

УДК 551.46.08

**Oleksii Lebid<sup>1</sup>**, Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher, Deputy Director for Science

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4003-8068> *e-mail*: o.g.lebid@gmail.com

**Viacheslav Okhariev<sup>1</sup>**, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6270-6293> *e-mail*: okhariev.vo@gmail.com

**Sergiy Fedoseienkov<sup>2</sup>**, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Deputy Director for Science

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9576-2977> *e-mail*: 22lex22s@ukr.net

**Oleksiy Shundel<sup>2</sup>**, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Senior Researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3076-9553> *e-mail*: lixyta666@gmail.com

**Roman Telychko<sup>1</sup>**, Leading Engineer

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3574-7919> *e-mail*: roman.telychko@gmail.com

**Oleg Klymenkov<sup>1</sup>**, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7664-5225> *e-mail*: oleg@klymenkov.com

<sup>1</sup>Institute of Telecommunications and Global Information Space of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>State Institution "Scientific Hydrophysical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine

## **GEOINFORMATION TECHNOLOGIES OF ENVIRONMENTAL MONITORING IN THE BLACK SEA AFTER KAKHOVSKA HYDROELECTRIC POWER PLANT DISASTER**

***Abstract.** The article offers the implementation of the proposed approach to the assessment and forecasting of indicators of environmental monitoring of marine water areas. It is an important component of the process of information support for decision-making in the field of environmental safety. The south-western part of the Black Sea water area was as the test region, was suffered from a negative environmental impact of a terrorist attack by Russian armed forces in the area of the Kakhovskaya hydroelectric power plant. The attack caused the destruction of the facility and the leakage of water from the Kakhovska reservoir with catastrophic consequences for the Northern Black Sea region. The authors proposed to apply a combination of data from contact monitoring of hydrophysical indicators, remote sensing data and mathematical modeling based on geospatial data in the specialized geo-information software environment Delft3D Mesh Suite within the framework of the developed software component. The component provides for the automation of data collection and processing processes followed by modeling and forecasting and visualization hydrophysical processes in the water area. On the basis of the applied information technologies, an analysis was carried out and geomodels were built, describing the hydrophysical situation in the northwestern part of the Black Sea both before the disaster and after certain time intervals after it, like a week and a month). The dynamics of seawater salinity as an important indicator of the potential increase of biogenic substances in the composition of seawater, as well as the nature of the circulation of water masses, which can provide additional information about the features of the geographical distribution of pollutants in the area affected by the*

*disaster, were analyzed. The need for further real-time ecological monitoring of the consequences of the disaster, especially in the most affected parts of the water area near the northwestern coast of the Black Sea and on the coastal areas of the land in this region with the implementation of the proposed information technologies, is substantiated.*

**Keywords:** Black sea water area; Kakhovska hydroelectric power station; man-made impact; hydrophysic situation; remote sensing; geographic information technology.

**О.Г. Лебідь<sup>1</sup>, В.О. Охарев<sup>1</sup>, С.Г. Федосєєнков<sup>2</sup>, О.І. Шундель<sup>2</sup>, Р.І. Телічко<sup>1</sup>, О.А. Клименков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України, м. Київ, Україна

<sup>2</sup>Державна установа «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України», м. Київ, Україна

## **ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ АКВАТОРІЇ ЧОРНОГО МОРЯ ПІСЛЯ РУЙНУВАННЯ КАХОВСЬКОЇ ГЕС**

***Анотація.** В статті пропонується приклад реалізації запропонованого підходу до оцінки та прогнозування показників екологічного моніторингу морських акваторій, що є важливою складовою процесу інформаційної підтримки прийняття рішень в сфері екологічної безпеки. В якості регіону дослідження взято південно-західну частину акваторії Чорного моря, що зазнала негативного екологічного впливу внаслідок терористичної атаки збройних формувань РФ в районі Каховської ГЕС, що викликало руйнування самого об'єкта та витік води з Каховського водосховища із катастрофічними наслідками для регіону Північного Причорномор'я. Авторами запропоновано застосувати поєднання даних контактного моніторингу гідрофізичних показників, дані космічної зйомки та математичне моделювання на основі геопросторових даних у спеціалізованому геоінформаційному програмному середовищі Delft3D Mesh Suite в рамках розробленої програмної складової, що передбачає автоматизацію процесів збору та обробки даних із подальшим проведенням моделювання, прогнозування та візуалізації гідрофізичних процесів в акваторії. На основі застосованих інформаційних технологій проведено аналіз та побудовано геомоделі, що описують гідрофізичну обстановку в північно-західній частині Чорного моря як перед катастрофою, так і через певні проміжки часу після неї (тиждень, місяць). Проаналізовано динаміку солоності морської води як важливого індикатора потенційного збільшення біогенних речовин в складі морської води, а також характер циркуляції водних мас, що може надати додаткову інформацію про особливості географічного розподілу забруднюючих речовин в зоні впливу катастрофи. Обґрунтовано необхідність подальшого екологічного моніторингу наслідків катастрофи в режимі реального часу, особливо в найбільш постраждалих частинах акваторії біля північно-західного узбережжя Чорного моря та на приморських ділянках суходолу в цьому регіоні із впровадженням запропонованих інформаційних технологій.*

**Ключові слова:** акваторія Чорного моря; Каховська ГЕС; техногенне забруднення; гідрофізична обстановка; космічний моніторинг; геоінформаційні технології.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.130-144>

## Вступ

Терористична атака збройних формувань Російської Федерації 6 червня 2023 року, наслідками якої стало руйнування Каховської гідроелектростанції та фактичне зникнення Каховського водосховища, має фундаментальні наслідки не лише для екосистеми Дніпра та прилеглих територій, а також для екологічної та гідрофізичної обстановки в акваторії Чорного моря, надто в її північно-західній частині. Через русло Дніпра та Дніпро-Бузький лиман до чорноморської акваторії потрапили значні об'єми екологічно небезпечних речовин, що є продуктами господарської діяльності в регіоні Нижнього Подніпров'я. Крім того, фактором додаткової екологічної напруги є разове потрапляння в Чорне море величезних об'ємів прісної води внаслідок руйнування дамби Каховського водосховища. Залпове опріснення призводить до змін гідрохімічного та гідробіологічного складу морської води, збільшує масштаби евтрофікаційних процесів, що, відповідно, впливає на біорізноманіття та функціонування морських екосистем в цілому.

Розвиток та наслідки екологічних катастроф подібного масштабу мають підлягати оперативному моніторингу, оптимально – максимально наближеному до режиму реального часу. Оперативний відбір проб води в зоні екологічного лиха може бути ускладнений форс-мажорними обставинами, зокрема, як і у випадку катастрофи на Каховській ГЕС, коли значна частина стаціонарних пунктів гідрологічного моніторингу в гирлі Дніпра та Чорноморській акваторії знаходиться на окупованих територіях, або ж у зоні активних бойових дій. Відповідно, застосування дистанційних методів моніторингу доквілля стає не просто бажаним, а критично необхідним для оперативної оцінки ситуації.

Оцінка та прогнозування наслідків надзвичайних екологічних ситуацій потребує застосування сучасних інформаційних технологій, що базуються на обробці геопросторових даних [1, 2]. Авторами пропонується використати розроблене програмне середовище автоматичного пошуку та відбору визначеного переліку гідрофізичних даних для оцінки та прогнозування екологічної ситуації, що базується на поєднанні даних дистанційного та доступних наразі пунктів контактного моніторингу північно-західної частини акваторії Чорного моря.

**Мета роботи.** Удосконалення розробленого 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 та його впровадження в задачах оцінки та прогнозування надзвичайної екологічної ситуації в північно-західній частині акваторії Чорного моря, що виникла внаслідок руйнування Каховської ГЕС.

## Виклад основного матеріалу дослідження

Швидке поширення техногенного забруднення в акваторії Чорного моря почалося вже через добу після підриву Каховської гідроелектростанції та продовжувалося близько місяця. Супутникові знімки та результати наземного екологічного моніторингу (зокрема, дані Українського наукового центру екології моря) показали стрімке збільшення концентрацій біогенних речовин в

період до 17.06.23 та падіння солоності більш ніж у 2 рази. Гранично допустимі концентрації були перевищені по вмісту нафтопродуктів та важких металів (кадмій, цинк тощо) по лінії узбережжя від Дніпро-Бузького лиману до м. Одеса [3].

Космічні знімки, представлені нижче, ілюструють наслідки катастрофи для акваторії як в статистиці, так і в динаміці.

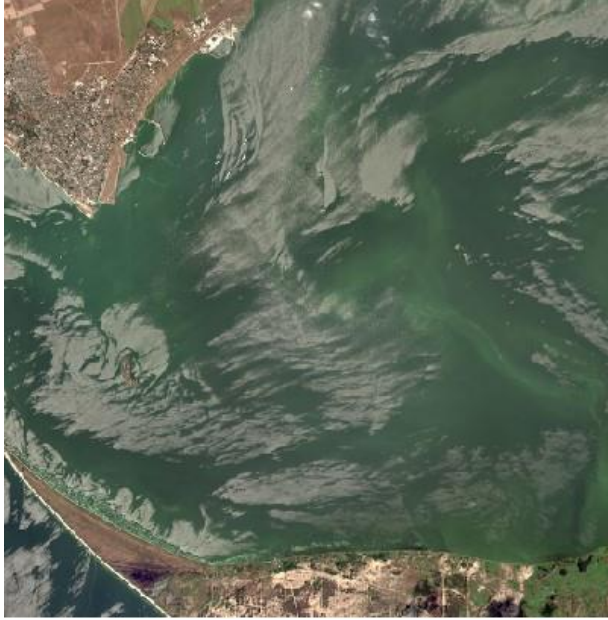


Рис. 1. Супутникове зображення акваторії Дніпро-Бузького лиману (естуарій Дніпра) в районі м. Очаків від 24 липня 2023 р. (джерело – Maxar Technologies)



Рис. 2. Накладені супутникові зображення акваторії Одеської бухти від 9 червня 2022 р. (верхній) та 25 червня 2023 р. (нижній знімок) (джерело – Maxar Technologies)

Дані зображення в оптичному діапазоні дозволяють чітко зафіксувати збільшення масштабів цвітіння у морській воді внаслідок її опріснення (області акваторії зеленого відтінку). Для Одеської бухти можна порівняти зображення за червень 2022 та, відповідно, 2023 р., де також фіксується значне збільшення концентрації біогенних речовин у воді. Аналогічні тенденції можна спостерігати на супутникових зображеннях північно-західної частини акваторії в цілому (рис. 3 а-б)



а)



б)

Рис. 3. Зображення північно-західної частини акваторії Чорного моря: а) 18.06.23; б) 23.06.23 (космічний апарат SENTINEL-2, джерело – Copernicus Dataspace Ecosystem)

Для оцінки та прогнозування динаміки екологічної ситуації пропонується розроблений авторами підхід, заснований на застосуванні геоінформаційних технологій для автоматизації збору, аналізу та прогнозування шляхом обробки великих масивів гідрофізичних даних. З цією метою було розроблено та апробовано програмне середовище, що забезпечує автоматизацію процесу збору визначеного масиву даних, їх отримання та аналізу шляхом математичного моделювання та прогнозування у спеціалізованому програмному забезпеченні Delft 3D Mesh Suite розробки Deltares (Університет м. Делфт, Нідерланди). Детально технологія розробки програмної складової

описана авторами в роботі [4], деякі деталі концепції також представлені в роботах [5-7].

Масив гідрофізичних даних, що береться в обробку, має відповідати наступним вимогам:

- інформація, яка збирається, повинна бути кількісною. Це означає, що параметри повинні бути виміряні в числовому виразі, що дозволяє їх використовувати для математичного аналізу та моделювання;

- дані мають надходити на регулярній основі через рівні проміжки часу. Ця регулярність допомагає створити довгострокові часові ряди та визначити тенденції в гідрофізичних параметрах з плином часу;

- інформація має бути актуальною. Тобто час, який потрібно на збір та обробку даних, має бути мінімальним. Це важливо, особливо для ситуацій, коли гідрофізичні параметри можуть змінюватися швидко і впливати на безпеку чи природні ресурси [8];

- інформація має бути представлена у формі, яка найкраще відображає динаміку гідрофізичної обстановки та відповідає конкретним завданням, які ставляться перед користувачем прогнозної моделі. Це може включати в себе графіки, картографічні дані або інші візуалізації.

Враховуючи ці вимоги, можна забезпечити збір інформації про гідрофізичну обстановку, яка буде корисною для наукових досліджень, прийняття рішень та прогнозування в області гідрології та управління водними ресурсами в надзвичайних ситуаціях.

Для вирішення поставлених задач запропонованими програмними засобами авторами вважається за оптимальне сформувати наступну вибірку гідрофізичних даних:

- гідрологічні: солоність, температура, рівень поверхні води;

- цифрова модель рельєфу акваторії, представлена у вигляді набору батиметричних величин;

- метеорологічні: швидкість вітру; атмосферний тиск; хмарність; вологість; температура повітря.

Перевірка якості отриманих даних полягає в оцінці достовірності інформації, зокрема, шляхом аналізу результатів вимірювань, підтверджених параметрів і контролю якості. Для оцінки достовірності даних проводиться ретельний аналіз набору даних, спрямований на виявлення будь-яких відхилень від очікуваних моделей чи тенденцій. Крім того, користувачі можуть порівнювати дані з іншими джерелами, щоб переконатися в їхній надійності. Сучасні методи оцінки якості даних включають використання аналітичних методів. Це допомагає виявити складні взаємозв'язки в даних та визначити їхню точність [9].

Для отримання океанографічних даних існують різні методи доставки, вибір яких залежить від конкретних потреб. Історичні дані можна завантажити масово, в той час як для оперативного моніторингу доступні API та потокові дані у реальному часі. Деякі авторитетні бази даних надають безкоштовний доступ до даних при реєстрації. У даній науково-технічній роботі використовується база даних проекту Copernicus як джерело оперативних, регулярних та повних оновлень океанографічних даних, зокрема, щодо акваторії Чорного моря. Це дозволяє забезпечити актуальну та достовірну інформацію для досліджень і наукових завдань.

Sorpenicus – це програма Європейського Союзу зі спостереження за Землею, яка координується та керується для Європейської Комісії Агентством Європейського Союзу з космічної програми у партнерстві з Європейським космічним агентством (ESA), державами-членами ЄС.

Проект спрямований на досягнення глобальної, безперервної, автономної, високоякісної широкомасштабної можливості спостереження Землі. Надання точної, своєчасної та легкодоступної інформації для, серед іншого, покращення управління навколишнім середовищем, розуміння та пом'якшення наслідків зміни клімату та забезпечення цивільної безпеки.

Мета полягає в тому, щоб використовувати величезну кількість глобальних даних із супутників і наземних, бортових і морських вимірювальних систем для отримання своєчасної та якісної інформації, послуг і знань, а також для забезпечення автономного та незалежного доступу до інформації у сферах навколишнього середовища та безпеки на глобальному рівні, щоб допомогти постачальникам послуг, державним органам влади та іншим міжнародним організаціям покращити якість життя громадян Європи. Іншими словами, він об'єднує всю інформацію, отриману екологічними супутниками Sorpenicus, повітряними та наземними станціями та датчиками, щоб отримати повну картину «здоров'я» Землі.

В складовій космічного моніторингу Sorpenicus використовує супутникові системи спостереження та відповідний наземний сегмент, призначений для збору і обробки даних про наземні, атмосферні та океанографічні параметри. В рамках цього компонента існують два типи супутникових місій: п'ять різних сімейств супутників ESA Sentinel, які здійснюють спостереження, та інші місії від різних космічних агентств, які також здійснюють свій внесок у збір даних. Наземна складова спостережень доповнює дані, отримані з космічних апаратів, і відіграє важливу роль у забезпеченні повноти та точності інформації.

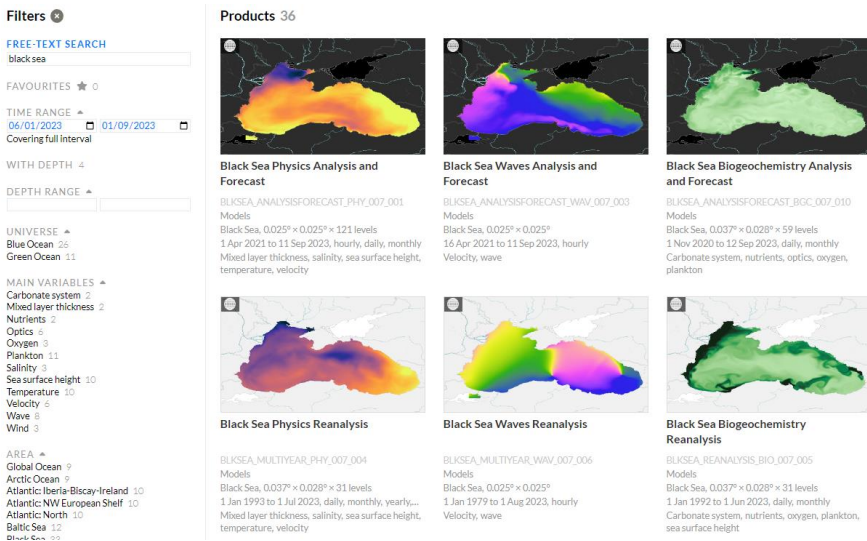


Рис. 4. Вибірка багатерічних даних Sorpenicus Marine для аналізу екологічної ситуації в акваторії Чорного моря (гідрофізичні та біохімічні дані)

Для коректного аналізу необхідні точні та оперативні метеорологічні дані, такі як швидкість вітру, атмосферний тиск, хмарність, вологість і температура

повітря. Прогнозування погоди є складною задачею, що вимагає математичного моделювання і високих вимог до програмної реалізації. У світі існує лише кілька авторитетних прогностичних моделей, таких як GFS, ECMWF, GFS, ICON-EU, METEOBLUE. В даній роботі використовувалась Global Forecast System (GFS) від Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США (NOAA). Це комплексна система чисельного прогнозування погоди, яка включає глобальну комп'ютерну модель та варіаційний аналіз, що виконується Національною службою погоди США (NWS). Математична модель GFS запускається чотири рази на день і генерує прогнози на 16 днів вперед, проте зі зменшеною просторовою роздільною здатністю після 10-го дня. Точність прогнозів зазвичай зменшується зі збільшенням проміжку часу (як це відбувається з будь-якою моделлю чисельного прогнозу погоди), і для довгострокових прогнозів лише більші шкали зберігають значний рівень точності. GFS є однією з найкращих синоптичних моделей для середньострокових прогнозів загального використання. Модель GFS має приблизну горизонтальну роздільну здатність 13 км для перших 16 днів прогнозування. Вона складається з 127 вертикальних шарів і охоплює мезопаузу (приблизно 80 км). Модель генерує прогнозні дані щогодини протягом перших 120 годин, кожні 3 години до 10-го дня і кожні 12 годин на 16-й день. Дані з GFS використовуються також для отримання статистичної інформації щодо вихідних даних моделі [10, 11].

Після збору необхідних даних наступним етапом є проведення аналізу та прогнозування ситуації в акваторії за обраним набором показників. Для вирішення задач моделювання та прогнозування гідрофізичних показників пропонується використання спеціалізованого програмного забезпечення. Для цього було обрано програмний пакет Delft 3D Mesh Suite розробки Deltares (Університет м. Делфт, Нідерланди). Delft3D є визнаним у світі open source-проектом для 3D-моделювання в задачах дослідження гідродинаміки, транспортування наносів, морфології та якості води.

Модель Delft3D складається з декількох модулів, кожен з яких відноситься до конкретної області, що цікавить.

Всі модулі динамічно пов'язані для обміну даними та результатами, які необхідні для спільного розрахунку. Модуль Delft3d-FLOW відповідає за гідродинаміку. За його допомогою можна розрахувати швидкість і напрямок течій, рівень води, солоність і температуру води, траєкторію руху домішок у воді тощо. У модулі Delft3D-WAVE відбувається розрахунок короткохвильового поширення (спільно використовуючи модель SWAN). D-Water Quality дозволяє розрахувати загальну якість води, Delft3D-SED – перенесення донних відкладень, а D-Waq PART моделює перенесення частинок та розлив нафти.

Так само в моделі є інструменти для обробки вихідних даних та результатів, генерації сітки, батиметрії, відкритих кордонів, споруд, перешкод та інших вхідних файлів. Підпрограма RGRFGRID дозволяє згенерувати розрахункову сітку та всі необхідні з нею файли.

Центральний модуль Delft3D-FLOW є багатовимірною гідродинамічною програмою симуляції, яка має можливість розрахунку нестационарного потоку та явища перенесення внаслідок припливного та метеорологічного впливу на криволінійній граничній сітці. Модуль Delft3D-FLOW заснований на рівняннях Нав'є-Стокса. Основні сфери застосування даного модуля:



- приливні та вітрові течії (тобто штормовий нагін);
- стратифіковані та щільнісні течії;
- моделювання течії в річках;
- моделювання в глибоких озерах та водосховищах;
- температурна стратифікація в озерах, морях та водоймах;
- перенесення розчиненої речовини та забруднюючих речовин;
- течії, викликані впливом хвиль;
- негідростатичні течії.

Для моделювання еволюції вітрових хвиль у прибережних ділянках, естуаріях, припливних територіях, озерах тощо використовується модель вітрового хвилювання третього покоління SWAN – Simulating Waves Nearshore, яка інтегрована в модуль Delft3D-WAVE. Він може працювати у комбінації з модулем Delft3D-FLOW, використовуючи паралельний розрахунок.

Модуль Delft3D-FLOW, заснований на методі кінцевих різниць, імітує двовимірні (опосередковані по глибині) або тривимірні нестационарні течії та явища перенесення, що виникають внаслідок припливних та метеорологічних явищ, а також неоднорідності полів температури та солоності. Модель потоку може використовуватися для прогнозування потоків у морях, прибережних районах, естуаріях, лагунах, річках та озерах.

У системі чисельного гідродинамічного моделювання DELFT3D-FLOW вирішуються нестационарні рівняння мілкої води (лінійні рівняння Сен-Венана) у двовимірному чи тривимірному просторі. Система рівнянь складається з горизонтальних рівнянь руху, рівняння нерозривності та рівнянь перенесення. Рівняння формуються на ортогональній криволінійній або рівновіддаленій розрахунковій сітці у метричних чи сферичних координатах.

Потік генерується припливними силами, напором вітру на вільній поверхні, градієнтами тиску (баротропними) та щільністю (бароклініними). Також включені рівняння витрати води.

Модуль Delft3D-FLOW включає математичні моделі, які враховують наступні фізичні параметри (рис. 5):

- градієнти вільної поверхні (баротропна складова);
- ефект обертання Землі (коефіцієнт Коріоліса);
- вода зі змінною щільністю (рівняння стану);
- бароклінна складова;
- перенос солі, тепла та інших складових;
- зміна напруги вітру на поверхні за простором та часом;
- зміна атмосферного тиску на поверхні за часом та простором;
- стік вод;
- теплообмін через вільну поверхню;
- випаровування та атмосферні опади;
- припливоутворюючі сили;
- бічна напруга на стінках;
- вплив хвиль;
- хвильова напруга та потоки мас;
- потоки через гідравлічні конструкції.

Отримані обчислення можна зобразити і перетворити в один зі зручних графічних форматів, таких як PNG або GeoTIFF, за допомогою модуля QUICKPLOT, який розроблено в середовищі MATLAB.

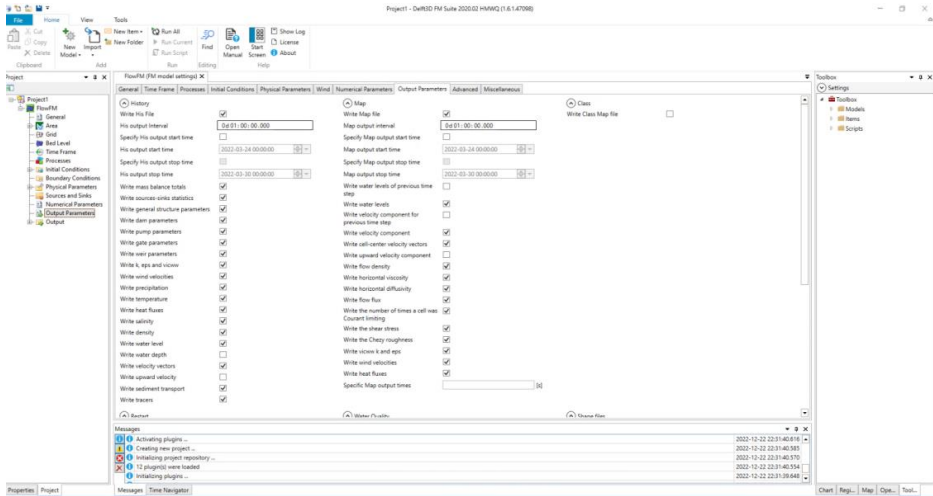


Рис. 5. Вікно налаштування параметрів моделі у Delft 3D (модуль FLOW)

Розроблена програмна складова (модуль) містить засоби [3] реалізації всього описаного процесу від збору даних до візуалізації результатів. Модуль забезпечує розміщення отриманих результатів в Банку океанографічних даних, що розміщений на береговому сервері Наукового гідрофізичного центру НАН України. Характеристики розробленого модуля дозволяють забезпечувати автоматизований режим роботи вищеперерахованих складових [3]. Модуль автоматично взаємодіє зі встановленим на сервері програмним забезпеченням Delft 3D Mesh Suite. Також автоматично генерується візуалізація результатів, з використанням модуля QUICKPLOT (який діє в середовищі MATLAB як частина Delft 3D Mesh Suite).

На рис. 6-9 представлено результати застосування представленого підходу до наведених інформаційних технологій в рамках розробленої програмної складової.

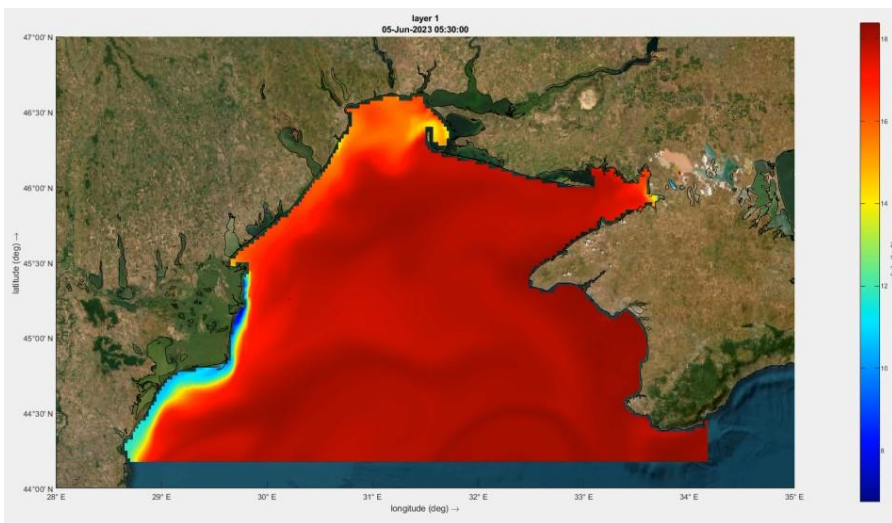


Рис. 6. Рівень солоності в північно-західній частині акваторії Чорного моря (5 червня 2023 р.)

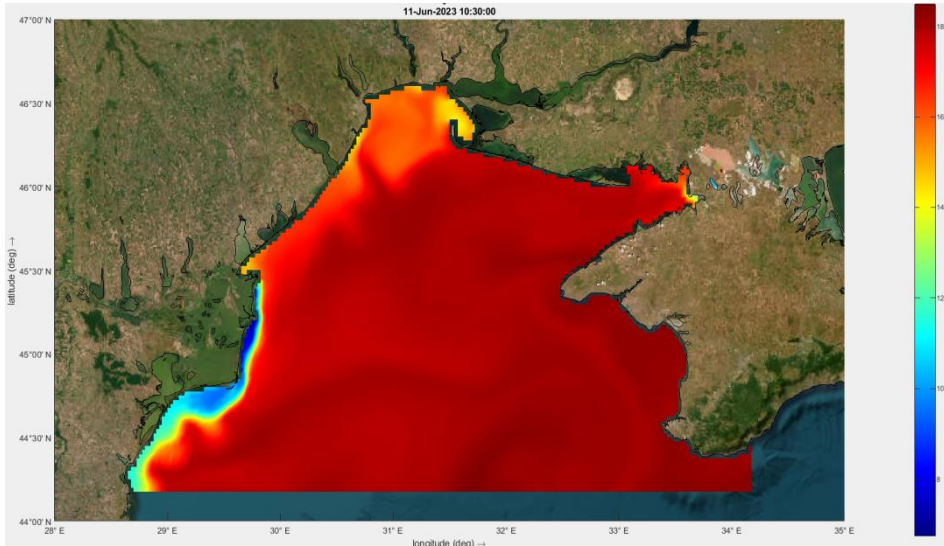


Рис. 7. Рівень солоності в північно-західній частині акваторії Чорного моря (11 червня 2023 р.)

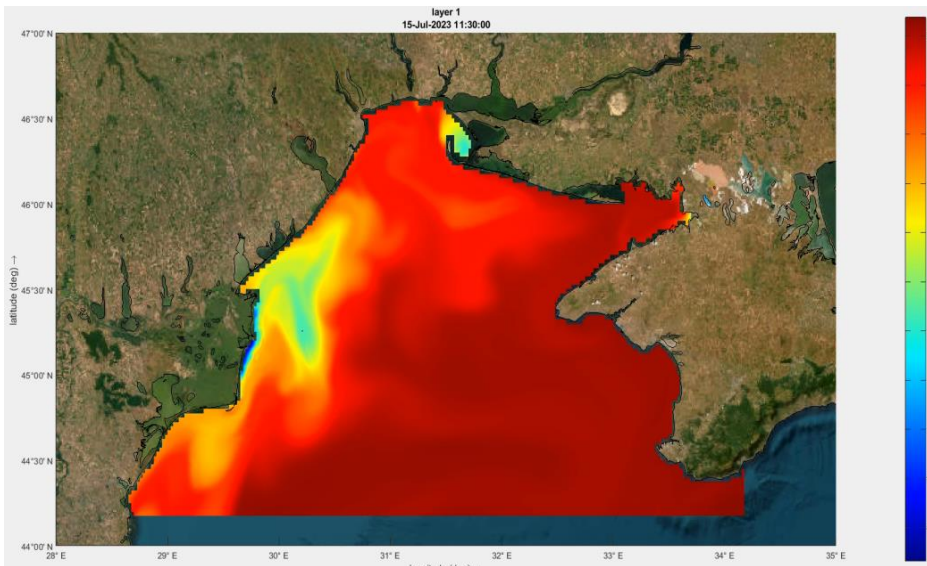


Рис. 8. Рівень солоності в північно-західній частині акваторії Чорного моря (15 липня 2023 р.)

Аналіз довгострокових даних показує короточасні зміни рівня солоності в акваторії біля естуарію Дніпра та в акваторії біля м. Одеса через 3-10 днів після руйнування дамби Каховської ГЕС. При цьому результати свідчать, що навіть одночасний викид величезних мас прісної води з Каховського водосховища у Чорне море не призвів до довгострокового зниження рівня солоності до показників, порівняних з природним чином опрісненою зоною акваторії в районі дельти Дунаю та о. Зміїний. Це може бути пов'язано як із фактором затоплення низинних територій Нижнього Подніпров'я, де «залишились» значні маси води з Каховського водосховища, так і з роботою функціонуючих

ГЕС Дніпровського каскаду, що оперативним чином припинили скид води одразу після катастрофи. Також сезонними факторами та роботою гідротехнічних споруд можна пояснити зниження солоності в зонах естуаріїв на рис. 8 (липень 2023 р.)

Отже, головною проблемою для екосистеми Чорного моря можна вважати не довгострокове зниження солоності, якого фактично не відбулося, а саме виніс забруднюючих речовин антропогенного походження. Дані моніторингу за червень 2022 р. показали, що більша частина об'єму дніпровської води рухалась вузькою смугою уздовж південного узбережжя Одеської та Миколаївської областей. Також моделювання циркуляції водних мас, виконані в розробленому авторами програмному середовищі, показують напрям та швидкість руху води, що в цілому збігаються з такими висновками (рис. 9). Відповідно, саме прибережна зона акваторії та приморська смуга суходолу Миколаївської та Одеської областей є найбільш постраждалими від техногенного забруднення внаслідок руйнування Каховської гідроелектростанції.

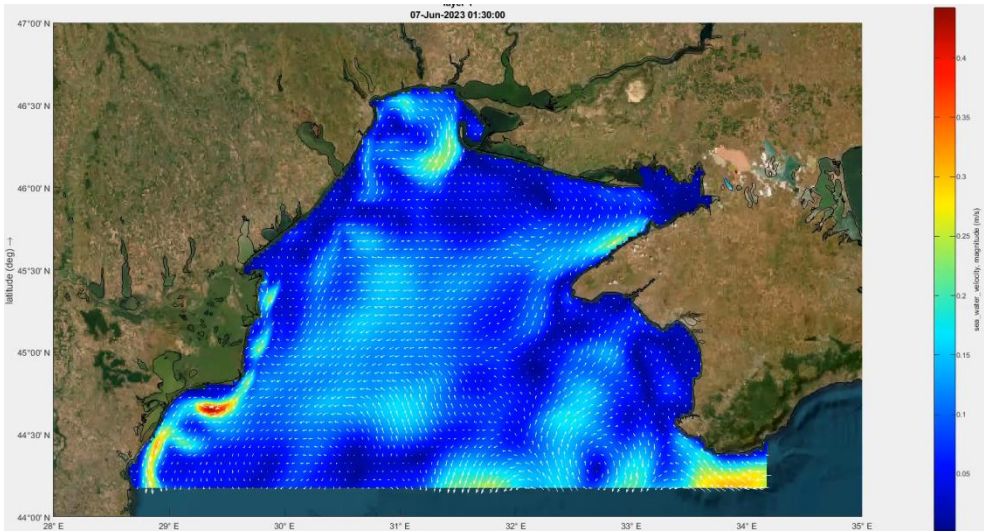


Рис. 9. Геомодель циркуляції водних мас в акваторії Чорного моря (7 червня 2023 р.)

## Висновки

В результаті проведених досліджень розглянуто важливі чинники екологічної небезпеки для акваторії Чорного моря та прибережних екосистем суходолу внаслідок руйнування Каховської гідроелектростанції та зникнення Каховського водосховища. Запропоновано та апробовано підхід із використання космічного моніторингу, геоінформаційних технологій та математичного моделювання для оцінки та прогнозування наслідків екологічної катастрофи, що відбулася. Із використанням розробленої програмної складової проаналізовано багатоденні масиви гідрофізичних та метеорологічних даних з акваторії Чорного моря, що в перспективі дає можливість проведення комплексної екологічної оцінки наслідків катастрофи для екосистеми Чорного моря та прибережних територій.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сучасні інформаційні технології екологічного моніторингу Чорного моря / [С.О. Довгий, Г.Я. Красовський, В.В. Радчук, О.М. Трофимчук та інші] // Під ред. С.О. Довгого. – К., 2010, 260 с.
2. Щипцов 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>
3. Вплив аварії на Каховській ГЕС на морську екосистему: оновлені дані від Українського національного центру екології моря [Електронний ресурс]. Режим доступу [https://sea.gov.ua/index.php/2023/07/17/new\\_data\\_ges\\_status\\_ukrscses/](https://sea.gov.ua/index.php/2023/07/17/new_data_ges_status_ukrscses/)
4. Щипцов О.А., Гордєєв А.Ю., Лебідь О.Г., Охарєв В.О., Теличко Р.І., Федосєєнков С.Г., Шундель О.І. Інформаційні технології в задачах автоматизації моделювання та прогнозування гідрофізичної обстановки в акваторії Чорного моря. *Екологічна безпека та природокористування*. 2023. Т. 45, № 1. С. 91–103. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.91-103>
5. Тучковенко Ю.С., Кушнір Д.В., Гончаренко Р.В., Титюк Т.Г., Щипцов 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.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)
7. 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>
8. Голодов М.Ф., Гордєєв А.Ю., Нестеренко Л.В., Тимченко Ю.А., Федосєєнков С.Г., Шундель О.І., Щипцов О.А., Щипцов 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., Федосєєнков С.Г., Щипцов О.А., Щипцов 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. Моніторинг навколишнього середовища з використанням космічних знімків супутника NOAA [О.М. Трофимчук, В.В. Радчук, Г.Я. Красовський] // Під ред. С.О. Довгого. – К., 2013, 316 с.
11. Щипцов 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 08.09.2023 і прийнята до друку після рецензування 06.12.2023

## REFERENCES

1. Dovhyi, S.O., Krasovskiy, H.Ya., Radchuk, V.V., & Trofymchuk, O.M. (2010). Modern information technologies of environmental monitoring of the Black Sea. S.O. Dovhyi (Ed.). Kyiv.
2. 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>
3. The impact of the Kakhovskaya HPP accident on the marine ecosystem: updated data from the Ukrainian National Center for Marine Ecology. Retrieved from: [https://sea.gov.ua/index.php/2023/07/17/new\\_data\\_ges\\_statsu\\_ukrscs/](https://sea.gov.ua/index.php/2023/07/17/new_data_ges_statsu_ukrscs/)
4. Shyptsov, O. A., Gordeev, A. Y., Lebid, O. H., Okhariev, V. O., Telychko, R. I., Fedoseienkov, S. H., & Shundel, O. I. (2023). Information technologies for automation of hydrophysical situation modelling and forecasting in the Black Sea region. *Environmental Safety and Natural Resources*, 45(1), 91–103. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.91-103>
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. (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)
7. 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>
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 the marine and river 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., Shchiptsov, O. A., & Shchiptsov, 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. Trofymchuk, O. M., Radchuk, V. V., & Krasovskiy, H. Y. (2013). Environmental monitoring using space images from the NOAA satellite. S.O. Dovhyi (Ed.). Kyiv [in Ukrainian].
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 08.09.2023 and was accepted after revision 06.12.2023*

### **Лебідь Олексій Григорович**

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

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

ORCID ID: <https://orcid.org/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:** Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6270-6293> **e-mail:** okhariev.vo@gmail.com

**Федосєнков Сергій Генадійович**

кандидат геологічних наук, заступник директора Державної установи «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України»

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

ORCID ID: <https://orcid.org/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: <https://orcid.org/0000-0002-3076-9553> **e-mail:** lixyta666@gmail.com

**Теличко Роман Ігорович**

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

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3574-7919> **e-mail:** roman.telychko@gmail.com

**Клименков Олег Анатолійович**

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

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7664-5225> **e-mail:** oleg@klymenkov.com