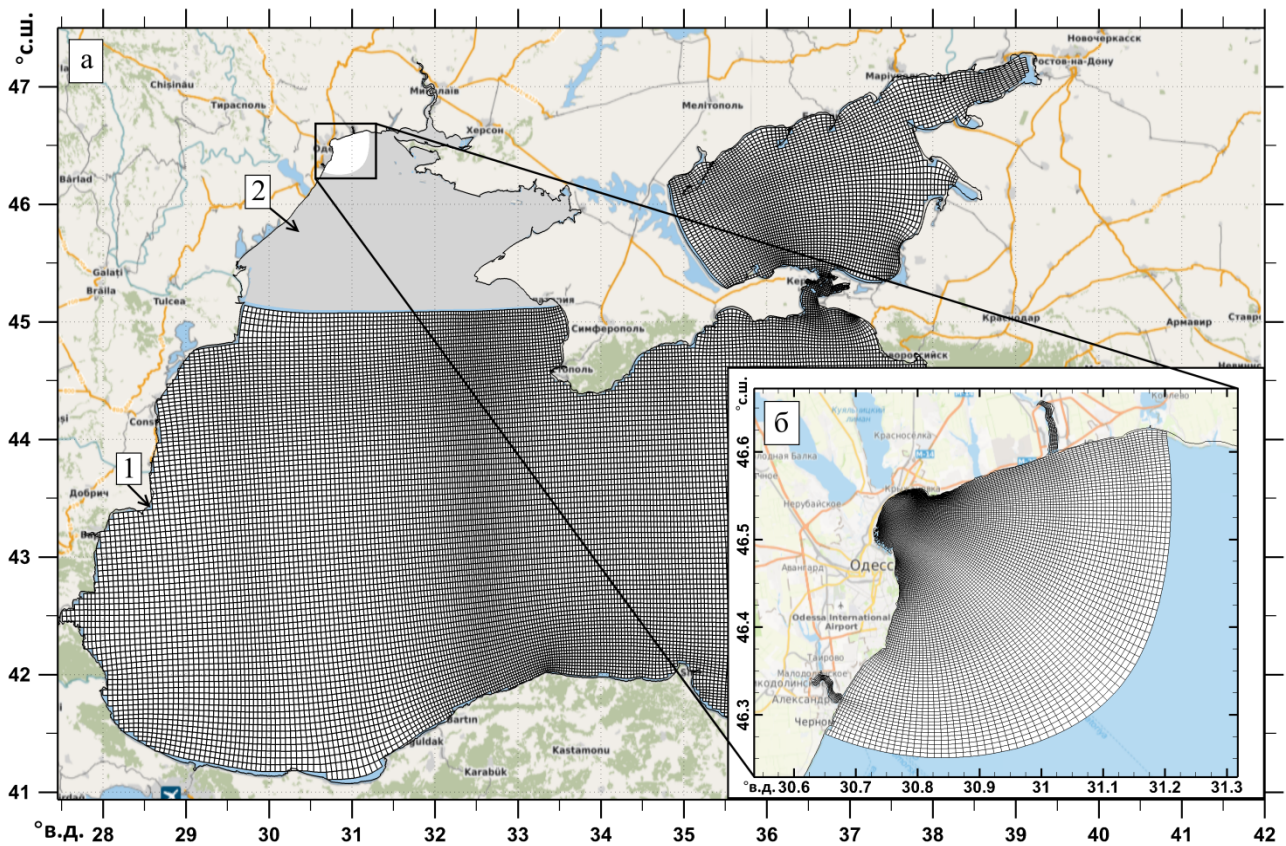


Рис. 2 – Криволинейные расчетные сетки для региона Азово-Черноморского бассейна: а – базовая расчетная сетка ($\Delta_{xy} = 2,5-5$ км) (1) и детализированная расчетная сетка для северо-западной части Черного моря ($\Delta_{xy} = 800$ м-1,5 км) (2); б - сетка для морской акватории портов Одесского района северо-западной части Черного моря

Моделирование проводилось в течение следующих периодов времени: 1) 16.07. – 25.07.2016 г.; 2) 06.10. - 18.10.2016 г.; 3) 27.11. – 09.12.2016 г.; 4) 16.04. – 26.04.2017 г.

В качестве входных данных для вышеуказанных периодов моделирования на верхней (с атмосферой) открытой границе расчетной области задавались (с временной дискретностью 3 часа) переменные в пространстве и времени поля зональной и меридиональной компонент скорости ветра, м с^{-1} , и атмосферного давления, приведенного к среднему уровню моря, Па, на равномерной $0,25^\circ$ -градусной сетке, считанные из архива прогнозов глобальной модели погоды GFS. Эти данные были загружены через веб-сервис NOMADS согласно следующей процедуре считывания. При каждом запуске модели GFS в течение суток (в 00:00, 6:00, 12:00 и 18:00 UTC) генерируются прогностические поля метеорологических величин на период от 0 до 240 ч с 3-х часовой временной дискретностью. Поскольку

на данном этапе работы архив GFS-прогнозов использовался для верификации численных математических моделей Delft3D-FLOW и SWAN, то в каждый из основных сроков запуска модели GFS (4 раза в сутки) считывался прогноз только на ближайшие 6 часов.

При выполнении расчетов с использованием комплекса интегрированных моделей Delft3D-FLOW + SWAN, модель SWAN работала в нестационарном режиме для всех расчетных областей с целью адекватного моделирования параметров ветрового волнения при штормовых ветрах. Временной шаг решения уравнений модели Delft3D-FLOW составлял 30 с, модели SWAN – 600 с, а временной интервал интеграции моделей – 60 мин. Угловая детализация в модели SWAN была равна 10° . Для частотной координаты применялась сетка с 24 узлами в диапазоне частот 0,05-1,0 Гц.

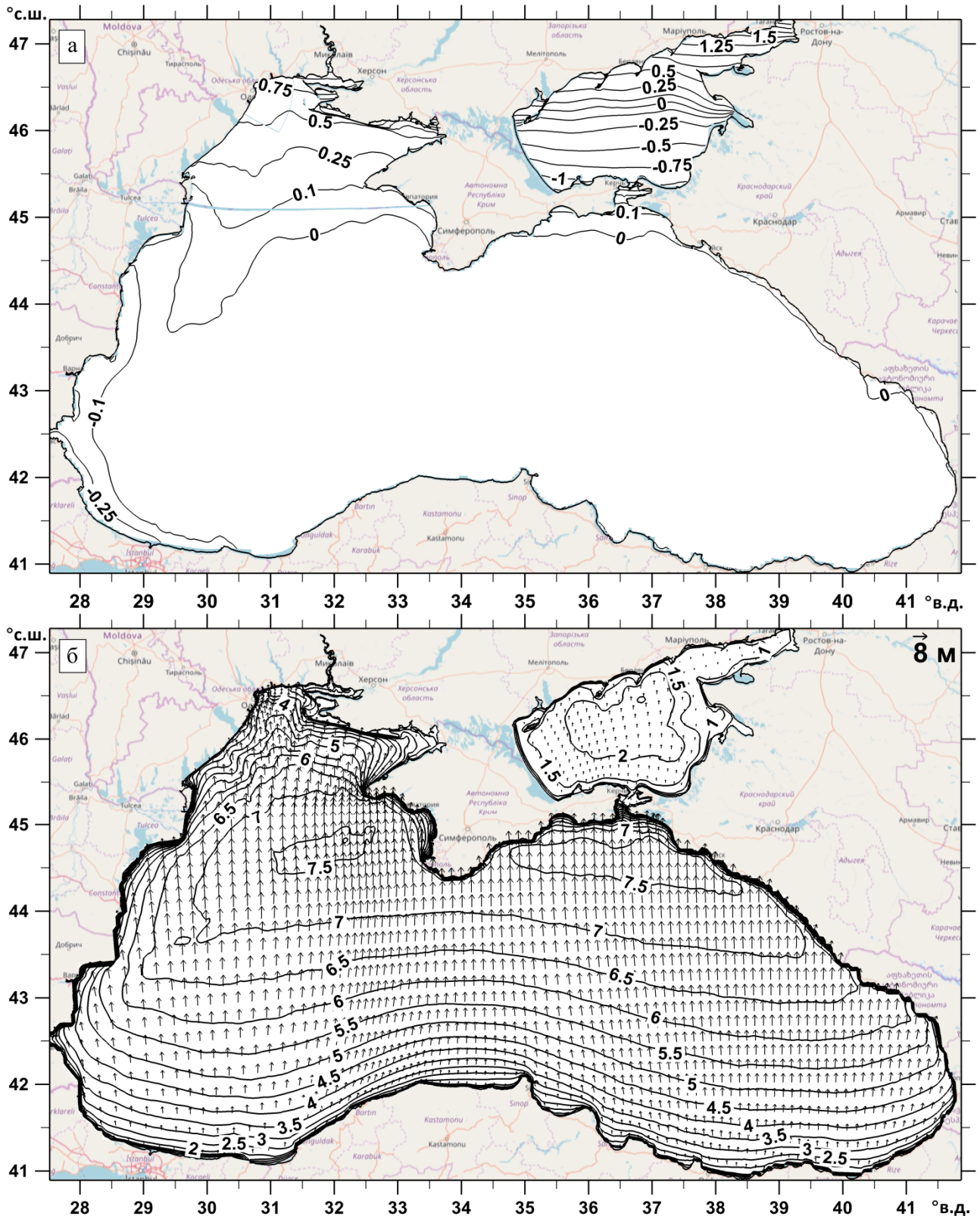


Рис. 3 – Поля отклонений уровня моря от невозмущенного состояния, м, (а), высот значительных волн*, м, и направления их распространения (б)** при стационарном южном ветре скоростью 20 м с^{-1}

* Отклонения уровня моря и высоты значительных волн показаны на рисунке контурами и цифрами

** Векторы направления распространения волн прорезаны с интервалом $0,125^\circ$ для удобства чтения

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Верификация моделей проводилась путем сравнения результатов моделирования с данными наблюдений за изменчивостью уровня моря на морских гидрометеорологических станциях Гидрометцентра Черного и Азовского морей в портах Черноморск, Одесса, Южный и данными регистрации скорости и направления ветра, дрейфовых течений, характеристик ветрового волнения на гидрометеорологическом буе SW Midi-185 (производства Fugro OCEANOR, Норвегия), стационарно установленном в акватории Одесского залива ГУ «Госгидрография» в точке с координатами (46,484° с.ш., 30,785° в.д.) [22].

Поскольку результаты моделирования определяются точностью задания изменчивости ветровых условий над моделируемой акваторией, то первоначально был проведен сравнительный анализ данных по скорости и направлению ветра, считанных из архива прогнозов GFS, с данными автоматизированных наблюдений за ветром (с дискретностью 1 час) на гидрометеорологическом буе в соответствующие периоды времени. Результаты сравнения, приведенные на рис. 4, свидетельствуют о высокой степени совпадения анализируемых данных, особенно по модулю скорости ветра, хотя в отдельных случаях отмечалось смещение по времени моментов резкого изменения направления ветра или отсутствие их по данным наблюдений.

На рис. 5-6 показаны некоторые результаты моделирования вызванных ветром отклонений уровня моря от среднего невозмущенного ветром состояния в портах Одесского района СЗЧМ. Отклонения уровня моря, рассчитанные по модели, сравнивались с их значениями в портах Черноморск, Одесса, Южный, рассчитанными как разница между текущим наблюдаемым значением и средней отметкой уровня моря, определенной за расчетный период.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что модель хорошо воспроизводит временную динамику уровня моря в период штормовых ветров. В некоторых случаях отмечались и систематические погрешности в абсолютных значениях денивеляций уровня моря, объясняющиеся неточностью определения невозмущенной ветром отметки уровня моря, которая условно принималась равной средней за расчетный период отметке. В целом, погрешность при воспроизведении уровня моря в портах Одесского района СЗЧМ не превышает 0,1 м. Время приспособления модели к начальным условиям моделирования составляет несколько суток.

Пример пространственного распределения вызванных ветром денивеляций уровня моря в период сгонных штормовых ветров в декабре 2016 г. приведен на рис. 7. Поскольку порты Черноморск, Одесса, Южный расположены на побережье достаточно недалеко друг от друга, то во всех рассмотренных штормовых ситуациях разница денивеляций уровня между ними не превышала 0,1 м.

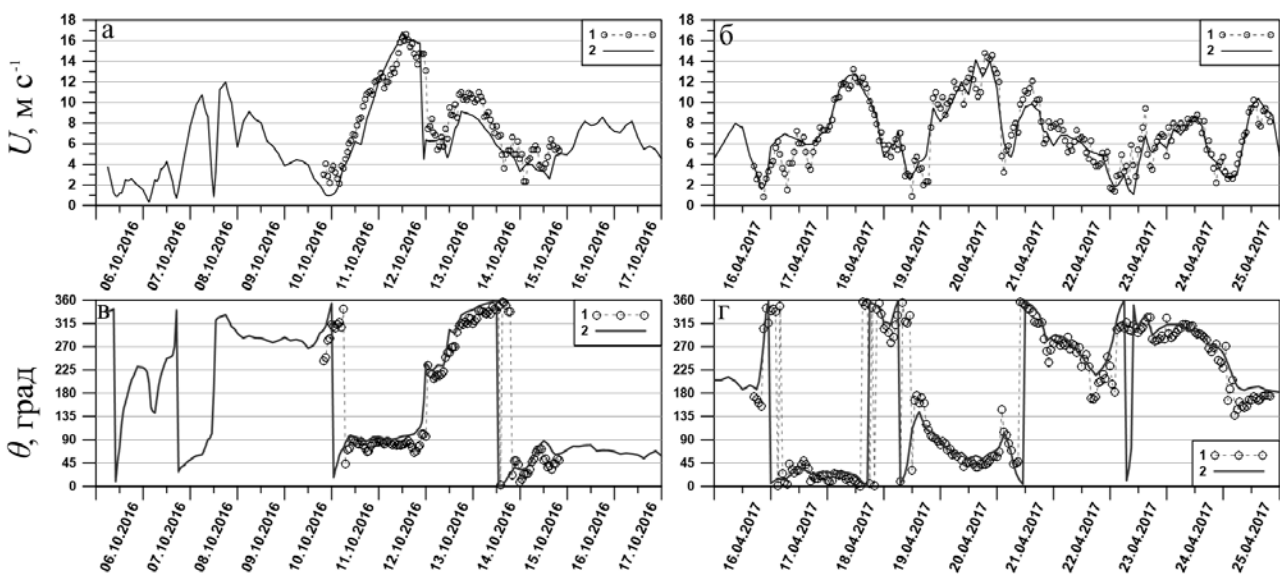


Рис. 4 – Изменчивость модуля (а, б) и направления (в, г) скорости ветра по данным гидрометеорологического буя (1) и модели GFS на сетке 0,25° (2) в расчетные периоды времени

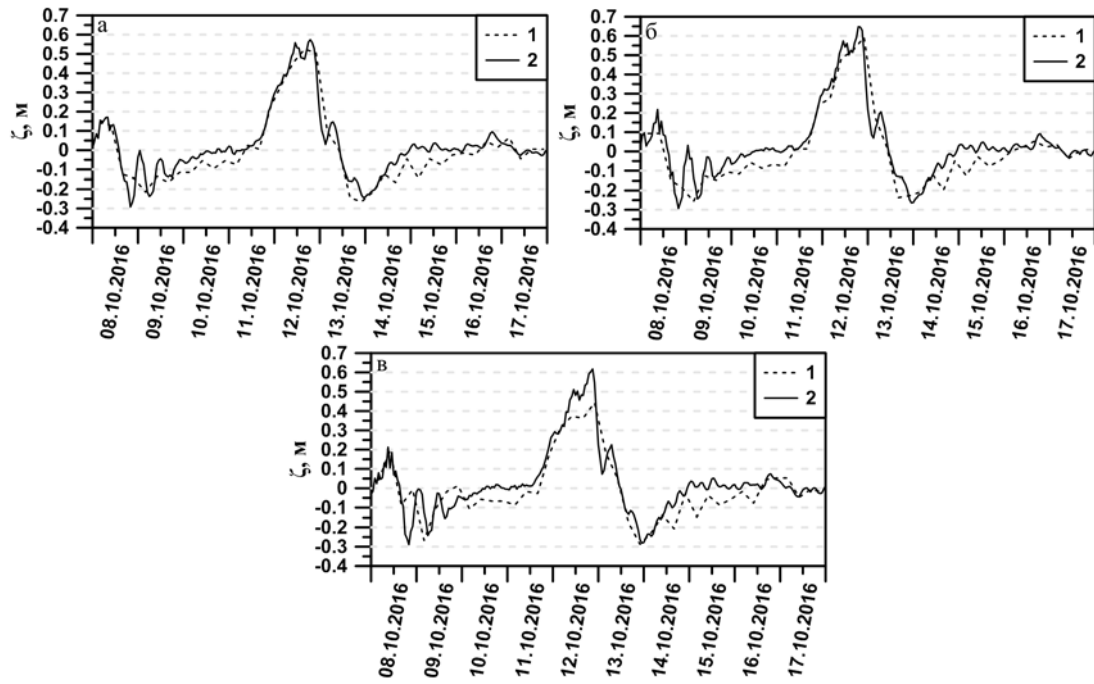


Рис. 5 – Изменчивость вызванных ветром денивелляций уровня моря, м, по данным наблюдений в портах Черноморск (а), Одесса (б), Южный (в) (1) и полученных в результате моделирования (2) в расчетный период 16.07 – 25.07.2016 г.

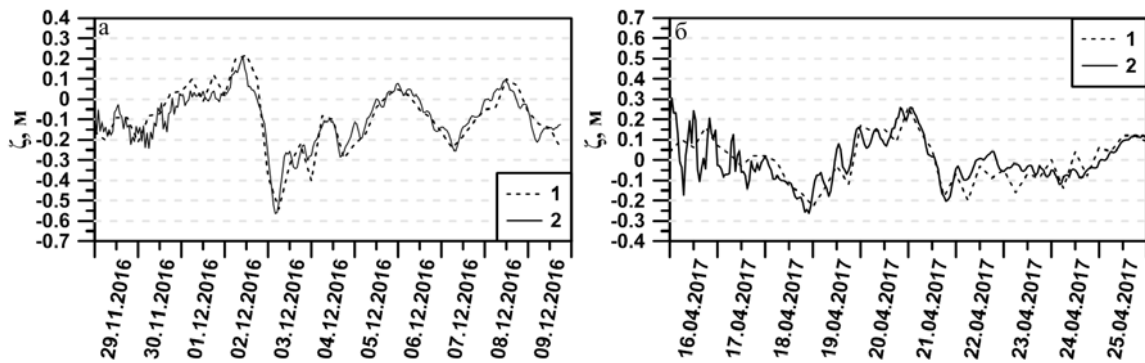


Рис. 6 – Изменчивость вызванных ветром денивелляций уровня моря, м, по данным наблюдений (1) и результатам моделирования (2) в порту Южный (а) в период 27.11. – 09.12.2016 г. и в порту Черноморск 16.04. – 26.04.2017 г. (б)

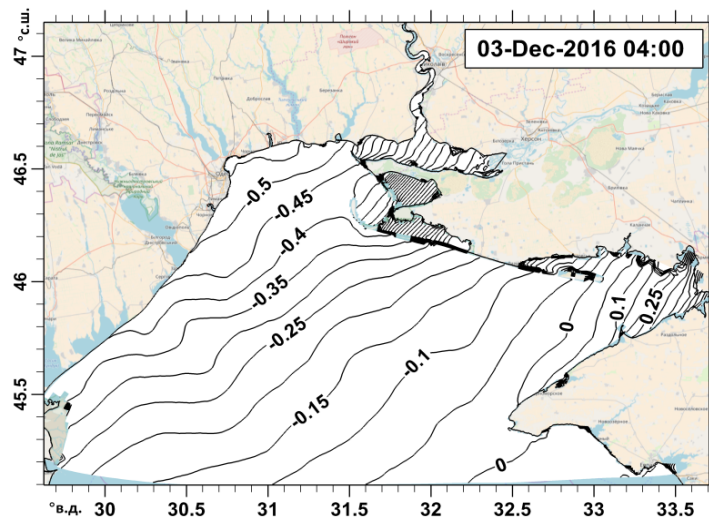


Рис. 7 – Поле денивелляций уровня моря, м, полученное при моделировании для СЗЧМ в момент времени 03.12.2016 г. 4:00

Поскольку гидрометеобуь SWMid-185 оборудован доплеровским измерителем скорости и направления течения (Aquadop, Nortek), то было проведено сравнение дрейфовых течений (по модулю (рис. 8) и значениям составляющих вектора скорости) рассчитанных по модели и измеренных в точке расположения буя. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что степень сходства временной изменчивости измеренных и рассчитанных течений достаточно высока. Некоторые различия, которые отмечались, объясняются тем, что наблюдаемые течения, в отличие от рассчитанных по модели, слагаются как из ветровой, так и плотностной составляющих. В периоды относительно слабого ветра и/или весеннего проникновения трансформированных вод речного стока в расчетную область, вклад плотностных течений в формирование суммарных увеличивается, и, соответственно, увеличиваются расхождения между измеренными и смоделированными течениями.

Отдельные результаты верификации модели SWAN по воспроизведению временной изменчивости высот и направления ветровых волн в точке расположения гидрометеорологического буя при доминировании ветров волноопасных направлений показаны на рис. 9, 10. Рассчитанные по модели значения соответствующих характеристик ветрового волнения сравнивались с данными измерений гидрометеорологического буя в выбранные расчетные периоды. Видно, что результаты моделирования хорошо согласуются с наблюдаемыми значениями. Представление о пространственном распределении высот значительных волн и среднего направления распространения волнения в Одесском районе СЗЧМ, получаемом при моделировании, дает рис. 10. Пространственная изменчивость указанных характеристик ветрового волнения в районах расположения морских портов Черноморск, Одесса, Южный обусловлена, прежде всего, особенностями трансформации и рефракции ветровых волн при вхождении их в зоны малых глубин с открытого моря.

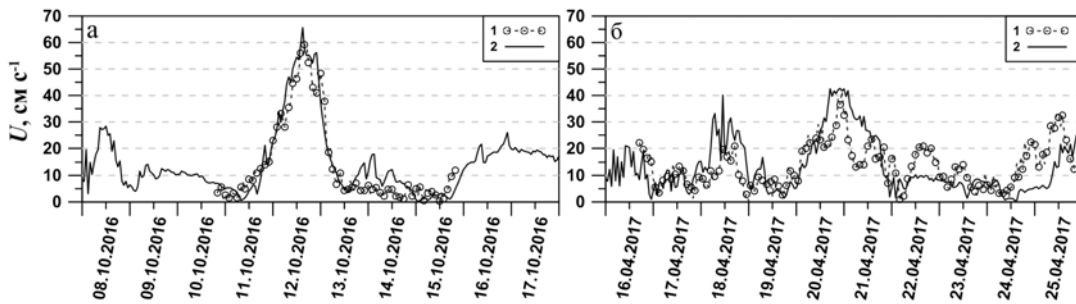


Рис. 8 – Временная изменчивость скорости дрейфового течения, cm s^{-1} , по данным измерений на гидрометеорологическом буе (1) и полученная в результате моделирования (2) в расчетные периоды: а) 06.10–18.10.2016 г.; б) 16.04–26.04.2017 г.

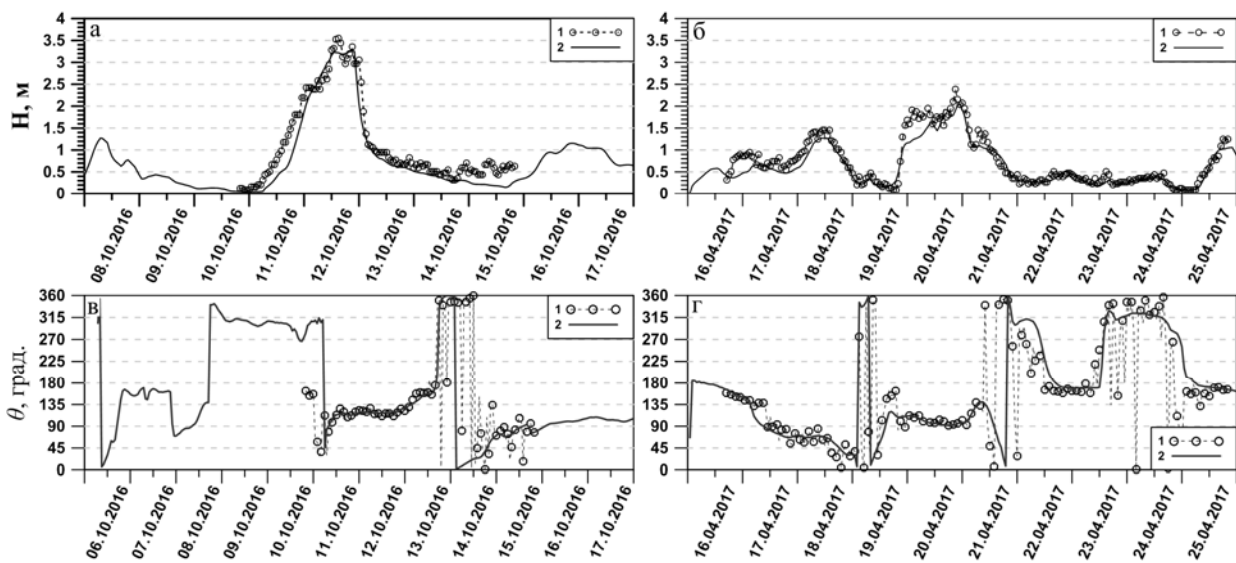


Рис. 9 – Временная изменчивость высот, м, (а, б) и направления, град, (в, г) ветровых волн по данным измерений на гидрометеорологическом буе (1) и полученная в результате моделирования (2) в расчетные периоды 06.10–18.10.2016 г. и 16.04–26.04.2017 г.

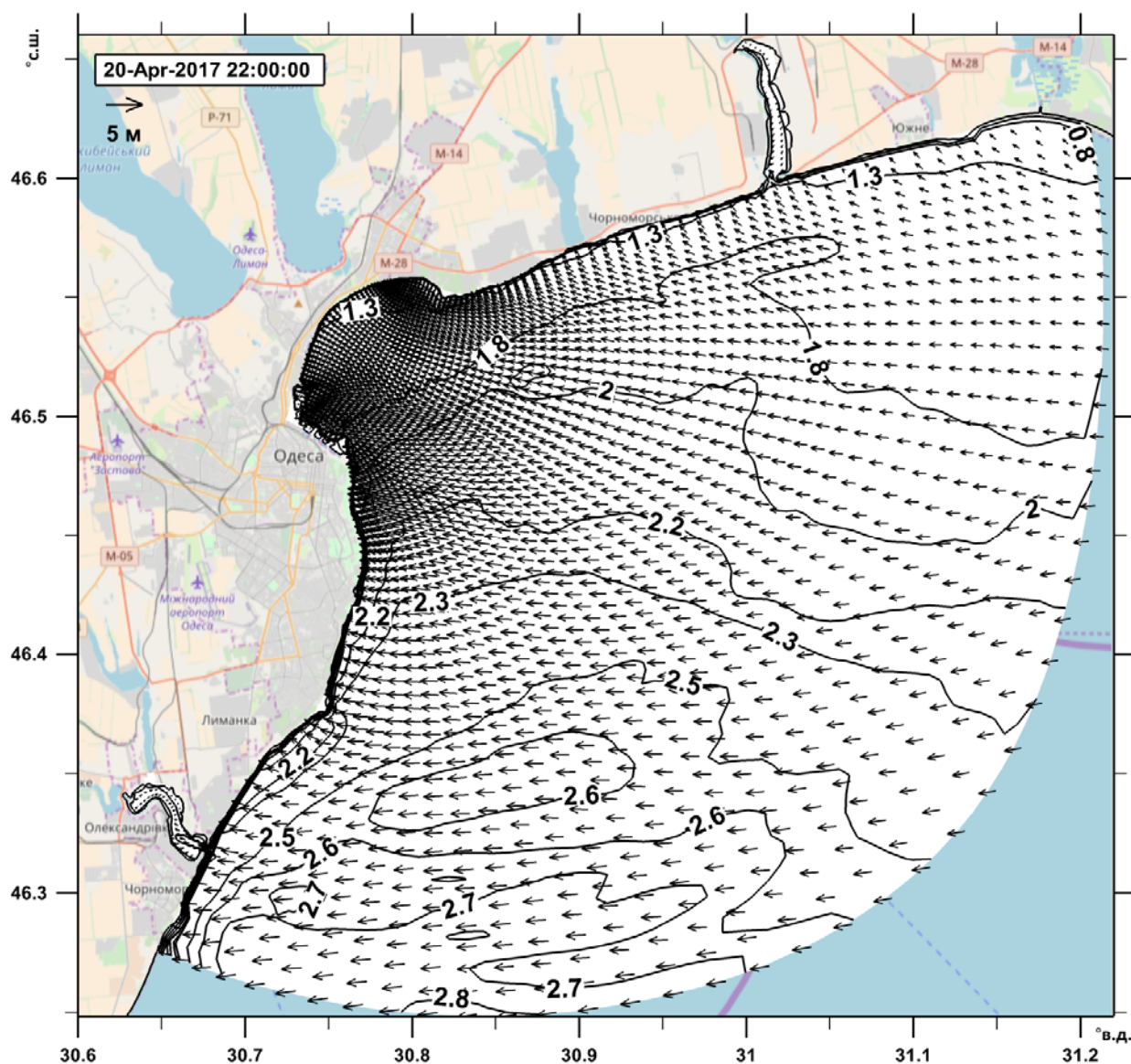


Рис. 10 – Поле высот значительных волн*, м, и среднего направления распространения волн, в акватории Одесского района Черного моря СЗЧМ, полученное при моделировании для момента времени 22:00 20.04.2017 г.

* Высоты значительных волн показаны на рисунке контурами и цифрами

5. ВЫВОДЫ

Полученные при верификации комплекса интегрированных численных математических моделей Delft3D-FLOW + SWAN результаты свидетельствуют о том, что данный комплекс имеет хорошие перспективы использования в системе оперативного прогноза изменчивости океанографических параметров состояния морской среды украинской части акватории Азово-Черноморского бассейна в варианте с усвоением прогностической метеорологической информации, получаемой при помощи глобальной атмосферной модели GFS.

В дальнейшем модельный комплекс будет испытан в прогностическом режиме для оценки

оправданности и точности оперативных (на 5-10 суток) прогнозов вызванных ветром изменений уровня моря, а также характеристик ветрового волнения в северо-западной части Черного моря. Использование гидродинамической модели Delft3D-FLOW как базовой составляющей системы автоматизированных морских прогнозов Украины позволяет в будущем дополнить перечень прогнозируемых океанографических параметров температурой и соленостью морской воды, течениями, переносом различных субстанций от их источников.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Copernicus. European Union's Earth Observation Programme. URL: <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus> (дата обращения: 16.01.2019).
- Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS). URL: <http://marine.copernicus.eu/> (дата обращения: 16.01.2019).
- Kubryakov A. S., Korotaev G. K., Dorofeev V. L. et al. Black Sea coastal forecasting system. *Ocean Sci.* 2012. 8. Pp. 183-196. <https://doi.org/10.5194/os-8-183-2012>.
- Архитектура и результаты работы международного Черноморского центра морских прогнозов, созданного на базе МГИ НАН Украины в рамках проекта Европейского Союза «Мой Океан» / Коротаев Г. К., Демьшев С. Г., Дороев В. Л. и др. *Екологічна безпека прибережних та шельфових зон та комплексне використання ресурсів шельфу*. 2013. Вип. 27. С. 128-133.
- Демьшев С. Г., Коротаев Г. К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке С. *Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане*. Москва: ИВМ РАН, 1992. С. 163-231.
- Исходный код модели Delft3D-FLOW / Deltares. Delft, the Netherlands, 2017. URL: <http://oss.deltares.nl/web/delft3d/source-code> (дата обращения: 15.09.2017).
- Delft3D-FLOW – Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments – User Manual, Hydro-Morphodynamics, version 3.15, SVN revision 60015 / Deltares systems. Delft, the Netherlands, 2019. 708 p. URL: http://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf. (дата обращения: 16.01.2019).
- Исходный код модели SWAN: Simulating Waves Nearshore / Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Environmental Fluid Mechanics Section. 2018. URL: <http://swanmodel.sourceforge.net/> (дата обращения: 15.04.2018).
- SWAN – User Manual, SWAN Cycle III, version 41.20 AB / TU Delft. 2017. URL: <http://swanmodel.sourceforge.net/download/zip/swanuse.pdf> (дата обращения: 15.04.2018).
- Naval Oceanographic Office, общая информация / US NAVY. 2019. URL: http://www.public.navy.mil/fltfor/cnmoc/Pages/navo_home1.aspx (дата обращения: 16.01.2019).
- Veeramony J., Orzech M. D., Edwards K. L. et al. Navy nearshore ocean prediction systems. *Oceanography*. 2014. 27(3). Pp. 80-91.
- Valchev N., Eftimova P., Andreeva N. Implementation and validation of a multi-domain coastal hazard forecasting system in an open bay. *Coastal Engineering*. 2018. 134. Pp. 212–228. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.08.008>
- Bennett V. C. C., Mulligan R. P., Hapke C. J. A numerical model investigation of the impacts of Hurricane Sandy on water level variability in Great South Bay, New York. *Continental Shelf Research*. 2018. 161. Pp. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.04.003>
- Veeramony J., Condon A., van Ormondt M. Forecasting Storm Surge and Inundation: Model Validation. *Weather and Forecasting*. 2017. 32(6). Pp. 2045–2063. <https://doi.org/10.1175/waf-d-17-0015.1>.
- NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. URL: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/#!access> (дата обращения: 15.04.2018).
- The GFS Atmospheric Model. URL: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html> (дата обращения: 15.04.2018).
- NOAA. National Weather Service. Environmental Modeling Center. URL: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/GFS/php> (дата обращения: 16.01.2019).
- Mellor G. L., Blumberg A. F. Modelling vertical and horizontal diffusivities and the sigma coordinate system. *Monthly Weather Review*. 1985. 113. Pp. 1379-1383.
- Hasselmann K., Barnett T. P., Bouws E. et al. Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Disch. Hydrogr. Z. Suppl.* 1973. 12. App. A8.
- Collins J. I. Prediction of shallow water spectra. *J. Geophys. Res.* 1972. 77(15). Pp. 2693-2707.
- Madsen O. S., Poon Y. K., Graber H. C. Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory. *Proc. 21th Int. Conf. Coastal Engineering*, ASCE. 1988. Pp. 492-504.
- Голодов М., Попов Ю., Матвеев А. Результати порівняльних спостережень гідрологічних та метеорологічних характеристик за даними вимірювань гідрометеорологічного буя SWMid-185 та пунктів спостережень Гідрометеорологічного бюро порту Іллічівськ у 2015 році. *Вісник Держгідрографії*. 2016. №1 (50). С. 2-5.

REFERENCES

- Copernicus. European Union's Earth Observation Programme. Available at: <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus> (Accessed: 16 January 2019).
- Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS). Available at: <http://marine.copernicus.eu> (Accessed 16 January 2019).
- Kubryakov A.S., Korotaev G.K., Dorofeev V.L. et al. (2012). Black Sea coastal forecasting system. *Ocean Sci.*, 8, pp. 183-196. <https://doi.org/10.5194/os-8-183-2012>.
- Korotaev, G.K., Demyshev, S.G. & Dorofeev, V.L. (2013). Arkhitektura i rezul'taty raboty mezhdunarodnogo Chernomorskogo tsentra morskikh prognozov, sozdanogo na baze MGI NAN Ukrainy v ramkakh proekta Evropeyskogo Soyuzu «Moy Okean» [The architecture and the results of the work of the International Black Sea Center for Marine Forecasts, created on the basis of the State Hydrophysical Institute of National Academy of Science of Ukraine in the framework of the European Union project “My Ocean”]. *Ekolohichna bezpeka pryberzhnykh ta shelfovykh zon ta kompleksne vykorystannia resursiv shelfu [Ecological safety of coastal and offshore areas and complex use of the shelf resources]*, 27, pp. 128-133. (in Russ.)
- Demyshev, S.G. & Korotaev, G. K. (1992). Chislennaya energosbalansirovannaya model' baroklinnykh techeniy okeana s nerovnym dnom na setke S [Numerical energy balanced model of baroclinic ocean currents with uneven bottom on a C-grid]. In: *Chislennye modeli i rezul'taty kalibrovochnykh raschetov techeniy v Atlanticheskom okeane [Numerical models and results of gauge calculations of currents in the Atlantic Ocean]*. Moscow: IVM RAS, pp. 163-231. (in Russ.)
- Deltares. (2019). *Delft3D-FLOW, source code*. Delft, the Netherlands. Available at: <http://oss.deltares.nl/web/delft3d/source-code> (Accessed: 16 January 2019).
- Deltares. (2019). *Delft3D-FLOW – Simulation of multi-*

- dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments – User Manual, Hydro-Morphodynamics, version 3.15, SVN revision 60015.* Delft, the Netherlands. Available at: http://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf (Accessed: 16 January 2019).
8. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Environmental Fluid Mechanics Section (2019). *SWAN: Simulating WAves Nearshore model.* Available at: <http://swanmodel.sourceforge.net/> (Accessed: 16 January 2019).
 9. TU Delft (2017). *SWAN – User Manual, SWAN Cycle III, version 41.20 AB.* Available at: <http://swanmodel.sourceforge.net/download/zip/swanuse.pdf> (Accessed: 16 January 2019).
 10. US NAVY (2019). *Naval Oceanographic Office.* Available at: http://www.public.navy.mil/fltfor/cnmoc/Pages/navo_home1.aspx (Accessed: 16 January 2019).
 11. Veeramony, J., Orzech, M.D., Edwards, K.L. et al. (2014). Navy nearshore ocean prediction systems. *Oceanography*, 27(3), pp. 80-91.
 12. Valchev, N., Eftimova, P., & Andreeva, N. (2018). Implementation and validation of a multi-domain coastal hazard forecasting system in an open bay. *Coastal Engineering*, 134, pp. 212–228. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.08.008>
 13. Bennett, V.C.C., Mulligan, R.P. & Hapke, C.J. (2018). A numerical model investigation of the impacts of Hurricane Sandy on water level variability in Great South Bay, New York. *Continental Shelf Research*, 161, pp. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.04.003>
 14. Veeramony, J., Condon, A., & van Ormondt, M. (2017). Forecasting Storm Surge and Inundation: Model Validation. *Weather and Forecasting*, 32(6), pp. 2045–2063. <https://doi.org/10.1175/waf-d-17-0015.1>.
 15. NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. Available at: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/#!access> (Accessed: 15 April 2018).
 16. The GFS Atmospheric Model. Available at: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html> (Accessed: 15 April 2018).
 17. NOAA/National Weather Service. (2019). *National Centers for Environmental Prediction. Environmental Modeling Center.* Available at: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/GFS/.php> (Accessed: 16 January 2019).
 18. Mellor, G.L. & Blumberg, A.F. (1985). Modelling vertical and horizontal diffusivities and the sigma coordinate system, *Monthly Weather Review*, 113, pp. 1379-1383.
 19. Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E. et al. (1973). Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl.*, 12, A8.
 20. Collins, J.I. Prediction of shallow water spectra. (1972). *J. Geophys. Res.*, 77(15), pp. 2693-2707.
 21. Madsen, O.S., Poon, Y.-K. & Graber, H.C. (1988). Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory. *Proc. 21th Int. Conf. Coastal Engineering*, ASCE, pp. 492-504.
 22. Golodov, M., Popov, Yu. & Matveev, A. (2016). Rezultaty porivnialnykh sposterezhen hidrohichnykh ta meteorohichnykh kharakterystyk za danymy vymiriuvan hidrometeorohichnoho buia SWMidi-185 ta punktiv sposterezhen Hidrometeorohichnoho biuro portu Illichivsk u 2015 rotsi [Results of comparative observations of hydrological and meteorological characteristics according to measurements of the hydro-meteorological buoy SWMidi-185 and observation points of the Hydrometeorological Bureau of the Port of Illichivsk in 2015.] *Visnyk Derzhhidrografii [Bulletin of State Hydrographic Service of Ukraine]*, 1 (50), pp. 2-5. (in Ukr.)

RESULTS OF ADAPTATION AND VERIFICATION OF THE COUPLED NUMERICAL MODELS SET FOR PREDICTING THE VARIATION OF OCEANOGRAPHIC FEATURES IN THE NORTH-WESTERN PART OF THE BLACK SEA

D. V. Kushnir¹, Yu. S. Tuchkovenko¹, Yu. I. Popov²

¹ Odessa State Environmental University, 15, Lvivska St., 65016, Odesa, Ukraine, dkush@ukr.net

² Odessa branch of the State Hydrographic Service of Ukraine, Mayachny Lane, 5, 65038, Odesa, Ukraine, office@hydro.od.ua

In 2014 Ukraine lost the Ukrainian National Automated System of Marine Forecasting for the Black Sea that was created and operated at the premises of Marine Hydrophysical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine located in the Crimea.

Within the framework of research works aimed at establishing a new marine forecasting system a possibility of employing the internationally acclaimed set of coupled numerical models Delft3D-FLOW + SWAN (the Simulating WAves Nearshore) for operational forecasting of the short-term (5 to 10 days) spatio-temporal variability of oceanographic features in the Ukrainian part of the Sea of Azov and the Black Sea Basin is considered. To ensure operation of the models set in the forecasting mode it was suggested to use a prediction of variability of meteorological characteristics at the air-sea interface obtained with the help of the numerical weather forecast model GFS (Global Forecast System).

This paper presents the results of verification of Delft3D-FLOW and SWAN numerical models which were adapted to the conditions of the North-Western part of the Black Sea and its Odesa area in the version of meteorological data (fields of wind speed and direction, atmospheric pressure) assimilation from the GFS forecast archive. A technique of telescoping the spatial curvilinear computational grids with different resolution capacity was used in the process of

models set adaptation to the conditions of the prognostic area. The models were verified by comparing modelling results with observational data on sea level variability in the ports of Odesa area of the North-Western part of the Black Sea (Chornomorsk, Odesa, Yuzhnyi), as well as with data on wind speed and direction, drift currents and characteristics of wind-induced waves recorded over the studied periods by the gauges of stationary hydrometeorological buoy which was mounted in the Bay of Odesa.

Based on the analysis of the results of verification of coupled numerical models Delft3D-FLOW + SWAN set it was concluded that the set of coupled models has good prospects of being used in the system of operational forecasting of the variability of oceanographic parameters of the sea environment in the Ukrainian part of the Sea of Azov and the Black Sea Basin in the version of assimilation of meteorological information obtained from the GFS global forecast model.

Keywords: the Black Sea, North-Western part, oceanographic features, numerical modelling, models verification, forecast.

РЕЗУЛЬТАТИ АДАПТАЦІЇ ТА ВЕРИФІКАЦІЇ КОМПЛЕКСУ ІНТЕГРОВАНИХ ЧИСЕЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ МІНЛИВОСТІ ОКЕАНОГРАФІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ПІВНІЧНО-СХІДНІЙ ЧАСТИНІ ЧОРНОГО МОРЯ

Д. В. Кушнір¹, Ю. С. Тучковенко¹, Ю. І. Попов²

¹ Одеський державний екологічний університет, вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна, dkush@ukr.net

² Філія Одеського району Держгідрографії, пров. Маячний, 5, 65038, Одеса, Україна, office@hydro.od.ua

У 2014 році Україна втратила національну автоматизовану систему морського прогнозування для Чорного моря, яка була створена та функціонувала на базі Морського гідрофізичного інституту Національної академії наук України, розташованого в Криму.

В рамках науково-дослідних робіт зі створення нової системи морського прогнозування розглядається можливість використання відомого комплексу інтегрованих моделей Delft3D-FLOW + SWAN (Simulating WAVes Nearshore) для оперативного прогнозування короткострокової (5-10 діб) просторово-часової мінливості океанографічних характеристик акваторії української частини Азово-Чорноморського басейну. Для забезпечення роботи модельного комплексу у прогностичному режимі передбачається використовувати прогноз мінливості метеорологічних характеристик на межі розділу «море-атмосфера», отриманий за допомогою глобальної чисельної моделі прогнозу погоди GFS (Global Forecast System).

У статті представлені результати верифікації моделей Delft3D-FLOW і SWAN, адаптованих до використання в умовах північно-західної частини Чорного моря та її Одеського району, у варіанті із засвоєнням метеорологічних даних (полів швидкості та напрямку вітру, атмосферного тиску) з архіву прогнозів GFS. При адаптації модельного комплексу до умов прогностичної області використовувався метод телескопізації просторових криволінійних розрахункових сіток з різною розподільною здатністю. Верифікація моделей проводилась шляхом порівняння результатів моделювання з даними спостережень за мінливістю рівня моря в портах Одеського району північно-західної частині Чорного моря (Чорноморськ, Одеса, Южний), а також з даними щодо швидкості і напрямку вітру, дрейфових течій, характеристик вітрового хвилювання, які були зареєстровані датчиками гідрометеорологічного буя, стаціонарно встановленого в Одеській затоці, в періоди, які розглядались.

На основі аналізу результатів верифікації комплексу інтегрованих чисельних математичних моделей Delft3D-FLOW + SWAN зроблено висновок про те, що даний комплекс має хороші перспективи використання в системі оперативного прогнозу мінливості океанографічних параметрів стану морського середовища української частини акваторії Азово-Чорноморського басейну в варіанті з асиміляцією прогностичної метеорологічної інформації, одержуваної за допомогою глобальної моделі прогнозу погоди GFS.

Ключові слова: Чорне море, північно-західна частина, океанографічні характеристики, чисельне моделювання, верифікація моделей, прогноз.

Подання до редакції : 07. 03. 2019

Надходження остаточної версії : 04. 04. 2019

Публікація статті : 30. 05. 2019