

УДК 551.46.08

Oleksandr Shyptsov¹, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Corresponding Member of National Academy of Sciences of Ukraine, Director
ORCID ID: 0000-0002-6285-0663 *e-mail*: shiptsov53@gmail.com

Anton Gordeev¹, Doctor of Geographical Sciences, Senior Researcher, Deputy Director
ORCID ID: 0000-0002-7263-0525 *e-mail*: drangoru@gmail.com

Oleksii Lebid², Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-4003-8068 *e-mail*: o.g.lebid@gmail.com

Viacheslav Okhariev², Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0001-6270-6293 *e-mail*: okhariev.vo@gmail.com

Roman Telychko², leading engineer
ORCID ID: 0000-0002-3574-7919 *e-mail*: roman.telychko@gmail.com

Sergiy Fedoseienkov¹, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of panoramic acoustic systems
ORCID ID: 0000-0002-9576-2977 *e-mail*: 22lex22s@ukr.net

Oleksiy Shundel¹, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-3076-9553 *e-mail*: lixyta666@gmail.com

¹State Institution «Scientific Hydrophysical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine», Kyiv, Ukraine

²Institute of Telecommunications and Global Information Space of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

INFORMATION TECHNOLOGIES FOR AUTOMATION OF HYDDROPHISICAL SITUATION MOLELLING AND FORECASTING IN THE BLACK SEA REGION

***Abstract.** The article offers a solution to the scientific and applied problem of automating the acquisition and analysis of a certain set of hydrophysical indicators with the subsequent formation of a forecast of the hydrophysical situation in the Black Sea water area. This topic is of great relevance both in peacetime and in the conditions of the current armed aggression of the Russian Federation against Ukraine. The solved task is an important element of solving the more complex problem of operational obtaining of oceanographic data for highlighting the hydrographic situation in the Black Sea water area, collection, accumulation and visualization of oceanographic data in the interests of navigation and hydrographic support of users of such information. To solve this problem, a software environment was created for automatic search and selection of hydrophysical data, as well as their automatic input into specialized software for modeling and forecasting the hydrophysical situation with subsequent calculation of forecasts of hydrophysical fields. A set of the most important data was formed, which includes indicators of salinity, temperature, circulation. Automatic search and selection of meteorological and hydrophysical data takes place from international GFS and COPERNICUS profile databases. Also, to increase the effect of the simulations and forecasts,*

a specialized interface was developed for searching, visualization, and the possibility of downloading by the user the results of the forecast module of the mathematical modeling of the spatio-temporal variability of the hydrophysical fields of the northwestern part of the Black Sea. The developed scientific and practical approaches and toolkit are designed to function within the framework of the distributed and centralized Bank of Oceanographic Data of the National Academy of Sciences of Ukraine, part of which is an intellectual information system for highlighting the hydrographic situation in the Black Sea water area. The obtained results are also aimed at increasing the level of environmental safety in the Black Sea water area and can be used to monitor nature management in this region.

Keywords: *hydrophysical situation; water area of the Black Sea; mathematical modeling; predictive model; automated information system; environmental safety.*

О.А. Щипцов¹, А.Ю. Гордєєв¹, О.Г. Лебідь², В.О. Охарєв², Р.І. Теличко², С.Г. Федосєєнков¹, О.І. Шундель¹

¹Державна установа «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України», м. Київ, Україна

²Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЗАЦІЇ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ГІДРОФІЗИЧНОЇ ОБСТАНОВКИ В АКВАТОРІЇ ЧОРНОГО МОРЯ

***Анотація.** В статті пропонується вирішення науково-прикладної задачі автоматизації отримання та аналізу визначеного набору гідрофізичних показників з подальшим формуванням прогнозу гідрофізичної обстановки в акваторії Чорного моря. Дана тематика має значну актуальність як для мирного часу, так і в умовах поточної збройної агресії Російської Федерації проти України. Розв'язана задача є важливим елементом вирішення більш комплексної проблеми оперативного отримання океанографічних даних для висвітлення гідрографічної обстановки в акваторії Чорного моря, збору, накопичення та візуалізації океанографічних даних в інтересах навігаційно-гідрографічного забезпечення користувачів такої інформації. Для вирішення даної задачі було створено програмне середовище для автоматичного пошуку та відбору гідрофізичних даних, а також їх автоматичного введення в спеціалізоване програмне забезпечення моделювання та прогнозування гідрофізичної обстановки з подальшим розрахунком прогнозів гідрофізичних полів. Було сформовано набір найбільш важливих даних, до якого входять показники солоності, температури, циркуляції. Автоматичний пошук та відбір метеорологічних та гідрофізичних даних відбувається з міжнародних профільних баз даних GFS та COPERNICUS. Також для підвищення ефекту від проведених моделювання та прогнозування було розроблено спеціалізований інтерфейс для пошуку, візуалізації та можливості завантаження користувачем результатів прогнозу модуля математичного моделювання просторово-часової мінливості гідрофізичних полів північно-західної частини Чорного моря. Розроблені науково-практичні підходи та інструментарій призначені для функціонування в рамках розподіленого та централізованого Банку океанографічних даних НАН України, частиною якого є інтелектуальна інформаційна система висвітлення гідрографічної обстановки в акваторії Чорного моря. Отримані результати також спрямовані на підвищення*

рівня екологічної безпеки в акваторії Чорного моря та можуть бути використані для моніторингу природокористування в цьому регіоні.

Ключові слова: *гідрофізична обстановка; акваторія Чорного моря; математичне моделювання; прогнозна модель; автоматизована інформаційна система; екологічна безпека.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.91-103>

Вступ

Україна від самого початку здобуття своєї незалежності здійснювала планомірні дослідження Чорного моря і, в першу чергу, північно-західної його частини [1–3]. Стратегічне значення даної акваторії зараз значно зросло внаслідок збройної агресії Російської Федерації проти України, відповідно, оперативне отримання прогнозів гідрофізичної обстановки стає критично важливою складовою національної безпеки.

В таких умовах важливого значення набуває задача оперативного отримання прогнозу гідрофізичної обстановки в Чорному морі. Її виконання забезпечується в рамках функціонування експериментального зразку гідрофізичного програмно-технологічного комплексу. 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 очікуваного результату.

Виміри таких показників проводяться в безперервному режимі як контактними (безпосередньо в акваторії за допомогою спеціалізованих буїв та іншого обладнання), так і дистанційними (зондування Землі з космосу) методами [4]. Багаторічні масиви даних агрегуються у профільних міжнародних базах знань, деякі з яких (наприклад, COPERNICUS) надають відкритий доступ користувачам для подальшої обробки. Аналіз динаміки показників та побудова прогнозу гідрофізичної обстановки проводиться методами математичного моделювання, реалізованими у спеціалізованому програмному забезпеченні. Вибір, отримання та введення даних у таке ПЗ потребує часу та зусиль, а подальший процес побудови математичної моделі також потребує спеціалізованих знань та навичок, якими не завжди володіє оператор інформаційної системи. Відповідно, постає науково-прикладна задача розробки програмного середовища, що забезпечує автоматизацію вищеописаних процесів аж до побудови прогнозу гідрофізичної обстановки [5].

Мета роботи. Розробка програмного середовища автоматичного пошуку та відбору визначеного переліку гідрофізичних даних та автоматичного їх введення в спеціалізоване програмне забезпечення Delft 3D Mesh Suite із подальшою побудовою 10-добових прогнозів гідрофізичних полів для північно-західної частини Чорного моря, що розширить технічні можливості експериментального зразка гідрофізичного програмно-технологічного комплексу за рахунок створення на береговому сервері централізованого Банку океанографічних даних НАН України інтерфейсу модуля для пошуку, візуалізації та можливості завантаження користувачем результатів прогнозу гідрофізичних (метеорологічних) параметрів.

Виклад основного матеріалу дослідження

Враховуючи специфіку поставленої в роботі науково-прикладної задачі, необхідно визначити критерії, за якими буде сформований перелік необхідних даних, що характеризують гідрофізичну обстановку. Під «гідрофізичною обстановкою» в даній роботі розуміємо результати вимірювань параметрів, що отримані як інструментальним шляхом (вимірювання безпосередньо в акваторії), так і дистанційними методами (космічний моніторинг тощо).

Основними вимогами до даних будемо вважати наступні:

- вимірність. Інформація повинна мати кількісний характер, це є необхідним для подальшого моделювання та прогнозування;
- регулярність. Дані мають надходити через рівний проміжок часу, причому така регулярність має бути забезпечена в довгостроковому аспекті;
- оперативність. Дані мають бути актуальними, тобто час на отримання та обробку має бути незначним;
- наочність. Інформація має адекватно висвітлювати динаміку гідрофізичної обстановки та відповідати саме тим задачам, які поставлені перед користувачем прогнозної моделі [6].

Отримувачем та агрегатором даних має бути розроблена в Науковому гідрофізичному центрі НАН України берегова інтелектуальна інформаційна система висвітлення гідрографічної обстановки в акваторії Чорного моря, зокрема Банк океанографічних даних як її критично важлива складова.

Враховуючи вимоги до даних та об'єктивні можливості їх отримання в поточних умовах, методом експертної оцінки [7, 8] був сформований наступний набір:

- гідрофізичні дані: солоність, температура, рівень поверхні води;
- океанографічні дані: цифрова модель рельєфу акваторії, представлена у вигляді набору батиметричних величин;
- метеорологічні дані: швидкість вітру; атмосферний тиск; хмарність; вологість; температура повітря.

Отримати океанографічні дані можна за допомогою різних методів доставки – правильний для вас залежить від випадку використання. Наприклад, історичні океанографічні дані зазвичай доступні для масового завантаження. З іншого боку, якщо необхідні оперативні дані, можна придбати дані у реальному часі, канали та потоки, щоб завантажити найновішу інформацію [9]. При цьому, існують авторитетні бази даних, що надають багаторічні дані у вільному режимі, потребуючі лише реєстрації на відповідному сервісі. Для виконання задач, поставлених в науково-технічній роботі, було обрано один з таких ресурсів, який надає оперативні, регулярні та достатньо повні актуалізації даних, в тому числі щодо акваторії Чорного моря, а саме базу знань проєкту Copernicus.

Copernicus заснований на трьох компонентах:

- космічна складова (спутники спостереження та відповідний наземний сегмент для спостереження наземних, атмосферних та океанографічних параметрів) [10]. Це включає в себе два типи супутникових місій, п'ять сімейств ESA Sentinel та інших космічних агентств;

- польові вимірювання (наземні та бортові мережі збору даних, що надають інформацію про акваторії, континентальну поверхню та атмосферу);
- сервіси, розроблені та керовані Copernicus і запропоновані своїм користувачам і громадськості в цілому.

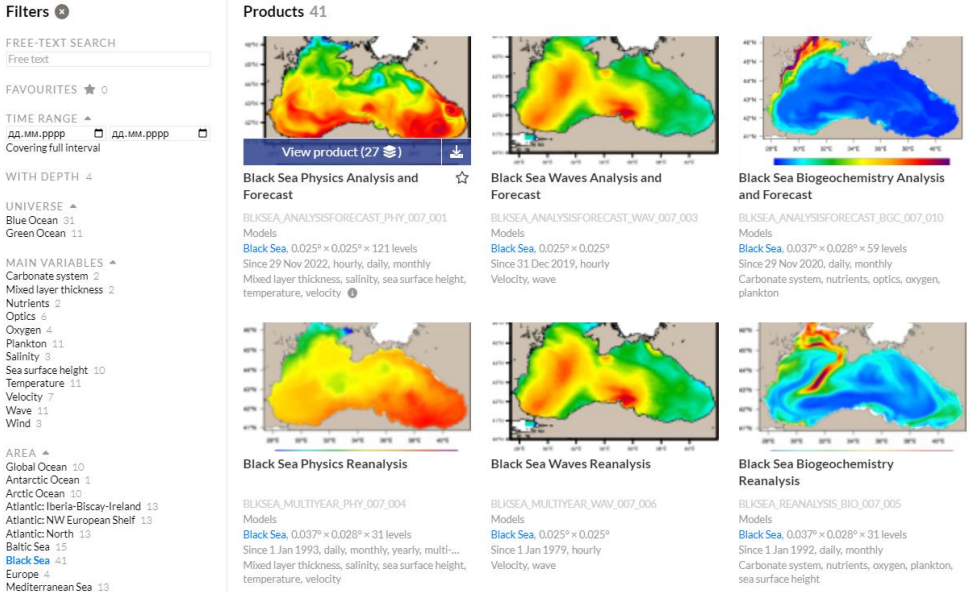


Рис. 1. Вікно виборки акваторії дослідження та типу гідрофізичних даних на порталі Copernicus Marine

Прогнозування гідрофізичної обстановки неможливе без точних та оперативних метеорологічних даних, таких як швидкість вітру; атмосферний тиск; хмарність; вологість; температура повітря [11]. Прогнозування метеорологічної ситуації – надзвичайно складна задача з точки зору математичного моделювання та вимог до програмної реалізації, відповідно, в світі працює лише декілька авторитетних прогнозних моделей, наприклад, ECMWF, GFS, METEOBLUE, ICON-EU. Для вирішення задач роботи було обрано застосування системи Global Forecast System (GFS) від NOAA (Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США).

Глобальна система прогнозування (GFS) – це система чисельного прогнозування погоди, яка містить глобальну комп’ютерну модель і варіаційний аналіз, що виконується Національною службою погоди США (NWS).

Математична модель запускається чотири рази на день і створює прогнози на 16 днів наперед, але зі зниженою просторовою роздільною здатністю через 10 днів. Здатності прогнозування зазвичай зменшуються з часом (як і з будь-якою моделлю числового прогнозування погоди), і для довгострокових прогнозів лише більші масштаби зберігають значну точність. Це одна з найкращих синоптичних моделей середньої дальності загального користування.

Модель GFS є моделлю з приблизною горизонтальною роздільною здатністю 13 км для днів (0-16 днів). По вертикалі модель поділена на

127 шарів і поширюється на мезопаузу (приблизно ~80 км), а тимчасово вона створює прогнозні дані щогодини протягом перших 120 годин, три години на 10-й день і 12 годин на 16-й день. Вихідні дані з GFS також використовуються для отримання статистики вихідних даних моделі.

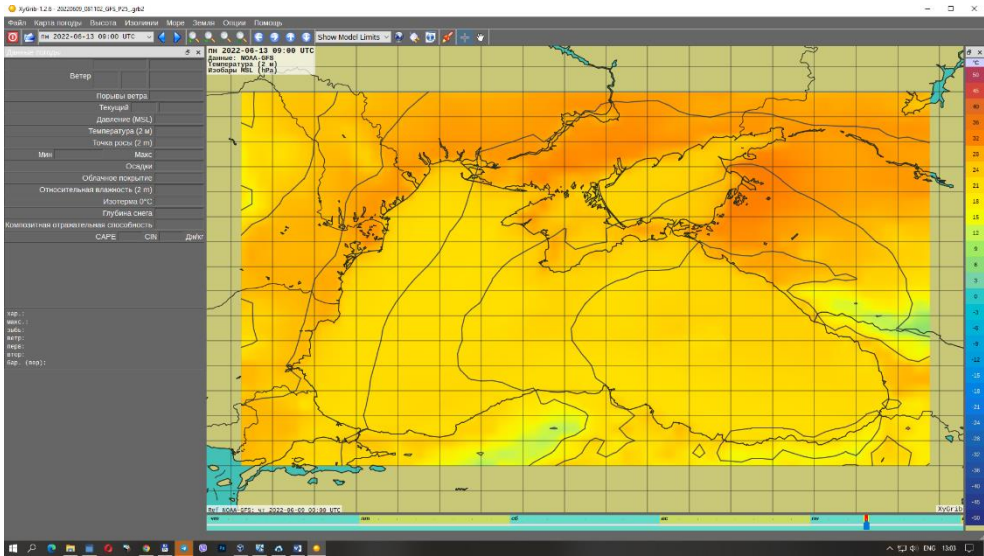


Рис. 2. Вікно вибору та завантаження гідрометеорологічних даних системи GFS проекту OpenGrib3

Для задач моделювання та прогнозування гідрофізичних показників пропонується використання спеціалізованого програмного забезпечення. Для цього було обрано програмний пакет Delft 3D Mesh Suite виробництва Deltares (Нідерланди). 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.

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.

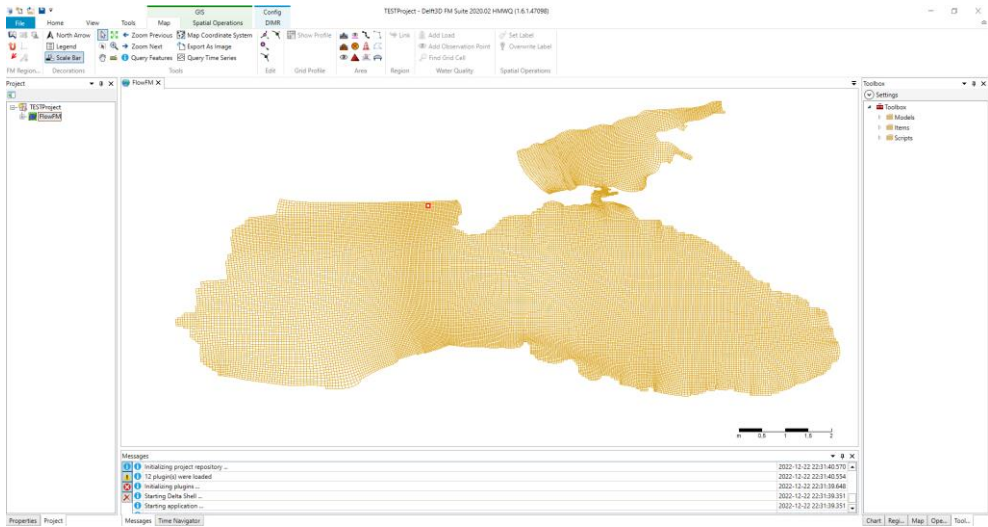


Рис. 3. Вікно проекту у програмному середовищі Delft 3D

Результати розрахунку можна візуалізувати та конвертувати в один із зручних графічних форматів (наприклад, PNG або GeoTIFF) у модулі QUICKPLOT, що розроблений у програмному середовищі MATLAB. Вікно побудови кінцевого зображення показано нижче на рисунку 4.

Задача створення спеціалізованого програмного середовища, що забезпечує автоматичний (без участі оператора) процес збору визначеного масиву даних, їх отримання та аналізу шляхом математичного моделювання та прогнозування у спеціалізованому програмному забезпеченні із подальшою побудовою прогнозу, зумовлює необхідність сформулювати вимоги до кінцевого продукту [5]. Перелік вимог є наступним:

- програмний продукт має бути інтегрованим з функціонуючим Банком океанографічних даних НАН України;
- розміщуватись на береговому сервері Наукового гідрофізичного центру НАН України;
- забезпечувати у визначений час із визначеною регулярністю пошук та завантаження даних температури, солоності, рівня поверхні води з ресурсу Copernicus.Marine (деталі наведені у додатку А) у форматі netCDF (.nc);
- забезпечувати пошук та завантаження даних метеорологічної моделі GFS;
- виконувати введення початкових даних у програмне середовище Delft3D Mesh Suite і проводити розрахунок прогнозів гідрофізичних полів (солоності, температури, циркуляції, вітру, атмосферного тиску) північно-західної частини Чорного моря на 10 діб із подальшою візуалізацією отриманої картографічної моделі в загальноприйнятих графічних форматах GeoTIFF та PNG;
- забезпечувати розміщення отриманих результатів на береговому сервері Банку океанографічних даних НАН України у спеціальному розділі.

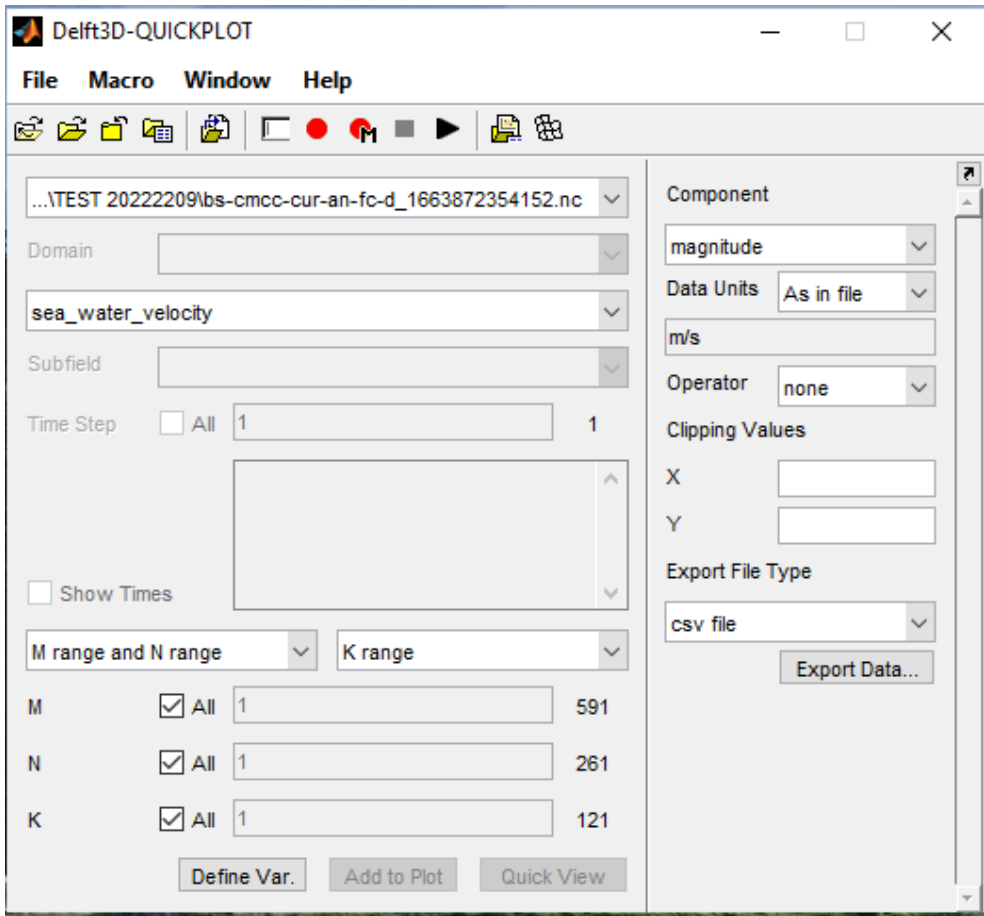


Рис. 4. Вікно побудови візуальної геомоделі у модулі QUICKPLOT

Модуль розташований на береговому сервері Банку океанографічних даних НАН України та частково інтегрований з його функціоналом. Модуль включає в себе наступні складові:

- Складова пошуку гідрофізичних даних;
- Складова відбору гідрофізичних даних;
- Складова прогнозування динаміки гідрофізичних показників;
- Складова візуалізації результатів прогнозування.

Характеристики розробленого модуля дозволяють забезпечувати автоматизований режим роботи вищеперерахованих складових.

Програмна складова звертається до встановленого на сервері програмного забезпечення Delft 3D Mesh Suite у автоматичному режимі. Також у автоматичному режимі відбувається візуалізація результатів шляхом автоматичного звернення до модуля QUICKPLOT (функціонує в середовищі MATLAB у рамках Delft 3D Mesh Suite). Скріншот робочого вікна та приклад результатів прогнозування наведені на рис. 5 та 6.


```
** INFO : Min. salinity limited, number of cells Limin = 1
** INFO : Min. salinity limited, min = -9.622455058695998E-004
** INFO : Min. salinity limited, number of cells Limin = 1
** INFO : Min. salinity limited, min = -7.437677439540357E-004
** INFO : Min. salinity limited, number of cells Limin = 1
** INFO : Min. salinity limited, min = -5.318552499746034E-004
** INFO : Min. salinity limited, number of cells Limin = 1
** INFO : Min. salinity limited, min = -3.203276324618805E-004
** INFO : Min. salinity limited, number of cells Limin = 1
** INFO : Min. salinity limited, min = -1.036162332718582E-004
** INFO : 0d 2:25:00 1d 21:35:00 0d 0:01:08 0d 0:21:30 547 5.0% 27.27273
** INFO : 0d 4:40:00 1d 19:20:00 0d 0:02:08 0d 0:19:46 520 9.7% 27.27273
** INFO : 0d 6:50:00 1d 17:10:00 0d 0:03:07 0d 0:18:45 494 14.2% 27.27273
** INFO : 0d 9:00:00 1d 15:00:00 0d 0:04:06 0d 0:17:47 468 18.8% 27.27273
** INFO : 0d 11:15:00 1d 12:45:00 0d 0:05:06 0d 0:16:39 441 23.4% 27.27273
** INFO : 0d 13:30:00 1d 10:30:00 0d 0:06:05 0d 0:15:34 414 28.1% 27.27273
** INFO : 0d 15:45:00 1d 8:15:00 0d 0:07:05 0d 0:14:31 387 32.8% 27.27273
** INFO : 0d 18:00:00 1d 6:00:00 0d 0:08:04 0d 0:13:27 360 37.5% 27.27273
** INFO : 0d 20:15:00 1d 3:45:00 0d 0:09:04 0d 0:12:25 333 42.2% 27.27273
** INFO : 0d 22:30:00 1d 1:30:00 0d 0:10:03 0d 0:11:23 306 46.9% 27.27273
** INFO : 1d 0:45:00 0d 23:15:00 0d 0:11:02 0d 0:10:22 279 51.6% 27.27273
** INFO : 1d 3:00:00 0d 21:00:00 0d 0:12:02 0d 0:09:21 252 56.2% 27.27273
** INFO : 1d 5:15:00 0d 18:45:00 0d 0:13:01 0d 0:08:20 225 60.9% 27.27273
** INFO : 1d 7:30:00 0d 16:30:00 0d 0:14:00 0d 0:07:20 198 65.6% 27.27273
** INFO : 1d 9:45:00 0d 14:15:00 0d 0:14:59 0d 0:06:20 171 70.3% 27.27273
** INFO : 1d 12:00:00 0d 12:00:00 0d 0:15:58 0d 0:05:19 144 75.0% 27.27273
** INFO : 1d 14:15:00 0d 9:45:00 0d 0:16:58 0d 0:04:19 117 79.7% 27.27273
** INFO : 1d 16:30:00 0d 7:30:00 0d 0:17:57 0d 0:03:20 90 84.4% 27.27273
** INFO : 1d 18:45:00 0d 5:15:00 0d 0:18:57 0d 0:02:20 63 89.1% 27.27273
** INFO : 1d 21:00:00 0d 3:00:00 0d 0:19:56 0d 0:01:20 36 93.8% 27.27273
** INFO : 1d 23:15:00 0d 0:45:00 0d 0:20:55 0d 0:00:20 9 98.4% 27.27273
```

Рис. 5. Робоче вікно модуля прогнозування гідрофізичної обстановки

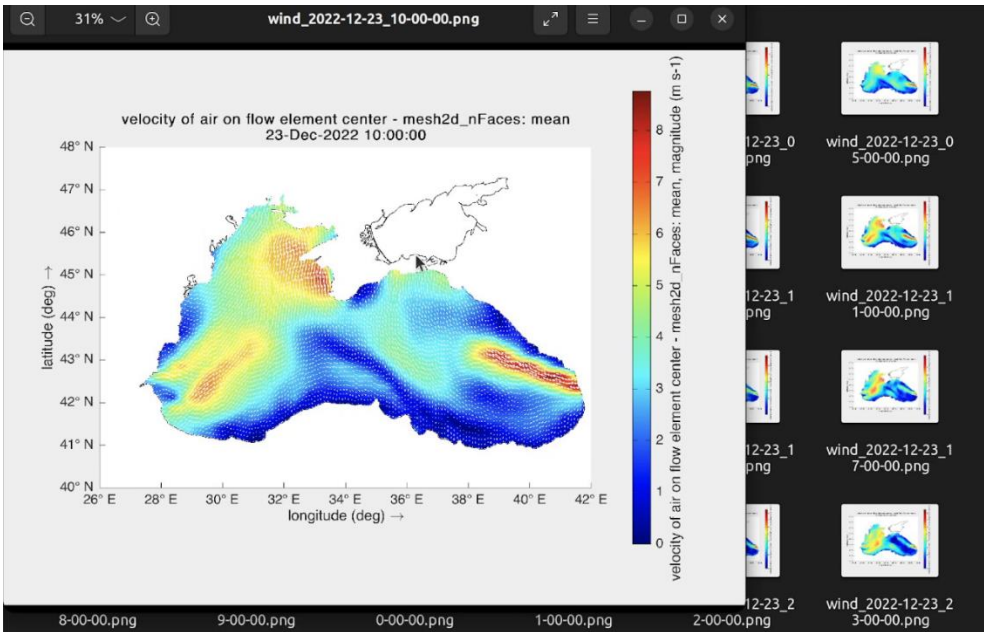


Рис. 6. Вікно видачі результатів роботи програмної складової, візуалізованих у форматі просторової геомоделі акваторії Чорного моря

Завершальним етапом роботи є створення модуля пошуку, візуалізації та можливості завантаження користувачем результатів прогнозу гідрофізичних параметрів. Нижче сформовані вимоги до його функціоналу:

- модуль має бути інтегрованим в єдину систему з Банком океанографічних даних НАН України;
- обов'язковою є наявність графічного інтерфейсу, що у зручній формі дозволяє проводити вибірку серед масиву прогнозних моделей за визначеним набором показників;

- модуль має містити блок пошуку прогнозу за наступними характеристиками: дата та час прогнозу; гідрофізичний параметр (солоність, температура води, циркуляція, вітер); глибина шару води, на який побудовано прогноз;
- наявність вікна візуалізації прогнозу у вигляді картографічної геомоделі, побудованої засобами Delft 3D Mesh Suite (конкретно, модуля QUICKPLOT).

Модуль математичного моделювання просторово-часової мінливості

Пошук прогнозу

Класичний

Дата:

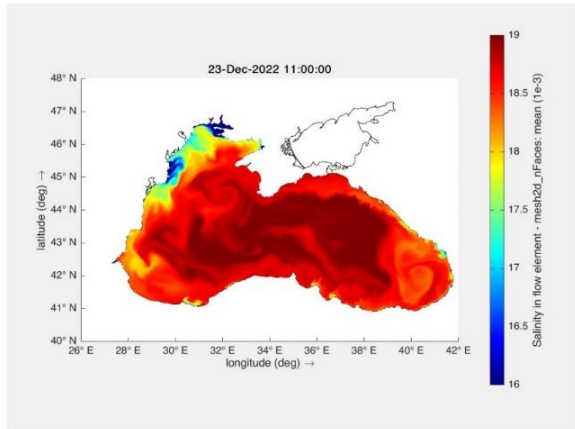
Час:

Гідрофізичний параметр:

Альтернативний

Гідрофізичний параметр:

Дата і час:



Завантаження прогнозу

[Зображення PNG](#)
[ГеоTIFF](#)
[Таблиця CSV](#)

Рис. 7. Інтерфейс модуля пошуку, візуалізації та можливості завантаження користувачем результатів прогнозу гідрофізичних параметрів

Висновки

За результатами досліджень, описаних в даній роботі, розглянуто питання збору багаторічних масивів гідрофізичної, океанографічної та метеорологічної інформації з міжнародних баз знань; визначено оптимальний перелік інформації, що є критично необхідною для оперативної оцінки гідрофізичної обстановки; створено програмне середовище, що забезпечує автоматизацію процесу збору визначеного масиву даних, їх отримання та аналізу шляхом математичного моделювання та прогнозування у спеціалізованому програмному забезпеченні із подальшою побудовою прогнозу; створено інтерфейс виведення результатів прогнозу модуля математичного моделювання просторово-часової мінливості гідрофізичних (метеорологічних) параметрів північно-західної частини Чорного моря, який дозволяє користувачу здійснювати пошук результатів прогнозу за датою, отримувати візуалізацію результатів прогнозу у вигляді картограм, завантажувати файли результатів прогнозу у графічних та ps.-форматах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Комплексные экспедиционные исследования 4-го рейса НИС «Киев» / Шипцов А.А., Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Лебедь А.Г. // Геофиз. журн. 1996. Т. 18, № 4, С. 83–84.
2. Геология Черного моря. (По результатам геологических и геофизических исследований 5-го рейса НИС «Киев») / Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Стажилов А.Г. и др. – Киев: ОМГОР ННПМ Украины, 1997. – 188 с.
3. Геология, геофизика и гидрография северо-западной части Черного моря / Е.Ф. Шнюков, А.В. Иванников, В.П. Коболев – Киев: Изд-во Государственной гидрографической службы Украины, 1998. – 221 с.
4. Шундель, О.І., Федосеєнков 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>.
5. Тучковенко Ю.С., Кушнір Д.В., Гончаренко Р.В., Титюк Т.Г., Шипцов О.А. Автоматизований модельний комплекс для забезпечення діяльності Військово-Морських Сил України оперативними прогнозами океанографічних умов. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського*. 2020. № 3(70). С. 75–83. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2020-3-70/75-83>.
6. Шундель О.Л., Федосеєнков С.Г., Неверова С.І. Принципи створення структурних геологічних моделей неоднорідного шаруватого дна. *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2021. Т. 17, № 4. С. 39–51. <https://doi.org/10.15407/grimo2021.04.039>.
7. Шундель О.І. Розробка математичної моделі шаруватого неоднорідного середовища як складової частини Банку океанографічних даних Національної академії наук України. *Океанографічний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану)*. 2021. №3 (14). С. 29–49. [https://doi.org/10.37629/oj.vi3%20\(14\).36](https://doi.org/10.37629/oj.vi3%20(14).36).
8. Голодов М.Ф., Гордєєв А.Ю., Нестеренко Л.В., Тимченко Ю.А., Федосеєнков С.Г., Шундель О.І., Шипцов О.А., Шипцов О.О. Гідрофізичні дослідження морського та річкового середовища. *Геофізичний журнал*. 2019. Т. 41, № 6. С. 111–127. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190070>.
9. Голодов М.Ф., Гордєєв А.Ю., Попов Ю.І., Федосеєнков С.Г., Шипцов О.А., Шипцов О.О. Комплексні морські (річкові) експедиційні дослідження – важливий напрям розвитку науково-технічного потенціалу морегосподарського комплексу країни. *Геофізичний журнал*. 2019. Т. 41, № 5. С. 206–221. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i5.2019.183631>.
10. Шипцов О.А. Цифровий вектор розвитку України: формування національної індустрії океанографічних геопросторових даних. *Геофізичний журнал*. 2021. Т. 43, № 1. С. 266–275. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225553>.
11. Шипцов О.А., Крета Д.Л., Лебідь О.Г., Шевякіна Н.А. Використання результатів дистанційного зондування Землі в задачах моніторингу навігаційно-гідрографічної обстановки. *Екологічна безпека та природокористування*. 2020. Т. 36, № 4. С. 66–76. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.4.66-76>.

Стаття надійшла до редакції 10.01.2023 і прийнята до друку після рецензування 13.03.2023

REFERENCES

1. Shchyptsov, A. A., Shnjukov, E. F., Kobolev, V. P., & Lebed', A. G. (1996). Comprehensive expeditionary research of the 4th cruise of the R/V "Kyiv". *Geofiz. zhurn.*, 18(4), 83–84.
2. Shnjukov, E. F., Kobolev, V. P., Stazhilov, A. G. et al. (1997). *Geology of the Black Sea. (According to the results of geological and geophysical studies of the 5th cruise of the R/V Kyiv)*. Kyiv: OMGOR NNPM Ukrainy [in Russian].

3. Shnjukov, E. F., Ivannikov, A. V., & Kobolev, V. P. (1998). Geology, geophysics and hydrography of the north-western part of the Black Sea. Kiev: Izd-vo Gosudarstvennoy gidrograficheskoy sluzhby Ukrainy [in Russian].
4. Shundel, A. I., & Fedoseenkov, S. G. (2022). Creation of a system of comprehensive monitoring of the aquatic environment state of the Black Sea by its mathematical modeling. *Environmental Safety and Natural Resources*, 41(1), 111–120 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.1.111-120>.
5. Tuchkovenko, Yu. S., Kushnir, D. V., Honcharenko, R. V., Tytiuk, T. H., & Shchypstov, O. A. (2020). An automatized modeling complex to support the activity of the Naval Forces of Ukraine by providing the operational forecasts of oceanographic conditions. *Zbirnyk naukovykh prats Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen Natsionalnoho universytetu oborony Ukrainy im. I. Cherniakhovskoho*, 3(70), 75–83 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2020-3-70/75-83>.
6. Shundel, O. I., Fedoseienkov, S. H., & Nevierova, S. I. (2021). Principles of formation of structural geological models of heterogeneous layered bottom. *Geology and Mineral Resources of World Ocean*, 17(4), 39–51 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/gpimo2021.04.039>.
7. Shundel, O. I. (2021). Development of a mathematical model of a layered heterogeneous environment as a component of the Oceanographic Data Bank of the National Academy of Sciences of Ukraine. *Okeanohrafichnyi zhurnal (Problemy, metody ta zasoby doslidzhen Svitovoho okeanu)*, 3(14), 29–49 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.37629/oj.vi3%20\(14\).36](https://doi.org/10.37629/oj.vi3%20(14).36).
8. Golodov, M. F., Gordieiev, A. Y., Nesterenko, L. V., Tymchenko, Y. A., Fedoseenkov, S. G., Shundel, O. I., Shchypstov, O. A., & Shchypstov, O. O. (2019). Hydrophysical Research of marine and Riverine Environments. *Geofizicheskyy Zhurnal*, 41(6), 111–127 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190070>.
9. Golodov, N. F., Gordeyev, A. Y., Popov, Y. I., Fedoseenkov, S. G., Shchypstov, O. A., & Shchypstov, O. O. (2019). Complex marine (river) expeditionary studies – an important direction of development of scientific and technical potential of the sea-economy complex of the country. *Geofizicheskyy Zhurnal*, 41(5), 206–221 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i5.2019.183631>.
10. Shchypstov, O. A. (2021). Digital Vector of Ukraine development: Formation of national industry of Oceanographic Geospatial Data. *Geofizicheskyy Zhurnal*, 43(1), 266–275 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225553>.
11. Shchypstov, O. A., Kreta, D. L., Lebid, O. G., & Sheviakina, N. A. (2020). Use of remote sensing results in the tasks of navigational and hydrographic situation monitoring. *Environmental Safety and Natural Resources*, 36(4), 66–76 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.4.66-76>.

The article was received 10.01.2023 and was accepted after revision 13.03.2023

Щипцов Олександр Анатолійович

доктор географічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, директор Державної установи «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України»

Адреса робоча: Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 42, лабораторний корпус В
ORCID ID: 0000-0002-6285-0663 **e-mail:** shiptsov53@gmail.com

Гордєєв Антон Юрійович

доктор географічних наук, старший дослідник, заступник директора з наукової роботи Державної установи «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України»

Адреса робоча: Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 42, лабораторний корпус В
ORCID ID: 0000-0002-7263-0525 **e-mail:** drangoru@gmail.com

Лебідь Олексій Григорович

доктор технічних наук, старший дослідник, заступник директора з наукової роботи Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: 03186, Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: 0000-0002-4003-8068 *e-mail:* o.g.lebid@gmail.com

Охарєв Вячеслав Олександрович

кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: 03186, Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: 0000-0001-6270-6293 *e-mail:* okhariev.vo@gmail.com

Теличко Роман Ігорович

провідний інженер Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: 03186, Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: 0000-0002-3574-7919 *e-mail:* roman.telychko@gmail.com

Федосєнков Сергій Генадійович

кандидат геологічних наук, завідувач відділу панорамних акустичних систем Державної установи «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України»

Адреса робоча: Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 42, лабораторний корпус В

ORCID ID: 0000-0002-9576-2977 *e-mail:* 22lex22s@ukr.net

Шундель Олексій Іванович

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник відділу панорамних акустичних систем Державної установи «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України»

Адреса робоча: Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 42, лабораторний корпус В

ORCID ID: 0000-0002-3076-9553 *e-mail:* lixyta666@gmail.com