

УДК 534.2, 681.883

Створення системи моделювання гідрофізичних полів водного середовища Чорного моря для його комплексного моніторингу

О.І. Шундель, С.Г. Федосєєнков, К.О. Сперанська

Шундель Олексій Іванович – к.фіз.-мат.н., старший науковий співробітник відділу панорамних акустичних систем Державної установи "Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України"; E-mail: lixyta666@gmail.com

Федосєєнков Сергій Геннадійович – к.геол.н., завідувач відділу панорамних акустичних систем Державної установи "Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України"; E-mail: 22lex22s@ukr.net

Сперанська Катерина Олександрівна – інженер I категорії відділу панорамних акустичних систем Державної установи "Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України"; E-mail: kcx342@gmail.com

Анотація. У статті розглянуто питання створення та забезпечення функціонування в Україні технологій, пов'язаних з відносно новим розділом фізичної океанології, а саме: отримання діагностичних і прогностичних оцінок стану Чорного моря для його комплексного моніторингу. Створення регіональної оперативної системи прогнозу стану північно-західної частини Чорного моря є вагомим досягненням в галузі океанографії. Через велике антропогенне навантаження, яке зазнають прибережні і шельфові зони морів, необхідно контролювати процеси поширення та трансформації забруднюючих речовин. Розробка та створення системи комплексного моніторингу стану водного середовища Чорного моря й окремих його частин, зокрема модулів математичного моделювання разом з подальшим прогнозуванням сприятиме запобіганню та своєчасному реагуванню на негативні наслідки для морського середовища, які зумовлені природними та техногенними чинниками.

Ключові слова: експериментальний зразок гідрофізичного програмно-технологічного комплексу, моделювання та прогнозування гідрофізичних параметрів, математичні моделі прогнозу, океанографічні методи дослідження, просторово-часові океанографічні дані.

Вступ. В умовах війни на території України проблема дослідження динаміки гідрофізичних показників в акваторії Чорного моря, а особливо її північно-західної частини, набуває особливої актуальності і постає як одна із складових національної безпеки та оборони.

Задача оперативного отримання прогнозу гідрофізичної обстановки в Чорному морі є найважливішою, а її вирішення забезпечується в рамках функціонування створеного в Державній установі "Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України" експериментального зразку гідрофізичного програмно-технологічного комплексу. Цей комплекс являє собою сукупність океанографічних методів досліджень, технічних засобів і обладнання, програмного забезпечення, які призначаються для використання в інтересах реалізації наукової складової військово-морської діяльності з метою досягнення бажаного результату.

До того ж діагностичні і прогностичні оцінки стану Чорного моря в оперативному режимі необхідні для функціонування практично всіх галузей морської діяльності (морські перевезення, рибальський промисел, розвідка та видобуток вуглеводнів на шельфі, експлуатація гідротехнічних споруд, комплексів аквакультури та рекреації тощо). При цьому

користувачі зацікавлені, по-перше, параметрами стану приводного шару атмосфери (атмосферний тиск, швидкість вітру, температура і вологість повітря) та характеристиками поверхні моря (температура та солоність води, елементи вітрового хвилювання, варіації середнього рівня моря тощо). По-друге, у багатьох випадках необхідна інформація про тривимірні поля основних гідрофізичних характеристик не тільки на поверхні, але й у товщі Чорного моря [2].

Метою роботи є створення та забезпечення функціонування новітньої вітчизняної системи комплексного моніторингу стану водного середовища Чорного моря шляхом розроблення та впровадження спеціалізованих модулів математичного моделювання і подальшого прогнозування, що будуть забезпечувати регулярний випуск оперативної інформації на основі: системи засвоєння океанографічних даних, технології прогнозування океанографічних параметрів у визначених акваторіях Чорного моря з деталізацією прогнозів у прибережній зоні на терміни до 3–10 діб.

Матеріали і методи. Для задач моделювання та прогнозування гідрофізичних показників пропонується використання спеціалізованого програмного забезпечення. Було обрано програмний пакет *Delft 3D Mesh Suite* виробництва *Deltares* (Нідерланди) [4]. *Delft3D* – це провідний у світі пакет 3D-моделювання для дослідження гідродинаміки, транспортування наносів, морфології та якості води для річкових, естуарних і прибережних середовищ. Станом на сьогодні модулі *Delft3D flow (FLOW)*, морфології (*MOR*) і хвиль (*WAVE*) доступні у форматі *open source* [4].

Модель *Delft3D* може бути застосована у таких областях:

- приливні та вітрові потоки, щільнісні градієнти та хвильові індуковані потоки;
- поширення спрямованих коротких хвиль над нерівною поверхнею дна, включаючи взаємодію хвильових течій;
- адвекція та дисперсія стоків рік;
- морфодинамічні обчислення;
- перенос домішок, наносів та осаду;
- дослідження якості води, включаючи екологічне моделювання, прогнозування концентрації важких металів, взаємодія з органічними та неорганічними зваженими наносами, взаємодія між водою та дном (наприклад, споживання кисню), цвітіння водоростей;
- відстеження частинок, включаючи розлив нафти тощо;
- початкові та/або динамічні (тимчасові) двовимірні морфологічні зміни, включаючи вплив хвиль на перемішування осаду та донних наносів [4].

Результати розрахунку можна візуалізувати та конвертувати у один із зручних графічних форматів (наприклад, *PNG* або *GeoTIFF*) у модулі *QUICKPLOT*, що розроблений у програмному середовищі *MATLAB* [4].

Наприкінці 2022 року було завершено останній етап науково-дослідних робіт щодо створення експериментального зразка гідрофізичного програмно-технологічного комплексу як складової системи оброблення та зберігання інформаційних ресурсів в інтересах забезпечення військово-морської діяльності [1].

Однією зі складових комплексу є берегова інтелектуальна інформаційна система висвітлення гідрографічної обстановки в досліджуваних акваторіях Чорного моря, де здійснюється збір, оброблення та зберігання океанографічних даних, отриманих з розрізаних баз океанографічних даних програми "Міжнародний обмін океанографічними даними та інформацією" Міжурядової океанографічної комісії ЮНЕСКО та інших інтернет-ресурсів, а також надання зазначених даних зацікавленим користувачам у стандартизованих форматах. Розширення технічних можливостей гідрофізичного програмно-технологічного комплексу здійснено шляхом дооснащення модулем математичного моделювання просторово-часової мінливості гідрологічних параметрів морського середовища північно-західної частини Чорного моря (рис. 1), який розроблений на основі програмного забезпечення *Delft3D Flexible Mesh Suite*.

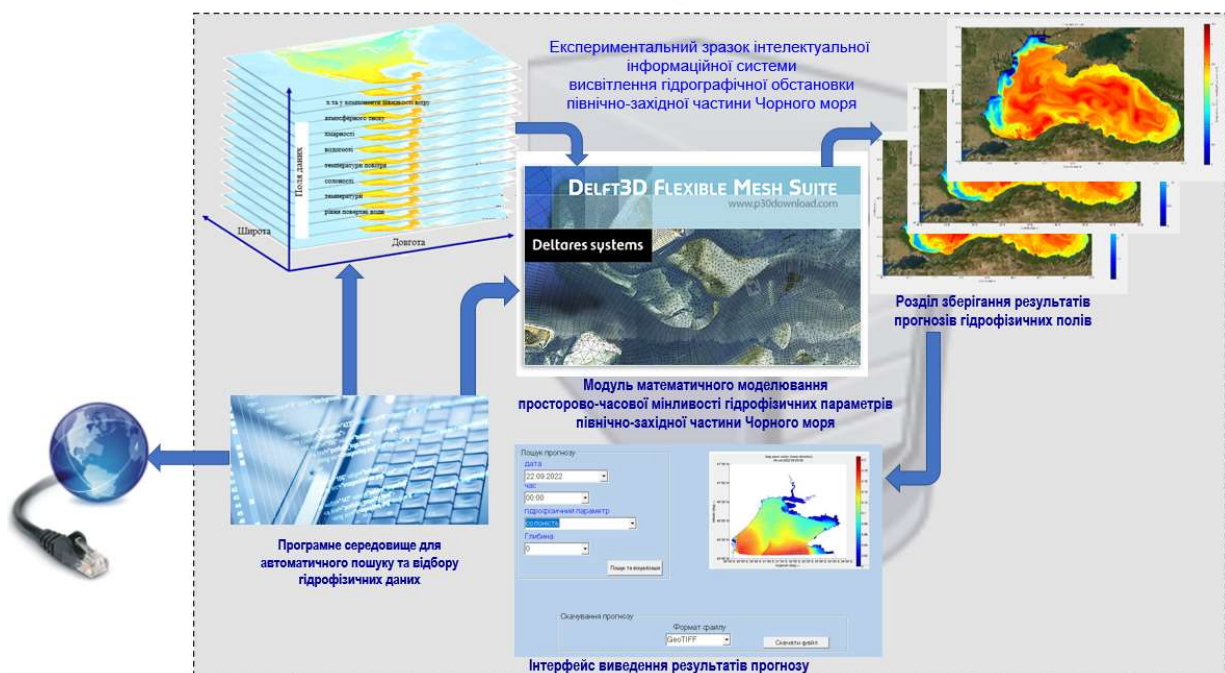


Рис. 1. Структурна схема модуля математичного моделювання просторово-часової мінливості гідрологічних параметрів морського середовища північно-західної частини Чорного моря

Результати. Перший етап створення системи комплексного моніторингу стану водного середовища Чорного моря був присвячений виконанню гідродинамічних розрахунків шляхом реалізації моделі *D-Flow Flexible Mesh (D-Flow FM)* – програми гідродинамічного моделювання, яка розроблена в *Deltares*. Вона є частиною унікального, повністю інтегрованого комп'ютерного програмного забезпечення *Deltares* для реалізації міждисциплінарного підходу і *1D*-, *2D*- та *3D*-обчислень для прибережних, річкових й естуарних районів, і називається *Delft3D Flexible Mesh Suite* або *D-HYDRO Suite*. Завдяки чому комплекс може проводити моделювання гідродинамічного потоку, хвиль, якості води та екологічних параметрів.

Delft3D Flexible Mesh Suite складається з декількох модулів, згрупованих навколо загального інтерфейсу, і здатних взаємодіяти один з одним. *D-Flow FM* є одним із таких модулів, який становить багатовимірну (*1D*-, *2D*- і *3D*-) програму гідродинамічного (і транспортного) моделювання, обчислює явища потоку і перенесення, що не встановилися та які виникають у результаті припливного та метеорологічного впливу на структурованих і неструктурованих граничних сітках. У *3D*-моделюванні вертикальна сітка використовує підхід σ -координат. В якості альтернативи також можливий підхід із фіксованими *z*-шарами (в розробці). *2D*-функціональність у *D-Flow FM* реалізована повністю, в той час як функціональність для *3D* та *1D* знаходиться у розробці.

Було побудовано прогнози океанографічних даних на основі метеорологічного прогнозу на 10 діб з часовою дискретністю 6 годин за глобальною чисельною моделлю прогнозу погоди *GFS (Global Forecast System)*, вебсервіс *NOMADS (National Operational Model Archive and Distribution System)*, США [6]).

Використовуючи програму *wgrib2* [5] метеорологічні дані конвертовано у формат *netcdf*. Далі розроблено функцію у середовищі *Matlab*, яка зчитувала дані у форматі *netcdf* й окремо записувала у необхідному форматі просторово-часові дані зональних і меридіональних компонент швидкості вітру, температури повітря, вологості, атмосферного тиску та хмарності. При створенні системи комплексного моніторингу стану водного середовища Чорного моря попередні розрахунки виконано на неструктурованій сітці з просторовим розрізненням $\Delta_{xy} = 2,5\text{--}3$ км для Чорноморського басейну.

Було проведено експеримент щодо функціонування оперативної системи аналізу та прогнозу стану Чорного моря в режимі часу, близькому до реального, з метою тестування функціоналів першого етапу створення системи комплексного моніторингу стану водного середовища Чорного моря.

Складовою частиною цього експерименту був розрахунок прогнозу основних гідрофізичних полів (циркуляції, температури, солоності та параметрів вітру) на 10 діб (з високим розрізненням у північно-західній частині Чорного моря) за допомогою *Delft3D Flexible Mesh Suite*.

У статті О.А. Щипцова "Експериментальний зразок гідрофізичного програмно-технологічного комплексу" цього номеру наведено результати прогнозів поверхневої циркуляції акваторії Чорного моря на 4 доби, розраховані за моделлю *Delft3D Flexible Mesh Suite* (див. рис. 4 на стор. 12), результати прогнозування поля солоності, розраховані за моделлю *Delft3D Flexible Mesh Suite* (див. рис. 5 на стор. 13) та результати прогнозування параметрів вітру (див. рис. 6 на стор. 13). Вищенаведені розрахунки прогнозів показали, що північно-західна частина Чорного моря, яка включає Одеську затоку, є динамічно активною зоною. Тут розвиваються циркуляційні процеси, що характеризуються різко вираженою сезонною мінливістю.

Програмне забезпечення *Delft3D Flexible Mesh Suite* дозволяє встановити в розрахунковій області точку спостереження та записувати в ній необхідні гідрофізичні

параметри водного середовища для оцінки достовірності результатів прогнозу. В середовищі програмування *Matlab* була написана програма, яка порівнює в даній точці розрахований гідрофізичний параметр (температуру) з даними бази знань проекту *Copernicus* [3], а саме даними з моделі *GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024* (рис. 2).

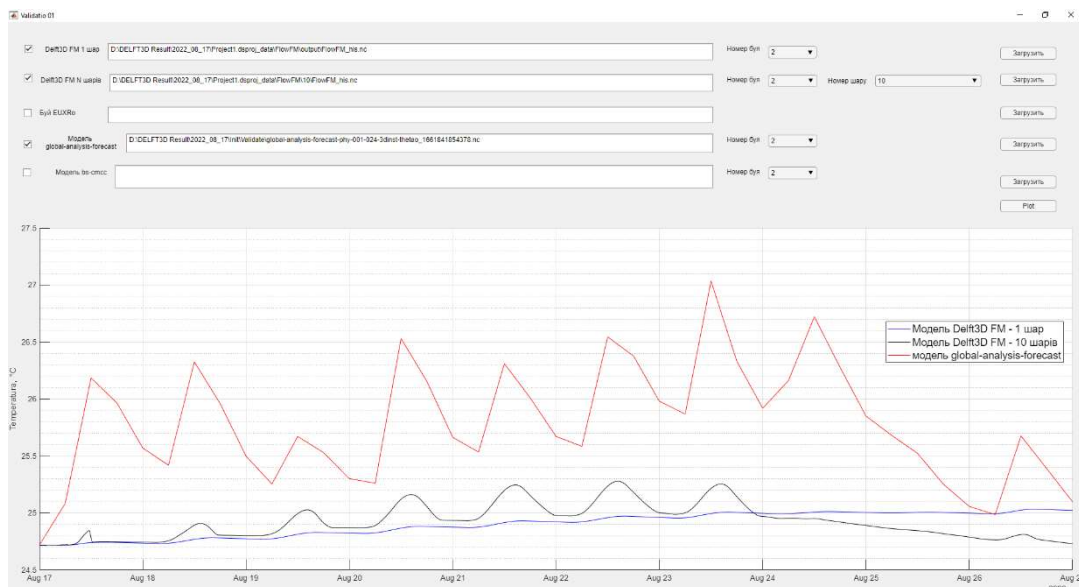


Рис. 2. Порівняння графіків мінливості температури води в заданій точці Чорного моря впродовж часу (червона крива – розрахований прогноз при використанні одношарової моделі, зелена крива – розрахований прогноз при використанні 10-шарової моделі, синя крива – дані моделі *GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024*)

Зіставлення результатів розрахованих прогнозів мінливості температури води в заданій точці Чорного моря впродовж часу (при використанні 10-шарової моделі) з даними моделі *GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024* показало здатність моделі достовірно передбачати гідрофізичні поля Чорного моря.

Порівняння розрахованих температур поверхні моря з супутниковими зображеннями поверхневої температури, отриманими з супутників, показало хороший якісний збіг прогностичних і реальних температурних полів.

На наступному етапі розробки системи комплексного моніторингу стану морського середовища Чорного моря слід врахувати, що підвищення роздільної здатності моделі в районах сприятиме кращій ідентифікації прибережних малих вихорів.

Висновки. Створення системи комплексного моніторингу стану водного середовища Чорного моря з використанням супутникових даних із подальшим його прогнозом на базі сучасних об'єднаних моделей *Delft3D* циркуляції моря й атмосфери з контролем та засвоєнням океанографічних даних, отриманих в експедиційних дослідженнях і натурних вимірюваннях є відображенням сучасних потреб суспільства. Вона забезпечить інформацією для вжиття превентивних заходів і своєчасного реагування на негативні наслідки для морського середовища, які зумовлені природними та техногенними чинниками. Створена система буде

вирішувати завдання забезпечення національної безпеки, підвищення якості життя людей, сталого розвитку нових наукоємних галузей економіки.

Подальше удосконалення функціоналів модулів математичного моделювання та прогнозування системи комплексного моніторингу стану водного середовища Чорного моря має стати базою для розвитку комплексної системи моделювання. Така система дозволить передбачати не лише динамічні процеси моря, а й різні процеси, пов'язані, наприклад, з поширенням нафтопродуктів та інших забруднюючих речовин у морському басейні, та може застосовуватися для вирішення рятувально-пошукових задач тощо.

Перелік використаних джерел

1. Створення експериментального зразка гідрофізичного програмно-технологічного комплексу як складової системи оброблення та збереження інформаційних ресурсів в інтересах забезпечення військово-морської діяльності Військово-Морських Сил Збройних Сил України : звіт про НДР (заключний) / ДУ "Гідрофізичний центр НАН України"; кер. О.А. Щипцов. Київ, 2022. 517 с. № ДР 0121U110836.
2. Шундель, О.І., Федосєєнков С.Г. Створення системи комплексного моніторингу стану водного середовища Чорного моря шляхом його математичного моделювання. *Екологічна безпека та природокористування*. 2022. Т. 41, №1. С. 111–120. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.1.111-120>
3. Black Sea Physics Analysis and Forecast. E.U. Copernicus Marine Service Information: веб-сайт. URL: https://resources.marine.copernicus.eu/productdetail/BLKSEA_ANALYSISFORECAST_PHY_007_001/ (дата звернення: 05.11.2022).
4. Delft3D Open Source Community Deltares: веб-сайт. URL: <https://oss.deltares.nl/web/delft3d/home> (дата звернення: 26.09.2022).
5. NCEP Global Ocean Data Assimilation System (GODAS) : веб-сайт. URL: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/wgrib2/index.html> (дата звернення: 05.11.2022).
6. OpenGribs' Mission Statement: веб-сайт. URL: <https://opengribs.org/en> (дата звернення: 05.11.2022).

Creation of the Black Sea water environment hydrophysical fields modeling system for its comprehensive monitoring

O.I. Shundel, S.H. Fedoseienkov, K.O. Speranska

Shundel, Oleksiy Ivanovych – PhD (Phys. & Math.), Senior Research the Department of panoramic acoustic systems, State Institution "Scientific Hydrophysical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine"; E-mail: lixyta666@gmail.com

Fedoseienkov, Serhiy Hennadiyovych – PhD (Geol.), Head of the Department of panoramic acoustic systems, State Institution "Scientific Hydrophysical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine"; E-mail: 22lex22s@ukr.net

Speranska, Katerina Oleksandrivna – Engineer of I category, the Department of panoramic acoustic systems, State Institution "Scientific Hydrophysical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine"; E-mail: kcx342@gmail.com

Abstract. The development of a regional operational system for forecasting the condition of the northwestern part of the Black Sea is a significant achievement in the field of oceanography. Due to the heavy anthropogenic load experienced by the coastal and shelf areas of the sea, it is necessary to monitor the distribution and transformation of pollutants. The creation of a comprehensive monitoring system to assess the state of the Black Sea water environment, including the use of mathematical modeling modules and forecasting, will help prevent and respond promptly to negative consequences for the marine environment caused by natural and human-made factors.

Keywords: experimental sample of a hydrophysical software-technological complex, modeling, and forecasting of hydrophysical parameters, mathematical forecast models, oceanographic research methods, spatiotemporal oceanographic data.

References

1. Shchuptsov OA, kerivnyk. Stvorennia eksperymentalnoho zrazka intelektualnoi informatsiinoi systemy vysvitlennia hidrografichnoi obstanovky v akvatoriiakh Chornoho moria z vykorystanniam okeanografichnykh danykh v interesakh navihatsiino-hidrografichnoho zabezpechennia Zbroinykh Syl Ukrainy [Creation of an experimental model of an intelligent information system for highlighting the hydrographic situation in the Black Sea water areas using oceanographic data in the interests of navigation and hydrographic support of the Armed Forces of Ukraine]: zvit pro NDR (zakliuchnyi). Kyiv: DU "Hidrofizychnyi tsentr NAN Ukrainy"; 2020. 672 p. № DR 0121U112453 [in Ukrainian].

2. Shundel OI, Fedoseienkov SH. Stvorennia systemy kompleksnoho monitorynhu stanu vodnoho seredovyshecha Chornoho moria shliakhom yoho matematychnoho modeliuvannia. Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia [The creation of a system for integrated monitoring of the water medium of the Black Sea as a path for mathematical modeling. Environmental safety and natural resources]; 2022;41(1):111–120. Available from: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.1.111-120> [in Ukrainian].

3. Black Sea Physics Analysis and Forecast. [Internet]. E.U. Copernicus Marine Service Information [cited 2022 Nov 05]. Available from: https://resources.marine.copernicus.eu/productsdetail/BLKSEA_ANALYSISFORECAST_PHY_007_001/

4. Delft3D Open Source Community Deltares [Internet]. Netherlands: Deltares [cited 2022 Sep 26]. Available from: <https://oss.deltares.nl/web/delft3d/home>

5. NCEP Global Ocean Data Assimilation System (GODAS) [Internet]. NOAA/ National Weather Service [cited 2022 Nov 05]. Available from: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/wgrib2/index.html>

6. OpenGribs' Mission Statement [Internet]. OpenGribs [cited 2022 Nov 05]. Available from: <https://opengribs.org/en>

Стаття надійшла 23.11.2022