

УДК 504.4.054.001.5; 504.4.06.001.5, 504.4.054.001.5; 504.4.06.001.5, 504.45.058;
504.4.054; 504.064
КП 87.19.03
№ держреєстрації 0122U201787
Інв. №

МІНІСТЕРСТВО ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ ТА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ
НДУ “УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР ЕКОЛОГІЇ МОРЯ” (УКРНЦЕМ)
65009, м. Одеса, Французький бульвар, 89. тел. (094) 9468721
e-mail: accem@te.net.ua, www.sea.gov.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ

Виконуючий обов'язки директора
УкрНЦЕМ, заступник директора з
науки, канд. геогр. наук, старш. наук.
співроб.



Віктор КОМОРИН

« 28 »

2025 року

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

Оцінка та діагноз стану морського середовища України в межах виключної
морської економічної зони та уточнення критеріїв оцінки доброго екологічного
стану морських регіонів у 2024 р.

ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ ВОЄННИХ ДІЙ РФ
НА МОРСЬКЕ ДОВКІЛЛЯ УКРАЇНИ

Том 5

Науковий керівник НДР:
Виконуючий обов'язки директора УкрНЦЕМ,
заступник директора з науки,
канд. геогр. наук, старш. наук. співроб.

В.М. Коморін

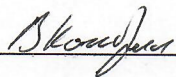
Рукопис закінчено 27 грудня 2024 р.

Результати роботи розглянуто Вченою Радою УкрНЦЕМ,
протокол № 9 від 27 грудня 2024 р.

СПИСОК АВТОРІВ

Відповідальний виконавець:

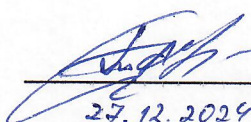
В. о. директора УкрНЦЕМ,
канд. геогр. наук,
старш. наук. співроб.



В. М. Коморін
(вступ, розділи 3, 4,
висновки)

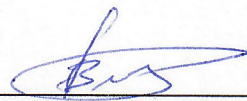
Виконавці:

В. о. нач. відділу аналізу
морських екосистем та
антропогенного навантаження –
нач. морського інформаційно-
аналітичного центру


_____ 27.12.2024

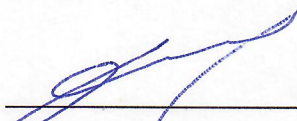
А. С. Тітяпкин
(вступ, розділ 1, 2
висновки)

В. о. нач. відділу
інформаційних систем


_____ 27.12.2024

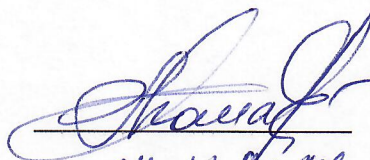
О. В. Лепьошкін
(розділ 2)

Нач. відділу фізичної
океанографії та математичного
моделювання


_____ 22. XII. 2024

Ю.М. Диханов
(розділ 1.1, 1.5)

Зав. сектором інформаційно-
аналітичної підтримки та
зв'язків з громадськістю


_____ 24.12.2024

Л. Г. Комарова
(загальна редакція)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 50 с., 43 рис., 16 джерел.

ЧОРНЕ МОРЕ В МЕЖАХ ВИКЛЮЧНОЇ ЕКОНОМІЧНОЇ ЗОНИ УКРАЇНИ,
СУПУТНИКОВІ ЗНІМКИ, НАФТОПРОДУКТИ, МАЗУТ, ТАНКЕР, МОДЕЛЮВАННЯ.

Об'єкт дослідження – морські води і екосистема Чорного моря в межах виключної морської економічної зони України.

Мета НДР – супутниковий моніторинг, модельний прогноз та оцінка впливу розливу нафтопродуктів на екосистеми прибережних територій морів України та морські екосистеми, який стався в результаті техногенної катастрофи танкерів Російської Федерації в Керченській передпротоці, які перевозили мазут для військових цілей.

Методи дослідження – в НДР використовувалися: традиційні методи аналітичного узагальнення даних, екологічні спостереження виконані УкрНЦЕМ за допомогою супутникових знімків та моделювання поширення нафтопродуктів, дані літературних джерел.

Результати дослідження – Супутниковий моніторинг оперативного виявлення районів забруднення нафтопродуктами морських акваторій, яке сталося в результаті катастрофи двох танкерів «Волгонефть-212» та «Волгонефть-239» 15 грудня 2024 р., проводився переважно за допомогою радіолокаційних зображень, отриманих з супутника Sentinel-1 програми Copernicus Європейського космічного агентства, угруповання німецького супутника TerraSAR-X та іспанського PAZ. Прогноз розповсюдження забруднення нафтопродуктами виконувався за допомогою моделювання. Для цього використовувалася система NOAA GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment). Згідно з отриманими супутниковими знімками та результатами моделювання плями нафтопродуктів (мазуту) під впливом метеорологічних і гідродинамічних факторів досягли кавказького узбережжя (від мису Панагія до м. Анапа), Керченської протоки, прибережних зон східного узбережжя Криму. Виявлено, що переважаючі течії та напрямки вітру сприяють дрейфу плям у північно-східному напрямку. На момент завершення

роботи над звітом за поточними прогнозами, узбережжя Одеської області перебуває поза загрозою забруднення мазутом у найближчий тиждень.

Для оцінки екологічного впливу та контролю за поширенням забруднення буде продовжуватись регулярний моніторинг супутникових знімків, аналіз отриманих даних моделювання, а також будуть враховуватись повідомлення зі ЗМІ. Цей комплекс заходів спрямований на забезпечення своєчасного реагування та розробку стратегій для мінімізації наслідків забруднення в чорноморському регіоні.

Катастрофа російських танкерів 2024 року має серйозні екологічні наслідки, що вимагають комплексного підходу до їх ліквідації та відновлення біорізноманіття. Впровадження сучасних технологій очищення та реабілітації є ключовим для мінімізації шкоди та запобігання майбутнім катастрофам.

ЗМІСТ

	С.
Перелік умовних позначень і скорочень	5
Вступ.....	6
1 Аналіз супутникових знімків	9
1.1 Методи виявлення розливів нафтопродуктів в морі	9
1.2 Аналіз отриманих супутникових знімків	11
2 Моделювання перенесення нафтопродуктів у Чорному морі.....	19
2.1 Опис моделі GNOME та початкових даних для моделювання ...	19
2.2 Результати моделювання розповсюдження нафтопродуктів	21
2.3 Прогнозування поширення нафтопродуктів іноземними фахівцями по моделі MEDSLIK	37
3 Оцінка впливу нафтопродуктів на морське середовище.....	41
4 Моделі довгострокового прогнозування впливів аварійних ситуацій ..	45
Висновки	48
Перелік джерел посилання.....	49

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

GNOME	–	модель короткострокового прогнозування переносу нафтових плям (General NOAA Operational Modeling Environment)
NOAA	–	Національне управління океанічних і атмосферних досліджень (National Oceanic and Atmospheric Administration)
GOODS	–	Онлайн-сервер, що містить бібліотеку фізико-хімічних характеристик забруднюючих речовин (GNOME Online Oceanographic Data Server)
GFS	–	Глобальна система чисельного прогнозування погоди (Global Forecast System)
FNMOС	–	Центр чисельної метеорології і океанографії флоту, містить дані про морські течії (Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center)

ВСТУП

Внаслідок збройної агресії Російської Федерації збитки Україні завдаються в результаті впливу воєнних дій на екосистеми прибережних територій морів України, морські екосистеми та на функціонування морегосподарського комплексу України.

Вплив на прибережні території здійснюється в результаті наступних дій:

- 1) розміщення і переміщення військових частин і техніки на прилеглий території;
- 2) будівництво фортифікаційних споруд;
- 3) бомбардування, обстріли, вибухи;
- 4) розміщення (накопичення) на прилеглий території відходів (в тому числі залишків військової техніки), тіл померлих, тіл загиблих тварин, забруднюючих та небезпечних речовин, боєприпасів;
- 5) мінування прилеглих територій;
- 6) підпали та пожежі;
- 7) хімічне та/або радіаційне забруднення, у тому числі таке, що виникло внаслідок руйнування та/або аварій на комунальних, промислових, сільськогосподарських, інших об'єктах, спричинене воєнними діями.

Факторами впливу на морське довкілля є:

- надходження біогенних та токсичних речовин з наземних джерел та з атмосфери;
- надходження мікробіологічного забруднення з наземних джерел;
- надходження сміття з наземних джерел;
- фізичні втрати;
- шумове забруднення.

Безпосередній вплив на морські екосистеми здійснюється в результаті:

- 1) маневрування військових суден;

- 2) запуску ракет з суден та підводних човнів (скиди горючого палива (газів), у т.ч. невдалі запуски ракет, що залишилися в морі);
- 3) затоплення суден в результаті воєнних дій;
- 4) затоплення боєприпасів із радіоактивними та/або хімічно активними складовими;
- 5) забруднення уламками літаків та ракет, збитих над морською поверхнею;
- 6) радіоактивне забруднення морського довкілля підводними човнами з ядерними установками (небезпеку становлять як компоненти відпрацьованого ядерного палива, так і радіаційно забруднені корпуси атомних підводних човнів, утилізація яких здійснюється за високою вартістю);
- 7) мінування акваторій;
- 8) постріли, вибухи;
- 9) дія суднових радарів (зокрема, підводних човнів).

Факторами впливу на морське довкілля в результаті визначених дій є:

- надходження нафтопродуктів та інших токсичних речовин
- надходження біогенних речовин
- надходження радіоактивних речовин
- завдання шкоди окремим морським організмам та пошкодження морських біоценозів;
- надходження сміття;
- постійне (фонове) шумове забруднення;
- гостре шумове забруднення (зокрема, акустичні травми китоподібних).

Серед усіх подій від збройної агресії РФ у 2024 р. потрапляння нафтопродуктів у море в результаті аварії двох танкерів під час шторму 15 грудня «Волгонефть-212» та «Волгонефть-239», що перевозили мазут для військових цілей РФ, вже має і буде мати критичні наслідки для морських екосистем.

1. АНАЛІЗ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ

1.1 Методи виявлення розливів нафтопродуктів в морі

Одним з найефективніших методів оперативного виявлення розливів нафтопродуктів у морі є дистанційне зондування Землі з космосу. Цей метод і застосовується для моніторингу забруднення продуктами нафтового походження морських акваторій з використанням радіолокаційних зображень з європейського супутника Sentinel-1 програми Copernicus [1] Європейського космічного агентства, а також угруповання німецького супутника TerraSAR-X та іспанського супутника PAZ [2].

Методи детектування нафтових забруднень по радіолокаційним знімкам умовно можна поділити на три основні групи:

- методи, які засновані на експертній оцінці, по суті це візуальний аналіз знімку оператором із залученням набору критеріїв відповідності;
- інтерактивні методи, що полягають у попередній автоматизованій обробці знімку і його подальший аналіз оператором;
- автоматизовані методи, тобто виконувані модулі чи програмні засоби, які автоматично розпізнають нафтові плями без участі оператора.

З метою створення узагальненої карти розповсюдження забруднення, що сталося внаслідок аварії танкерів в районі Керченської протоки, на даний час спеціалістами УкрНЦЕМ триває робота по збору інформації про забруднення мазутом акваторій і узбережжя Чорного та Азовського морів, експертним методом попередньо визначаються місця забруднення за допомогою супутникових знімків. Зібрана на даний момент інформація зі знімками надається в наступному пункті розділу. Для реалізації вказаної мети може бути застосований алгоритм детектування нафтових розливів [3].

Процедура виявлення плями забруднення трудомістка, потребує значних комп'ютерних ресурсів, але не гарантує автоматичного виділення сліку, навіть якщо його явно видно на супутниковому знімку.

Умовно, виявлені сліки – зони вигладжування морської поверхні, що на радіолокаційних знімках відображаються більш контрастними областями чорного кольору на фоні звичайної водної поверхні сірого кольору – можна поділити на три класи:

- сліки, що виникли за рахунок морських явищ (причинами можуть бути: внутрішні хвилі, вихрові структури, апвелінг, початок льодоутворення, тощо);
- сліки, що виникли за рахунок атмосферних процесів (штилеві зони, вітрові тіні вздовж берегів, дощові комірки, гравітаційні хвилі, тощо);
- сліки, що утворені речовинами, здатними змінювати сили поверхневого натягу. Це плівки різних органічних сполук, в тому числі нафтовмісних продуктів, плівки поверхнево-активних речовин, плівки біологічного походження (біогенні плівки), і плівки синтетичних поверхнево-активних речовин.

З метою класифікації сліків аналізуються гідрометеорологічні умови (швидкість та напрям вітру, швидкість та напрям течій, льодовий режим), відповідні даті знімку батиметричні дані, форма і розміри сліку, дані по нафтовій інфраструктурі, тощо.

Вітер, як основний генератор хвилювання на морі, відіграє істотну роль при аналізі виявлених сліків. При малих швидкостях вітру (2-5 м/с) сліки формують самі тонкі плівки, які легко переносяться течіями. Вони зазвичай існують у виді довгих (десятки – сотні кілометрів), часто викривлених або спіральних смуг. Існує складність в розпізнаванні нафтових сліків в зонах великого скупчення біогенних плівок.

Також, важливо розглядати слік з точки зору його лінійних розмірів (довжина, ширина), площадних характеристик, форми, контрасту і типу границі (пероподібна, чітка, розмита).

1.2. Аналіз отриманих супутникових знімків

15 грудня 2024 року біля Керченської протоки зі сторони Чорного моря під час сильного шторму зазнали аварії російські танкери «Волгонефть-212» і «Волгонефть-239», які сумарно перевозили близько 9000 тон мазуту. Внаслідок аварії сталося масове забруднення нафтопродуктами Керченської протоки, прибережної акваторії Чорного моря до м. Анапа та узбережжя Криму. Корпус танкера "Волгонефть-212" на сильному хвилюванні (висота хвиль до 3-4 м) і вітрі до 20 м/с, переломився в районі міделя і його частини затонули. Танкер «Волгонефть-239» отримав аналогічні ушкодження, носова частина затонула, а кормова частина деякий час дрейфувала і сіла на мілину біля мису Панагія (мис на південно-західному краю Таманського півострова в межах Темрюцького району Краснодарського краю РФ). Частину, що сіла на мілину, добре видно на супутникових знімках за 16 та 18 грудня (рис. 1.1, 1.2).



Рисунок 1.1 – Супутниковий знімок Pléiades 16.12.2024 р. (08:32 UTC)
(<https://data.oneatlas.airbus.com/>)



Рисунок 1.2 – Супутниковий знімок Sentinel-2 18.12.2024 р. (08:37 UTC)
[\(https://browser.dataspace.copernicus.eu/\)](https://browser.dataspace.copernicus.eu/)

Перші радіолокаційні зображення супутника Sentinel-1, отримані 18 та 19 грудня 2024 року показали, що витoki нафтопродуктів (мазуту) походять від затонулих під час шторму частин танкера «Волгонефть-212» і носа танкера «Волгонефть-239». Плями мають витягнуту форму і поширюються під впливом дрейфових течій, викликаних сильним спочатку північно-західним вітром, а пізніше південним/південно-східним вітром (рис. 1.3, 1.4).

Аналіз знімків показує, що 18 грудня (рис. 1.3) при сильному північно-західному вітрі (на що вказують вітрові смуги) мазут від танкера «Волгонефть-212» та його фракції утворили відносно довгу і витягнуту пляму, що поширюється на схід до Бугазької коси. Довжина плями становила близько 10 км, площа – 2,5-3,0 кв. км.



Рисунок 1.3 – Супутниковий знімок Sentinel-1 18.12.2024 р.

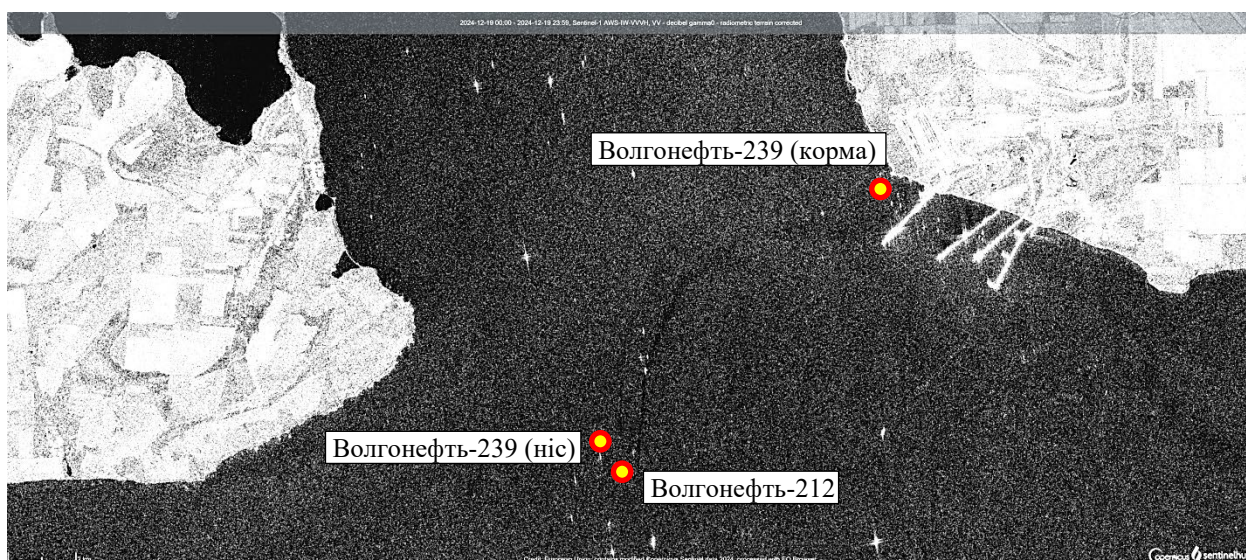


Рисунок 1.4 – Супутниковий знімок Sentinel-1 19.12.2024 р. та ймовірні місцезнаходження затонулих частин танкерів

19 грудня 2024 року (рис. 1.4) при помірному південному вітрі, що посилювався, знімок показав два джерела забруднення: затонулий ніс танкера «Волгонефть-239» і затонулий танкер «Волгонефть-212» (від якого йде більш чітка пляма), відстань між ними приблизно 1,3 км. Довжини плям на обох рисунках становлять близько 10 км. Мазут у вигляді скупчення агрегатів починає виносити в Керченську протоку. Навпроти Бугазької коси спостерігається велика, довга і широка темна пляма, яка утворилася в результаті дрейфу мазуту під дією дрейфових течій у попередні дні при

сильному західному/північно-західному вітрі (рис. 1.5). В Анапській бухті відзначаються витягнуті темні плями, які можна однозначно проінтерпретувати як скупчення плівок мазуту або його агрегатів. На супутниковому знімку за 19 грудня 2024 р. (рис. 1.5) довжина плями мазуту складає близько 35 км (зображено зеленим кольором).

Крім того, з рисунка 1.4 можна приблизно визначити наступні координати місцезнаходження затонулого танкера «Волгонефть-212» – Lat: 45.0586 Lon: 36.5386, носу танкера «Волгонефть-239» – Lat: 45.0700 Lon: 36.5328, а також місцезнаходження корми танкера «Волгонефть-239» – Lat: 45.1389 Lon: 36.6403. Координати потребують уточнення.

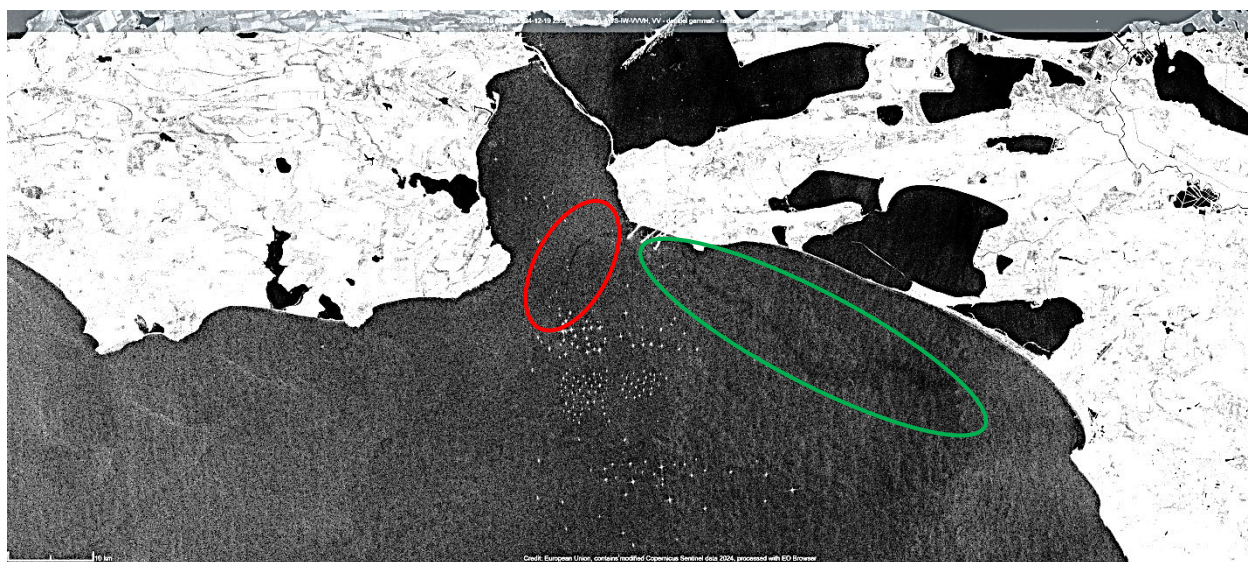


Рисунок 1.5 – Супутниковий знімок Sentinel-1 19.12.2024 р.

20 грудня 2024 р. іспанським супутником PAZ отримано знімок, на якому видно поширення нафтового забруднення на північ в Керченську протоку (рис. 1.6) під дією південного/південно-східного вітру, швидкістю 8 м/с.

21 грудня 2024 р. німецьким супутником TerraSAR-X зроблено знімок біля Керченської протоки (рис. 1.7). Характерні плями поширення забруднення виявлено біля Керченської протоки та в самій протоці. Крім того, на даному зображенні виявлено три джерела виходу нафтопродуктів (мазуту), ймовірні місцезнаходження затонулих частин танкерів вказано на рисунку 1.7.

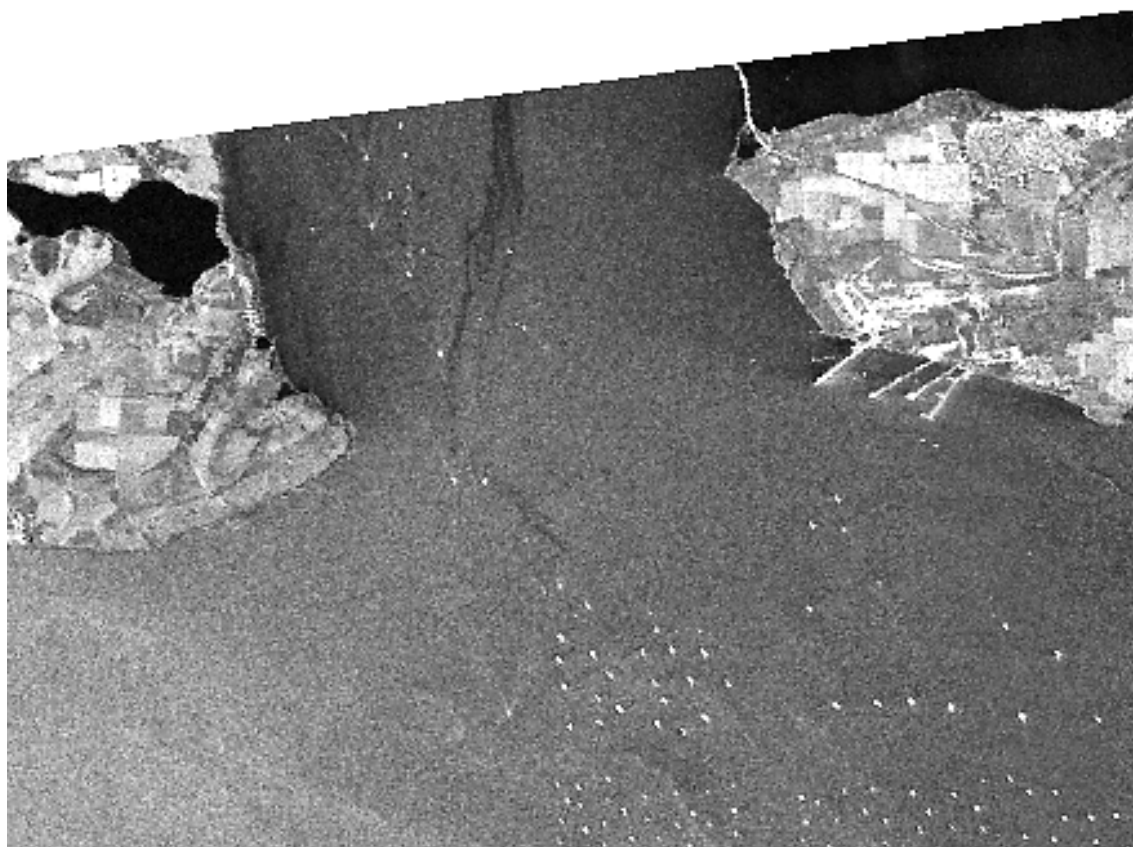


Рисунок 1.6 – Супутниковий знімок PAZ 20.12.2024 р.

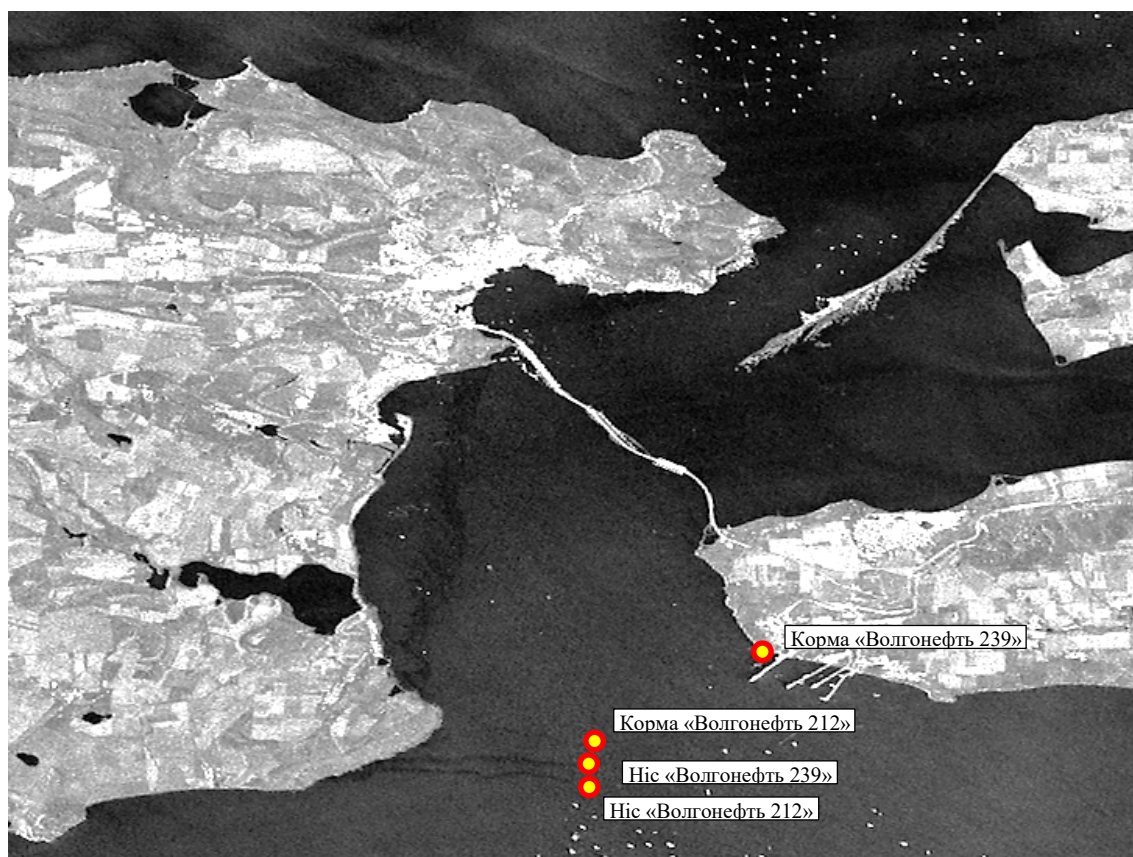


Рисунок 1.7 – Супутниковий знімок TerraSAR-X 21.12.2024 р.

23 грудня 2024 р. супутником Sentinel-1 в районі Керченської протоки зроблено знімок, на якому можна побачити багато сліків (рис. 1.8, червоні стрілки), що розповсюджуються на схід від узбережжя Керченського півострова.

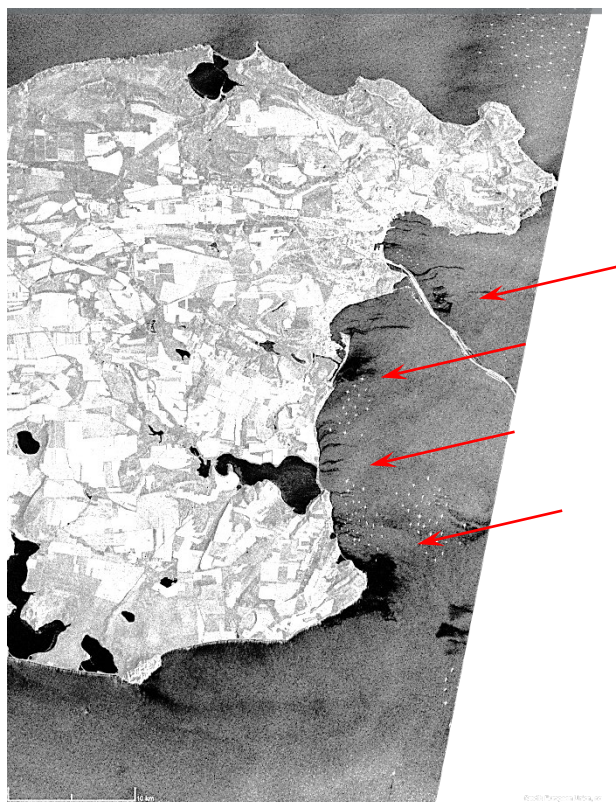


Рисунок 1.8 – Супутниковий знімок Sentinel-1 23.12.2024 р.

За інформацією різних ЗМІ, насамперед телеграм-каналів (наприклад, «Крымский ветер»), стверджується, що виявлені плями – це власне мазут. Проте, стверджувати, що ці плями створені тільки нафтопродуктами не можливо, оскільки подібні сліки можуть виникати і за рахунок морських явищ (причинами можуть бути: внутрішні хвилі, вихрові структури, апвелінг, тощо), атмосферних процесів (штилеві зони, вітрові тіні вздовж берегів, дощові комірки, гравітаційні хвилі, тощо).

Також, за інформацією телеграм-каналу «Крымский ветер» в Чорному морі стався масовий викид дельфінів на берег Краснодарського краю. Виявлено 8 мертвих азовок, проте зовнішніх слідів нафтопродуктів на тілах не виявлено.

За інформацією іншого телеграм-каналу «Украинский Крым» біля берега поблизу Новоросійська зафіксовано 11 випадків загибелі дельфінів після розливу нафтопродуктів. Крім того, виявлено більше 700 постраждалих птахів, 143 з яких врятувати не вдалось.

23 грудня 2024 р. іспанським супутником PAZ в 03:44 UTC отримано знімок в районі Керченської протоки (рис. 1.9).

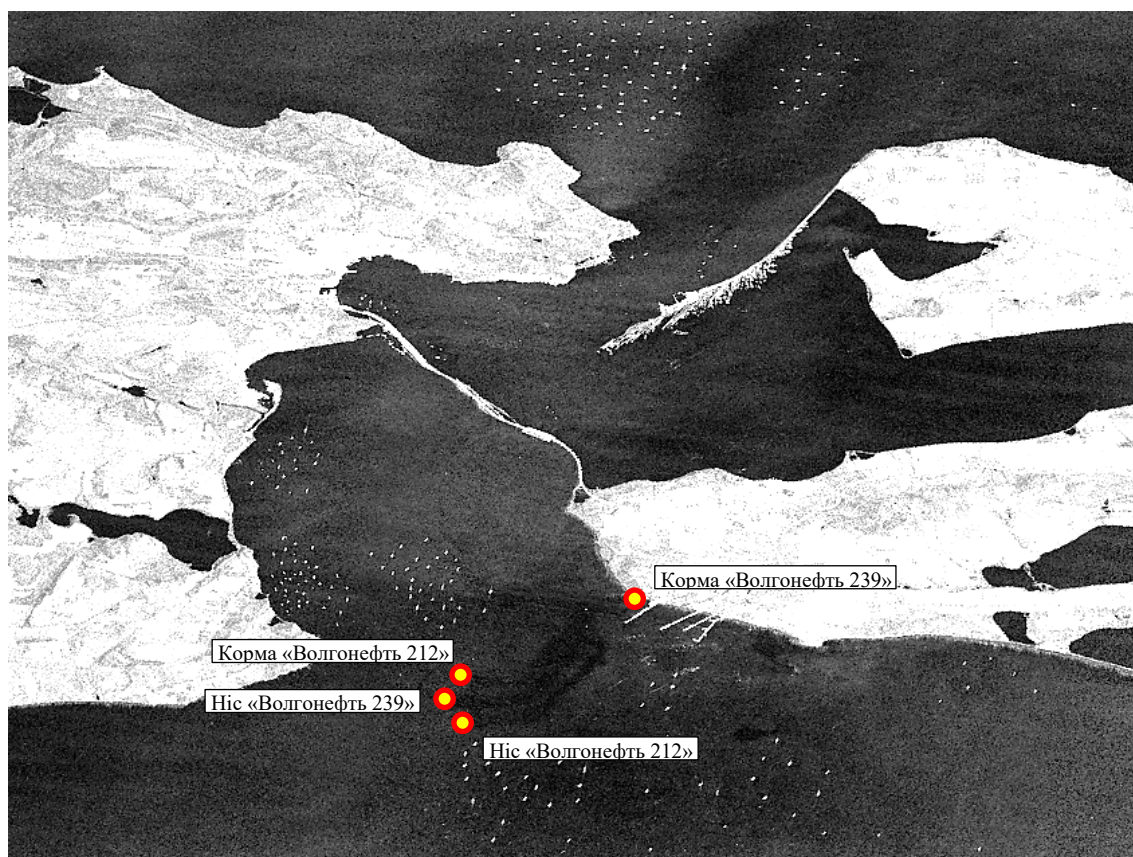


Рисунок 1.9 – Супутниковий знімок PAZ 23.12.2024 р. та ймовірні місцезнаходження затонулих частин танкерів

На даному знімку видно три чітких плями, що поширюються в напрямку Таманського півострова. За припущеннями російських ЗМІ це ніс і корма танкерів «Волгонефть-212» та ніс «Волгонефть-239» (рис. 1.9). Схожі три сліди видно й на попередньому супутниковому знімку TerraSAR-X від 21.12.2024 р. (рис. 1.7). Точні координати частин танкерів досі не відомі.

На знімках, отриманих 25 та 27 грудня 2024 р. (рис. 1.10, 1.11), плям забруднення виявлено не було. Спостереження будуть продовжуватись.

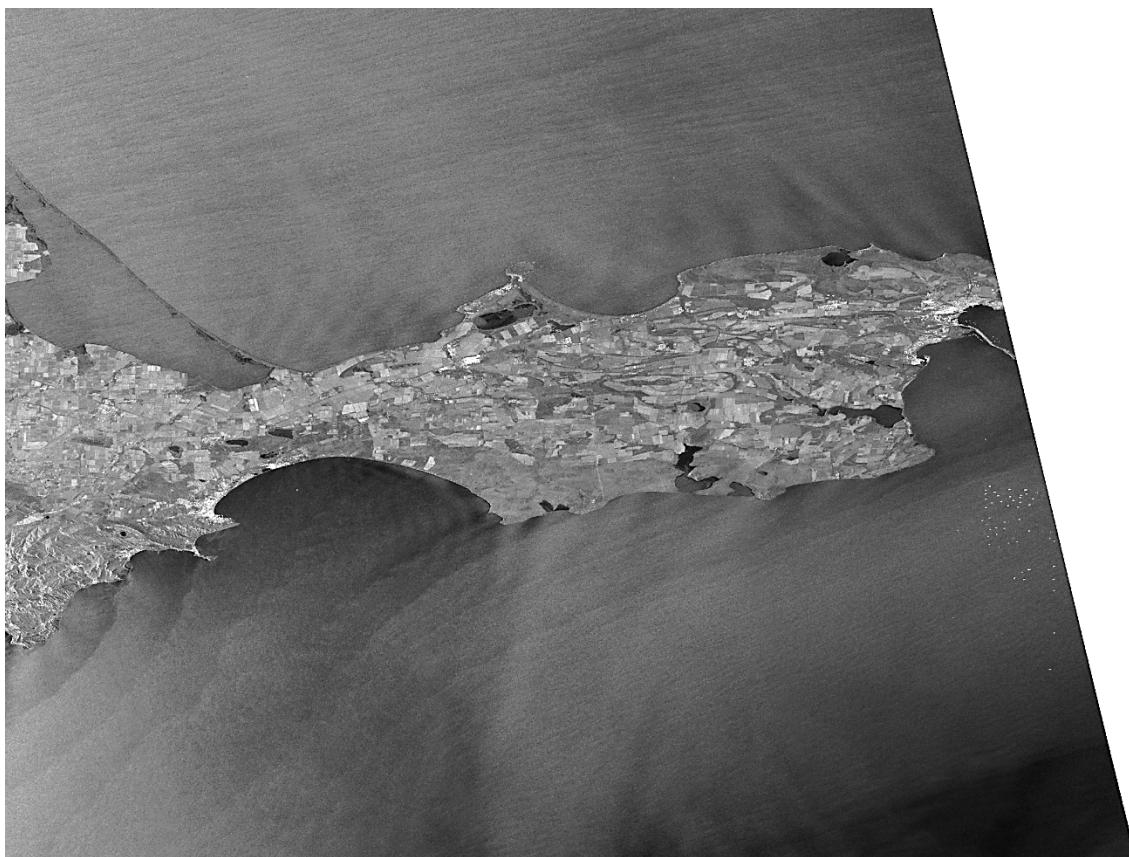


Рисунок 1.10 – Супутниковий знімок PAZ 25.12.2024 р.

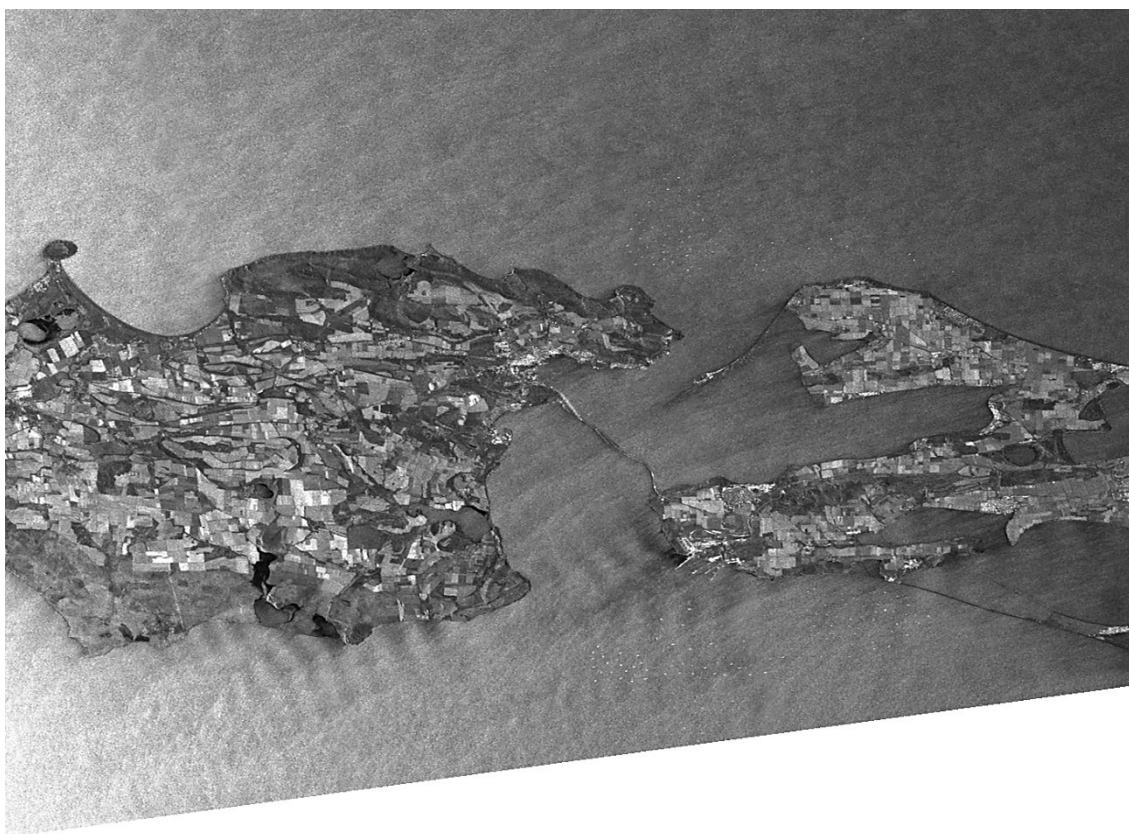


Рисунок 1.11 – Супутниковий знімок TerraSAR-X 27.12.2024 р.

2. МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕНЕСЕННЯ НАФТОПРОДУКТІВ У ЧОРНОМУ МОРІ

2.1. Опис моделі GNOME та початкових даних для моделювання

Для короткострокового прогнозування переносу нафтових плям у морських акваторіях широко використовується модель GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment), розроблена NOAA [4].

GNOME – це інструмент, призначений переважно для моделювання поверхневої поведінки та перенесення забруднюючих речовин у воді. Для підвищення точності прогнозів GNOME враховує такі параметри, як солоність води, її температуру, а також концентрацію завислих частинок.

GNOME отримує необхідні дані для моделювання з GOODS (GNOME Online Oceanographic Data Server) – онлайн-сервера, який містить велику бібліотеку фізико-хімічних характеристик забруднюючих речовин. Ці дані дозволяють моделювати поведінку розливу з урахуванням зовнішніх факторів, таких як температура води, температура повітря та інші параметри навколишнього середовища.

Для прогнозування вітрових умов GNOME використовує дані з Global Forecast System (GFS), моделі прогнозування погоди від NOAA/NCEP із просторовою роздільною здатністю 13 км. Дані про морські течії надаються Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center (FNMOC) із роздільною здатністю 1/12 градуса, що дозволяє точніше враховувати рух води.

Для коректного моделювання потрібні точні вихідні дані: місце і час аварії, тип і об'єм речовини, що потрапила у воду, або швидкість її витікання з танків судна. У цьому випадку обидва танкери, імовірно, належали до так званого «тіньового флоту» РФ, оскільки їхні системи AIS (Automatic Identification System) були вимкнені. Це унеможливило точне визначення їхнього місцезнаходження в момент аварії. Додатково, через те, що місце аварії

знаходиться в зоні, недосяжній для України з низки відомих причин, точно оцінити масштаб аварії не вдавалось можливим.

Попри брак вихідних даних, модель GNOME змогла спрогнозувати траєкторію поширення розливу. У перші дні після аварії вона передбачила, що мазут буде винесений на берегову лінію поблизу Анапи. Це дало фахівцям орієнтир для оцінки можливих наслідків аварії навіть за відсутності повної картини подій.

Підтвердженням точності роботи моделі GNOME також стали радіолокаційні супутникові знімки Sentinel-1, TerraSAR-X та PAZ. Ці знімки чітко зафіксували напрямок руху розливу, що збіглося з прогнозованою траєкторією моделі. Водночас важливо враховувати, що жодна модель, зокрема GNOME, не може забезпечити 100 % точності прогнозування. Вона вказує ймовірну зону, де розлив може досягти берегової лінії. Ця інформація потрібна для того, щоб місцева влада та служби оперативного реагування могли заздалегідь підготуватися до ліквідації можливих наслідків аварії.

GNOME дозволяє моделювати траєкторії поширення нафтопродуктів у морському середовищі, що особливо ефективно для аналізу впливу аварійних розливів на чутливі екосистеми. Beegle-Krause (2001) [5] підкреслює, що GNOME забезпечує базову траєкторію поширення нафти, яка може бути вдосконалена шляхом інтеграції супутникових даних для підвищення точності прогнозів.

Lehr et al. (2000) [6] досліджують вплив фізичних процесів, таких як циркуляція Лангмюра, на поширення нафти та демонструють важливість використання супутникових радарних даних, зокрема Sentinel-1, для корекції прогнозів моделі GNOME.

Zhang et al. (2021) [7] підтверджують ефективність GNOME для моделювання розливів на великих відстанях у поєднанні з супутниковим моніторингом, що дозволяє оцінити вплив забруднень на чутливі екологічні зони.

Fingas (2018) [8] акцентує увагу на важливості інтеграції моделей типу GNOME із сучасними супутниковими методами для підвищення точності оцінки зон поширення нафтових плям, особливо в умовах складної гідрометеорологічної обстановки.

Для моделювання використовувалися вхідні дані сіткових полів морських течій, отримані з моделі RTOFS (Real-Time Ocean Forecast System), та атмосферних вітрів, надані моделлю GFS (Global Forecast System). Початкові параметри розливу задавалися відповідно до часу інциденту, а прогнозні розрахунки здійснювалися на період 48 годин. Такий часовий інтервал забезпечує прийнятний рівень точності, тоді як прогнози на довший період супроводжуються підвищеною невизначеністю через складність врахування змін гідрометеорологічних умов.

Класифікація нафтопродуктів, що потрапили у воду, базувалася на даних вбудованої бази NOAA GNOME. Це дозволило врахувати фізико-хімічні властивості нафтопродуктів, такі як випаровуваність, здатність до емульгування, розчинність та інші характеристики, які суттєво впливають на динаміку поширення та трансформацію речовини у морському середовищі.

2.2. Результати моделювання розповсюдження нафтопродуктів

Розглядалися два сценарії потрапляння нафтопродуктів в море від затонулих частин суден на півдні Керченської затоки. На рисунках 2.1-2.6 представлені результати моделювання розповсюдження нафтопродуктів при їх миттєвому потрапленні в море в залежності від гідрометеорологічних умов. На рисунках 2.7-2.16 представлені результати моделювання розповсюдження нафтових плям при безперервному потрапленні нафтопродуктів в море. За отриманими згодом радіолокаційними супутниковими знімками підтверджено другий сценарій. Обидва моделювання доводять, що в перші дні мазут

поширювався на схід до узбережжя від Таманського півострова до м. Анапи. Пляма мазуту, що дійшла до прибережної смуги 17 грудня, так і залишилась у цьому районі. Але, при безперервному потраплянні нафтопродуктів в море (другий сценарій) відбувається забруднення кримського узбережжя та Керченської протоки, що пізніше було підтверджено супутниковими знімками. Ці два прогнози зроблено на перші 7 діб, до 22 грудня 2024 р.

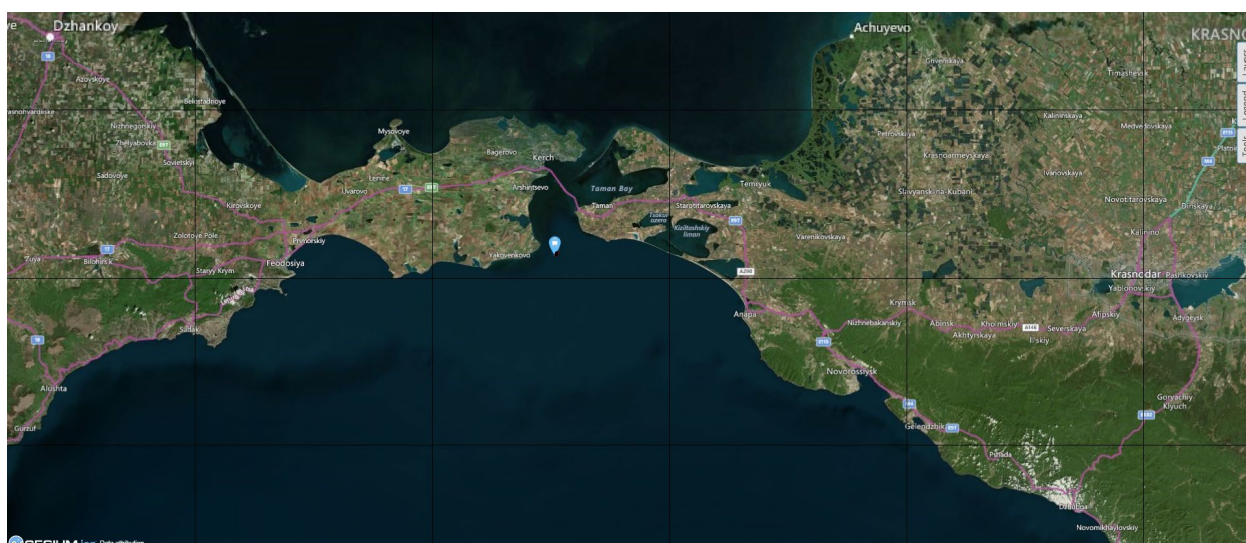


Рисунок 2.1 – Ймовірне місце аварії судна (15.12.2024 12:00)

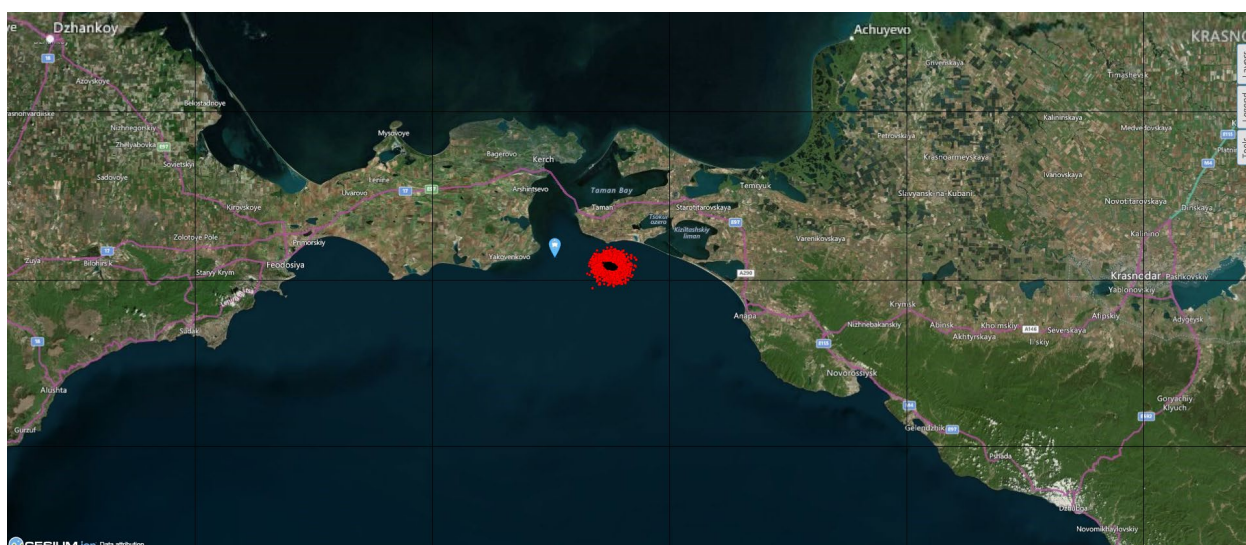


Рисунок 2.2 – Рух плями мазуту на схід південніше Таманського півострову (16.12.2024 05:00)

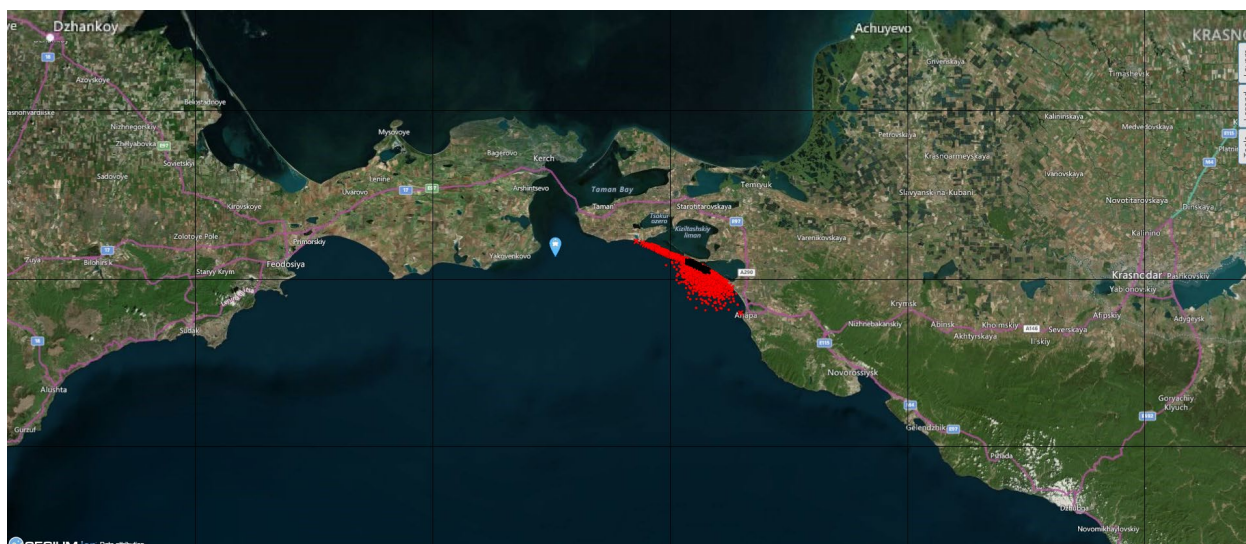


Рисунок 2.3 – Зміна траєкторії руху плями на південний схід в напрямку м. Анапа (17.12.2024 00:00)

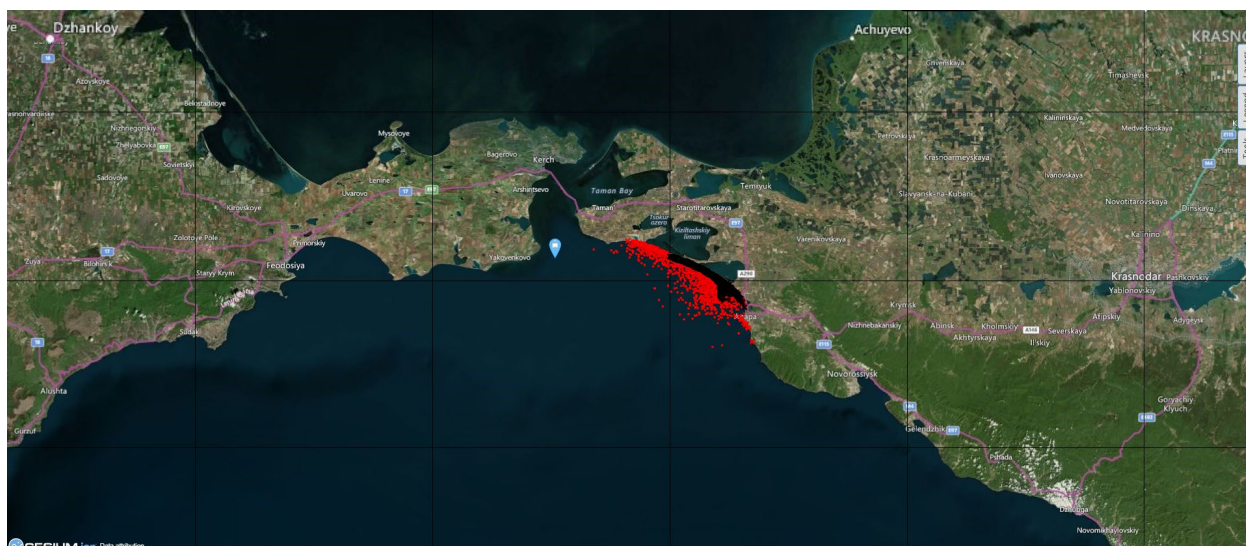


Рисунок 2.4 – Забруднення прибережної смуги від Таманського півострова до м. Анапа (17.12.2024 20:30)

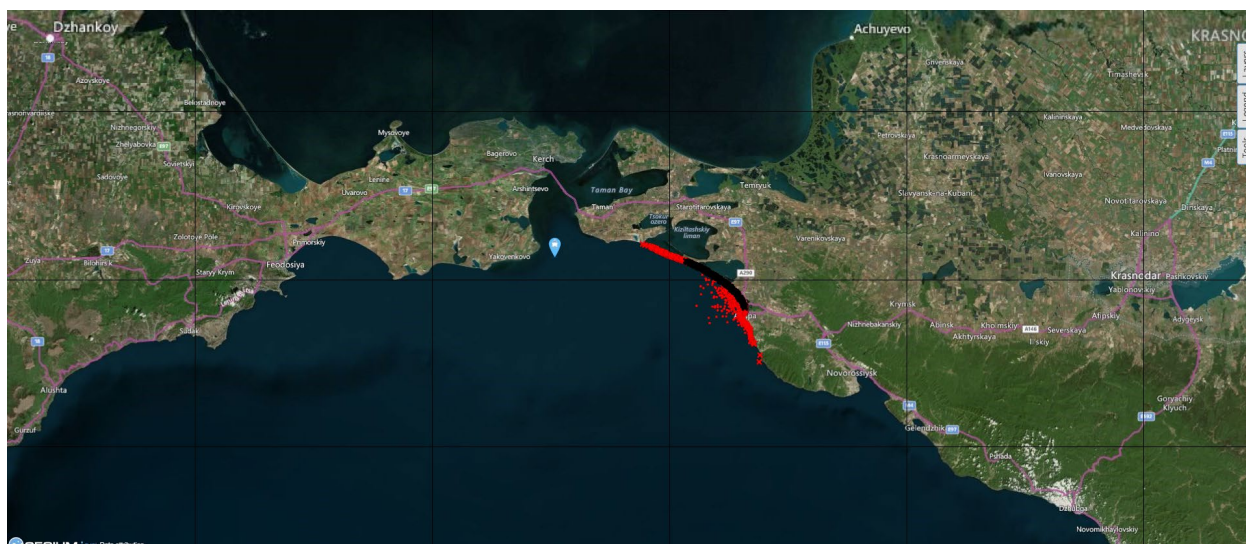


Рисунок 2.5 – Забруднення мазутом залишається вздовж прибережної смуги від Таманського півострова до м. Анапа (20.12.2024 04:30)

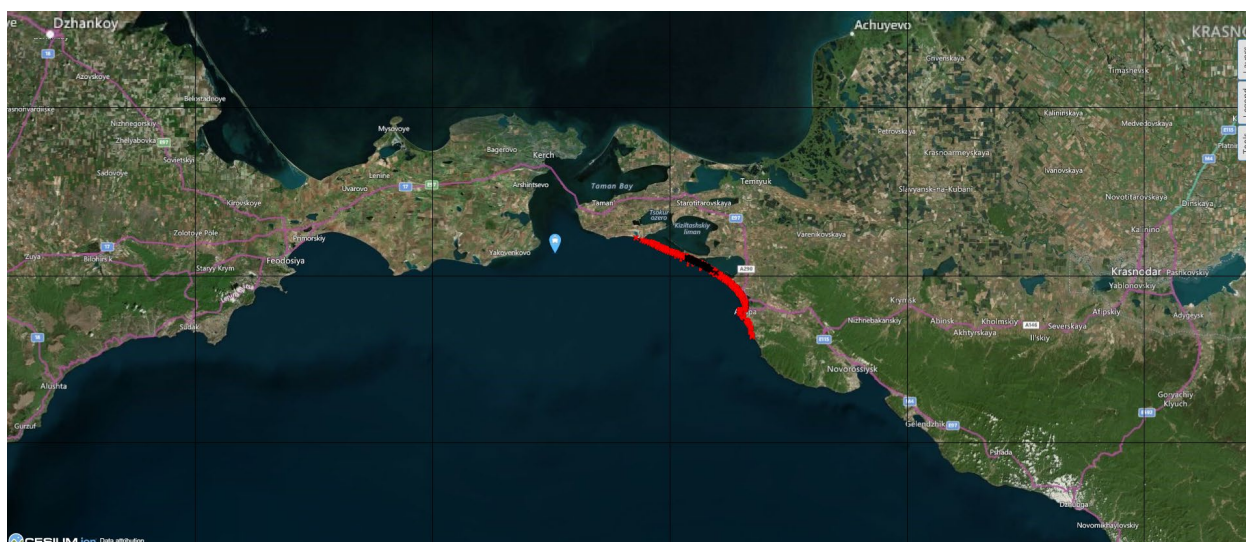


Рисунок 2.6 – Завершення програми моделювання руху плями мазуту (22.12.2024 12:00).

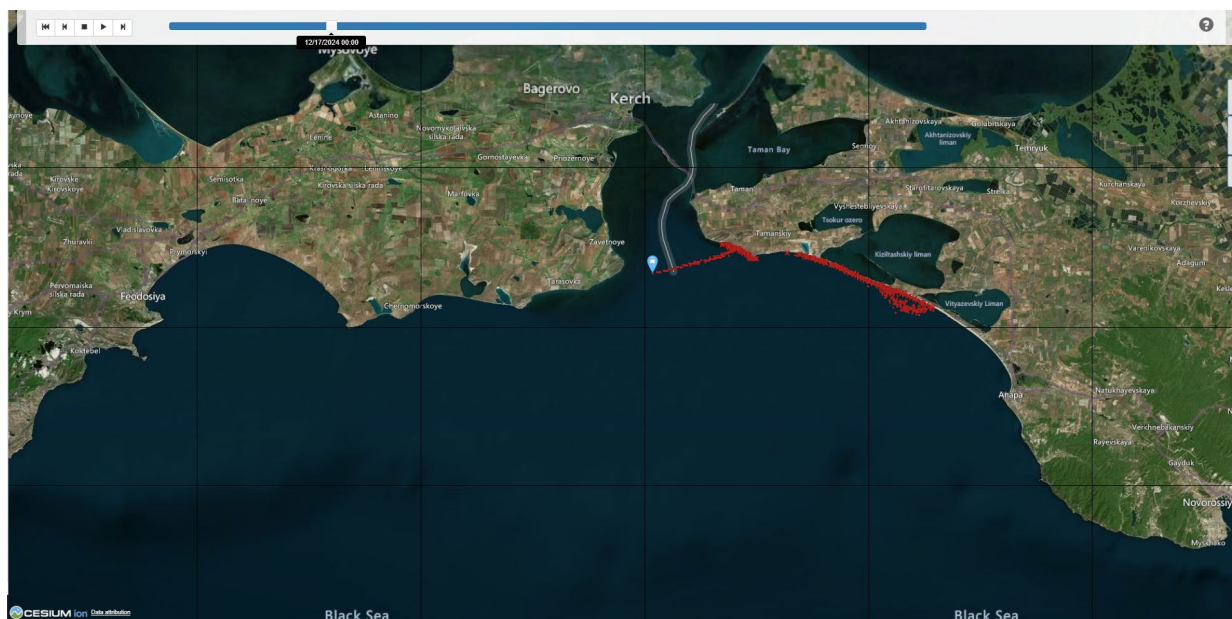


Рисунок 2.7 – Забруднення мазутом станом на 17.12.2024 00:00

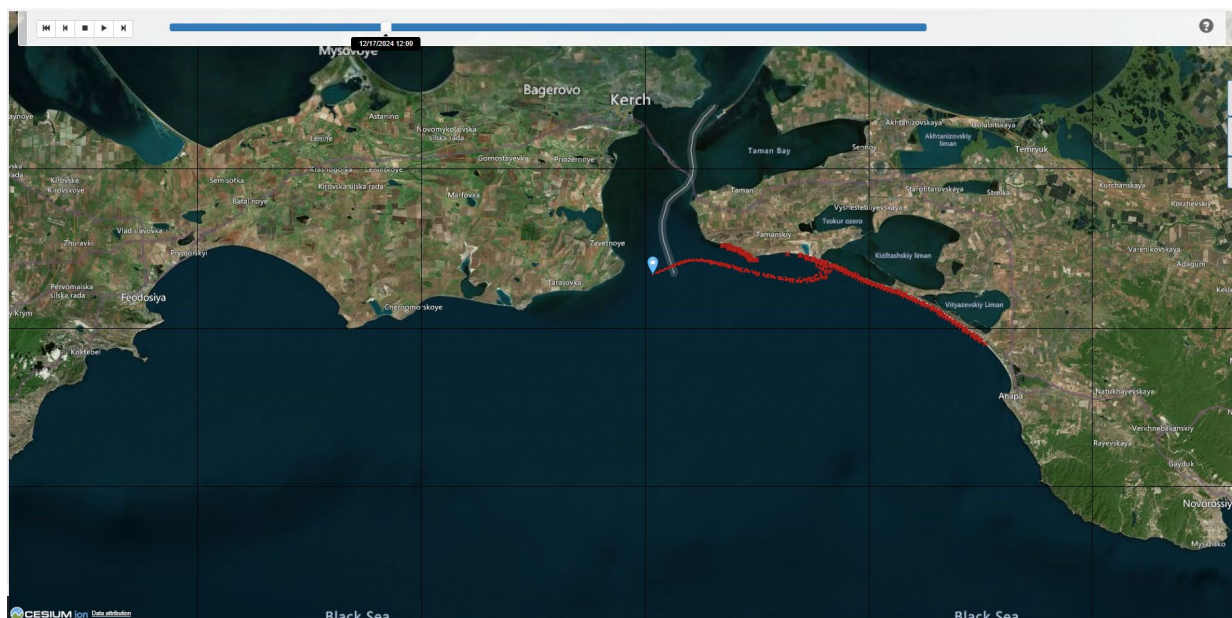


Рисунок 2.8 – Забруднення мазутом станом на 17.12.2024 12:00

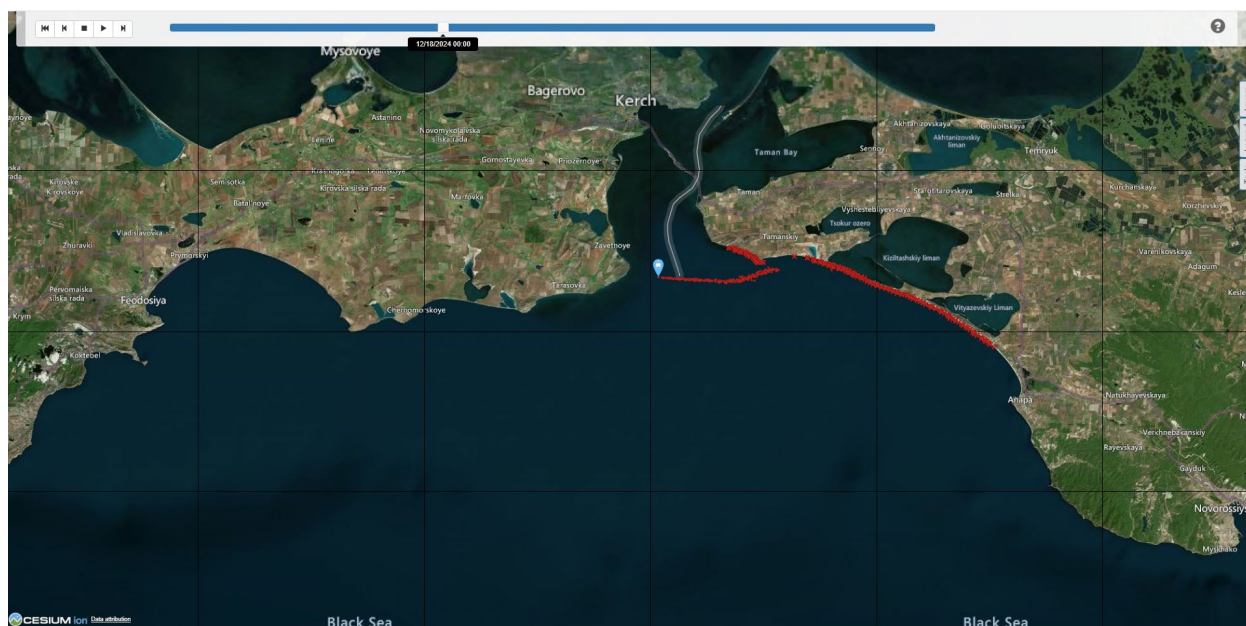


Рисунок 2.9 – Забруднення мазутом станом на 18.12.2024 00:00

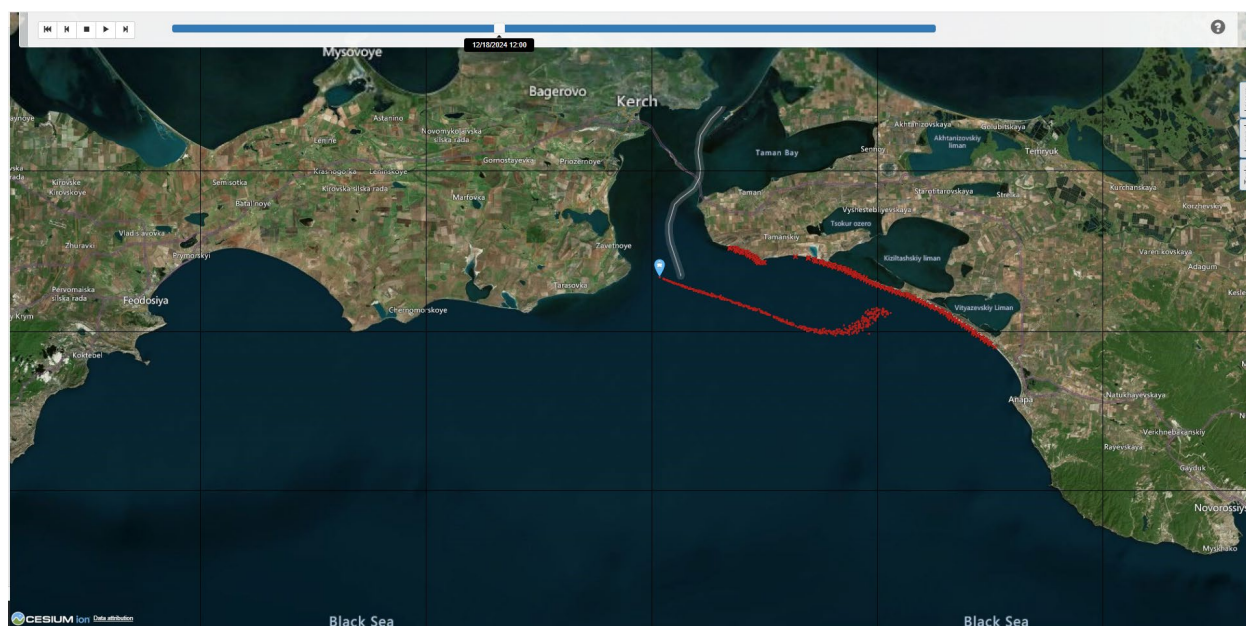


Рисунок 2.10 – Забруднення мазутом станом на 18.12.2024 12:00

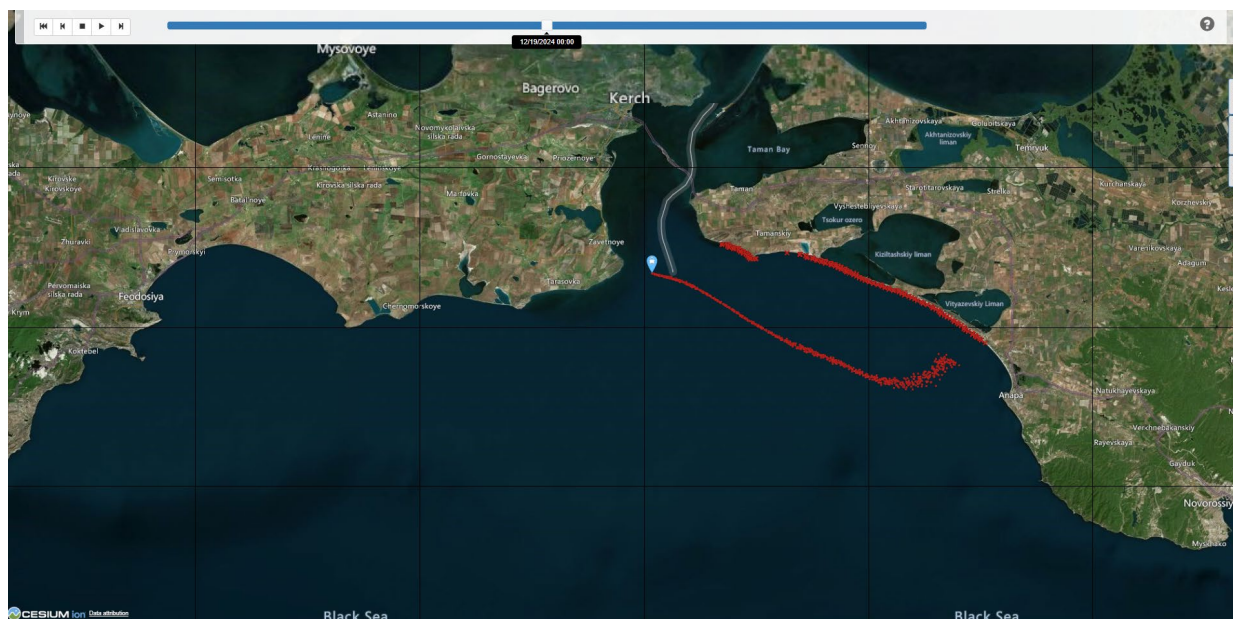


Рисунок 2.11 – Забруднення мазутом станом на 19.12.2024 00:00

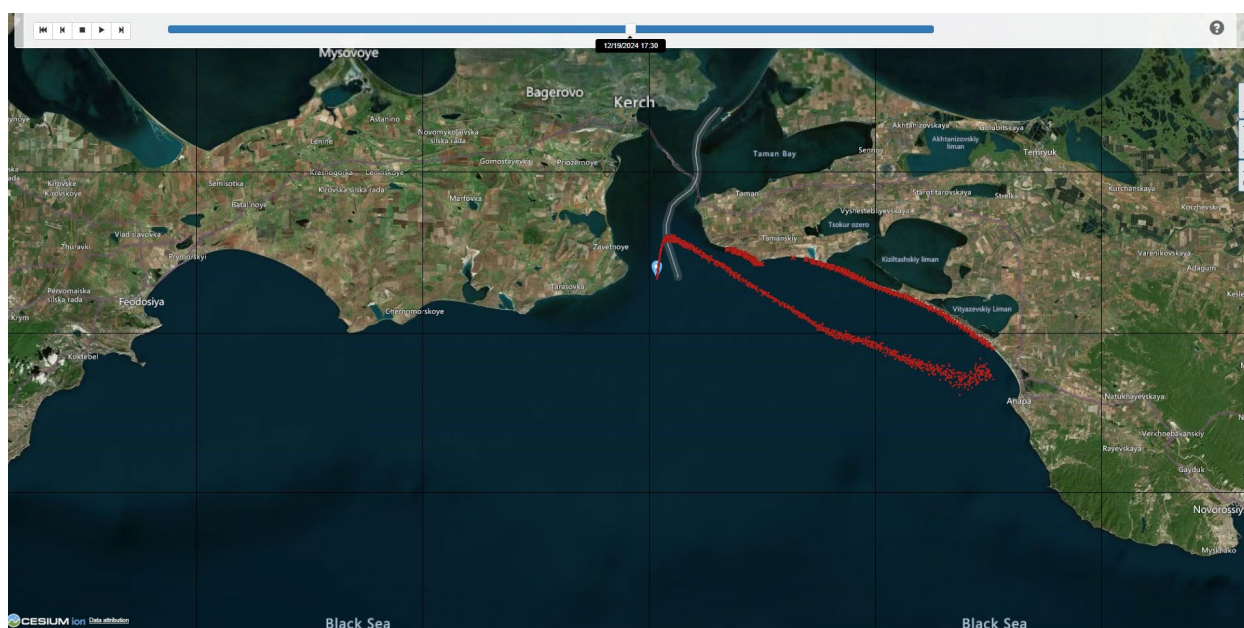


Рисунок 2.12 – Забруднення мазутом станом на 19.12.2024 17:30

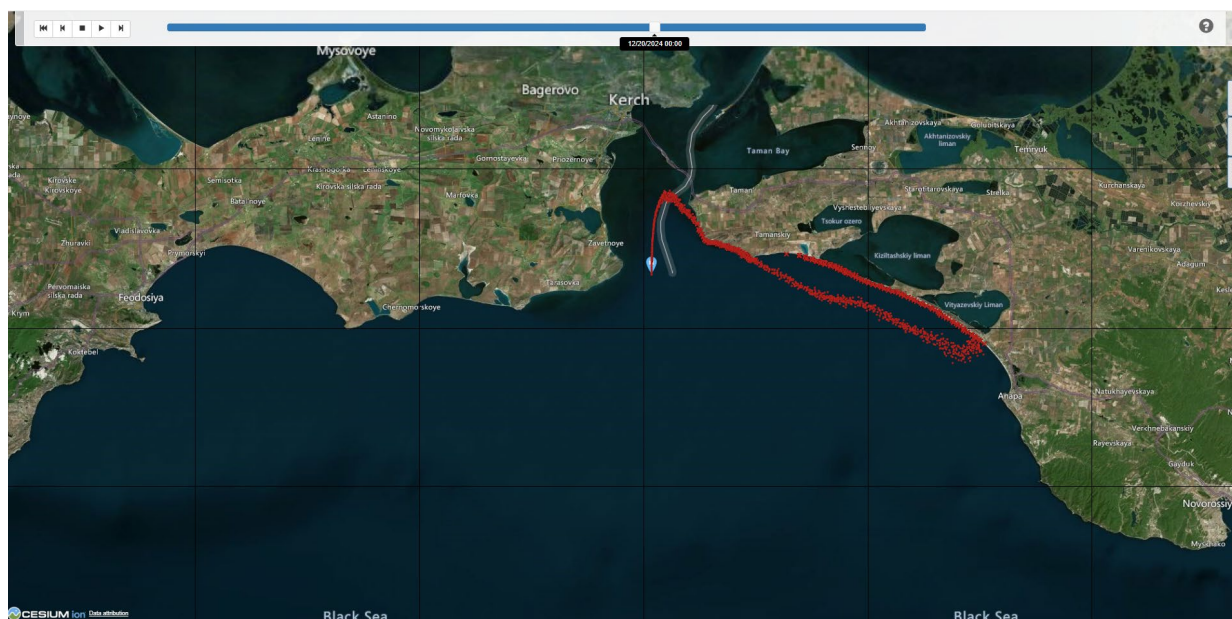


Рисунок 2.13 – Забруднення мазутом станом на 20.12.2024 00:00

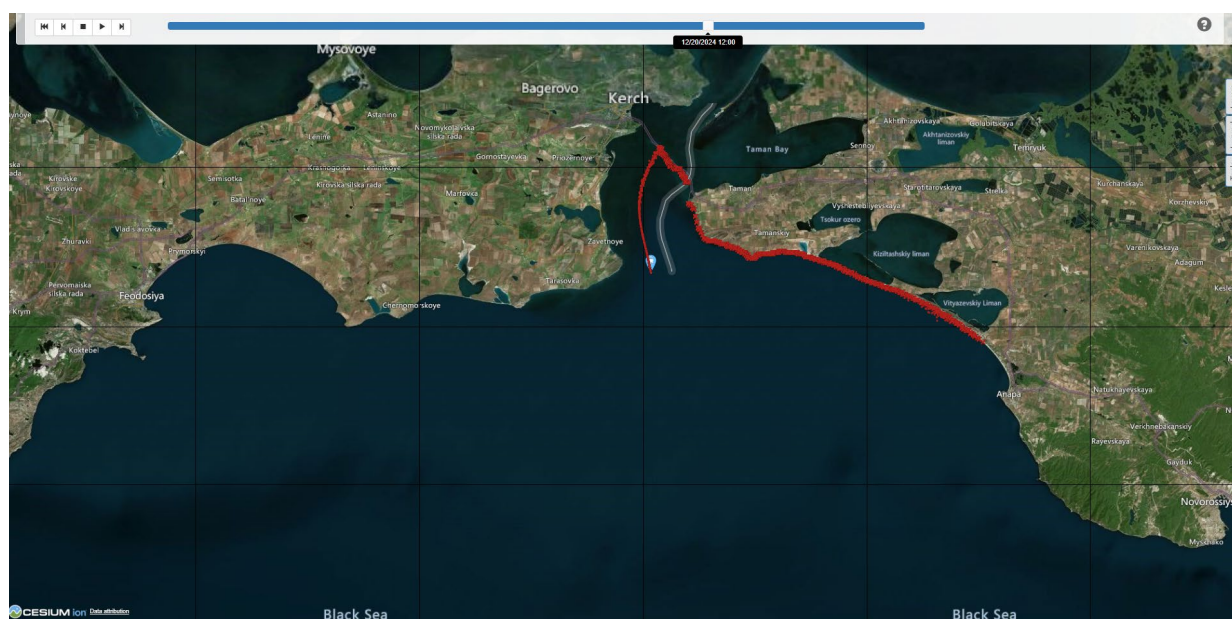


Рисунок 2.14 – Забруднення мазутом станом на 20.12.2024 12:00

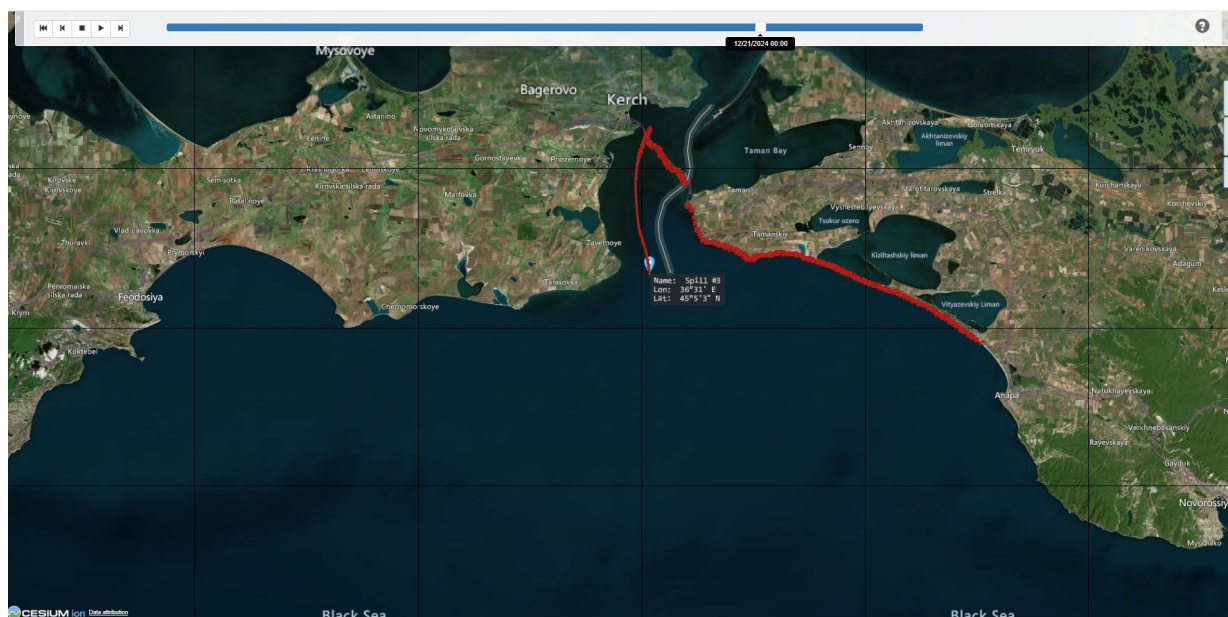


Рисунок 2.15 – Забруднення мазутом станом на 21.12.2024 00:00

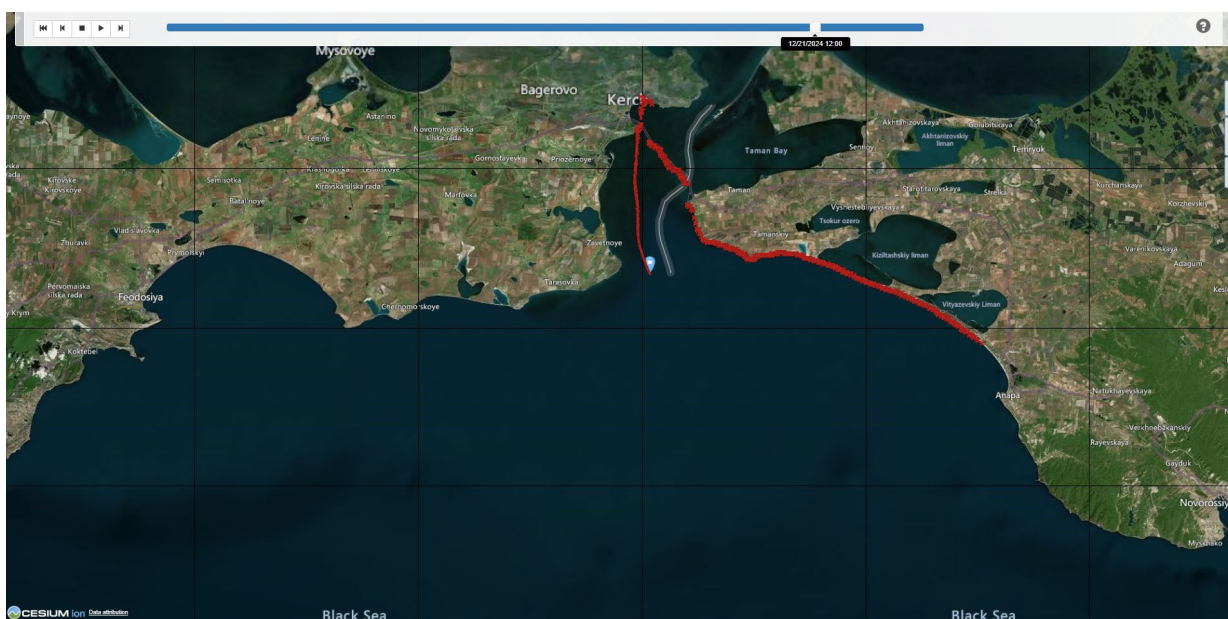


Рисунок 2.16 – Забруднення мазутом станом на 21.12.2024 12:00

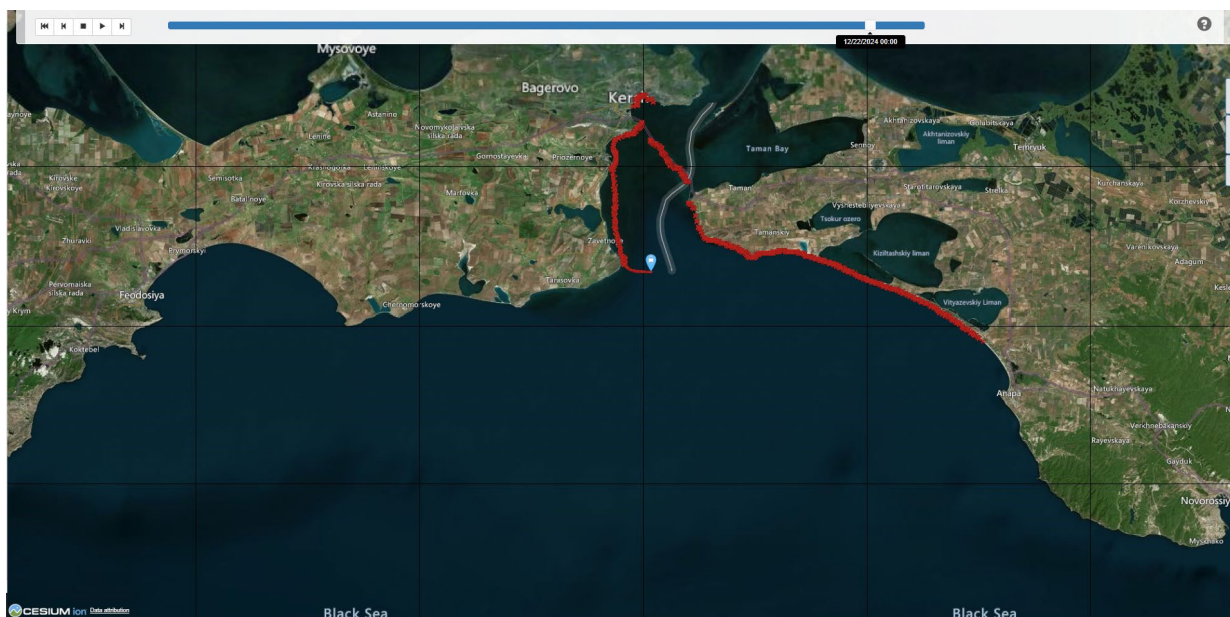


Рисунок 2.17 – Забруднення мазутом станом на 22.12.2024 00:00

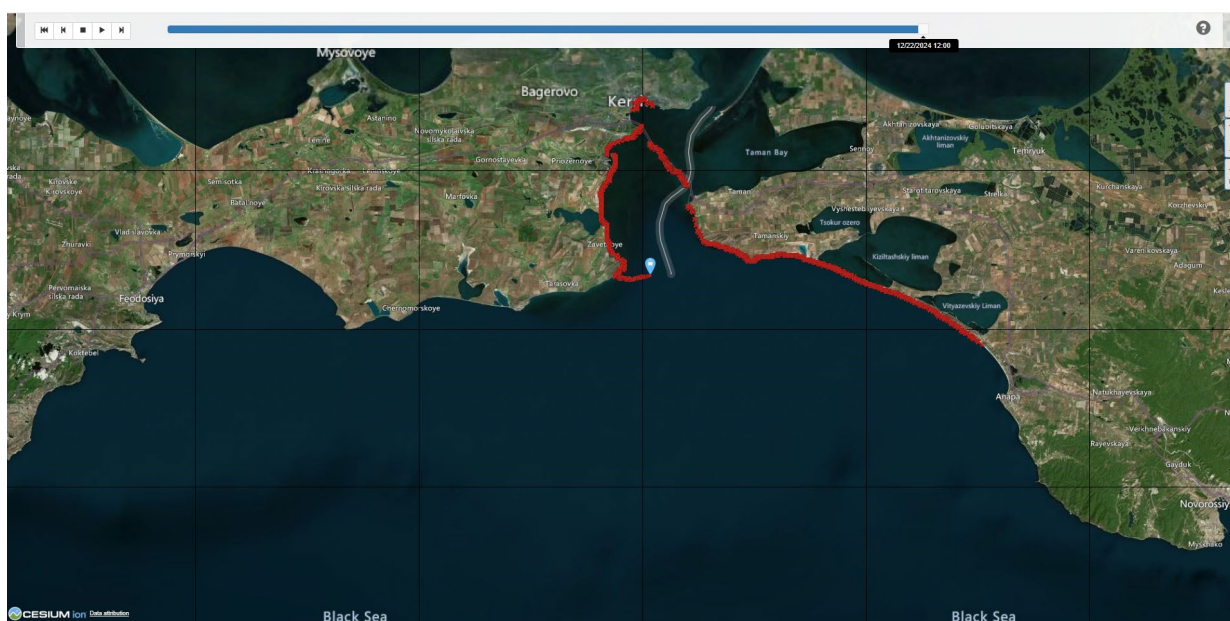


Рисунок 2.18 – Забруднення мазутом станом на 22.12.2024 12:00

З метою прогнозу подальшого розповсюдження нафтопродуктів моделювання було продовжено на максимально можливий на даний момент термін з 23 грудня 2024 р. до 03 січня 2025 р.

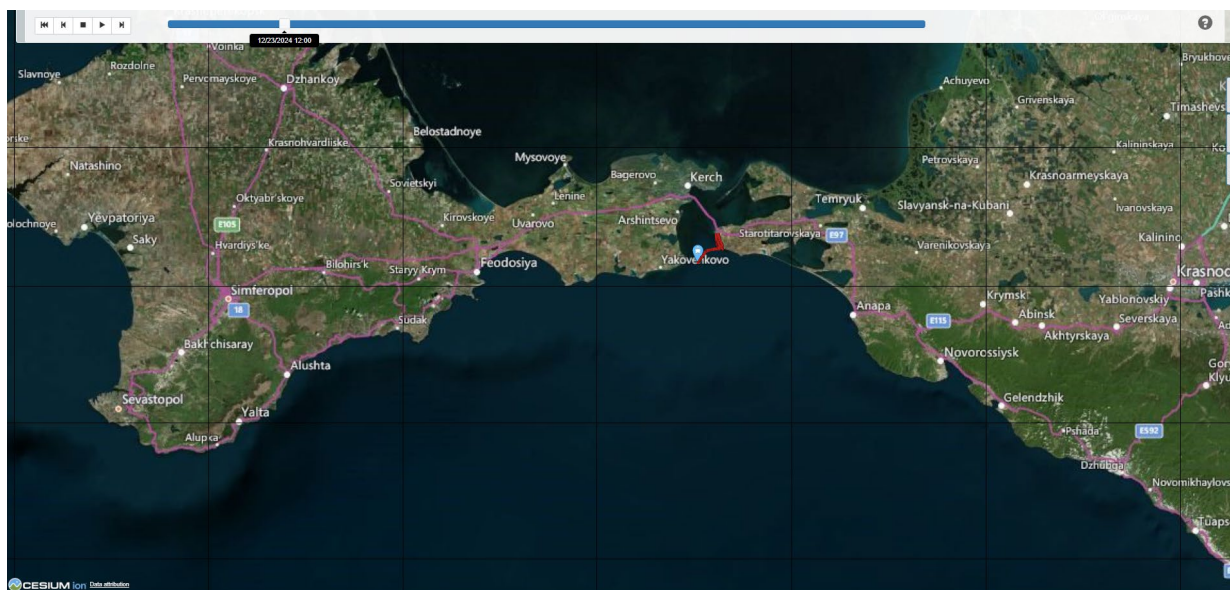


Рисунок 2.19 – Забруднення мазутом станом на 23.12.2024 12:00

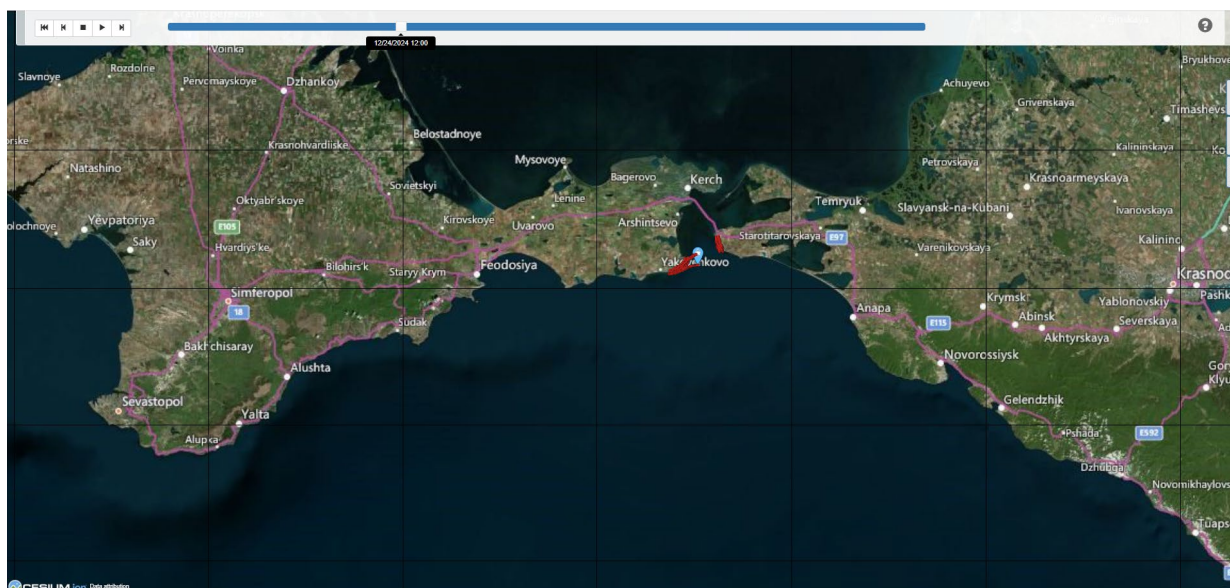


Рисунок 2.20 – Забруднення мазутом станом на 24.12.2024 12:00

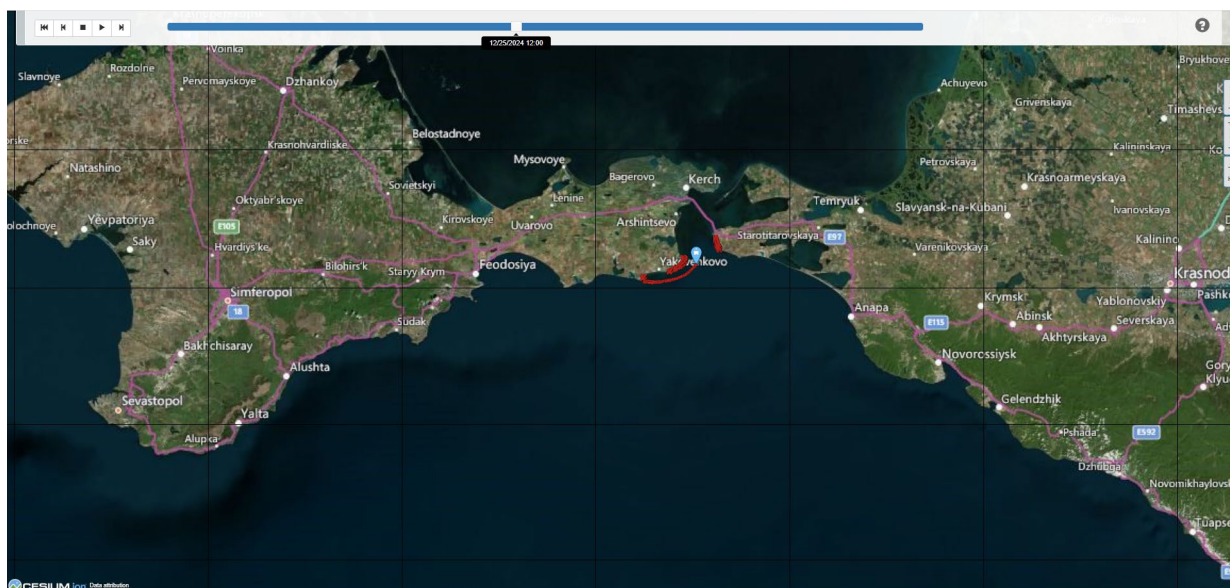


Рисунок 2.21 – Забруднення мазутом станом на 25.12.2024 12:00

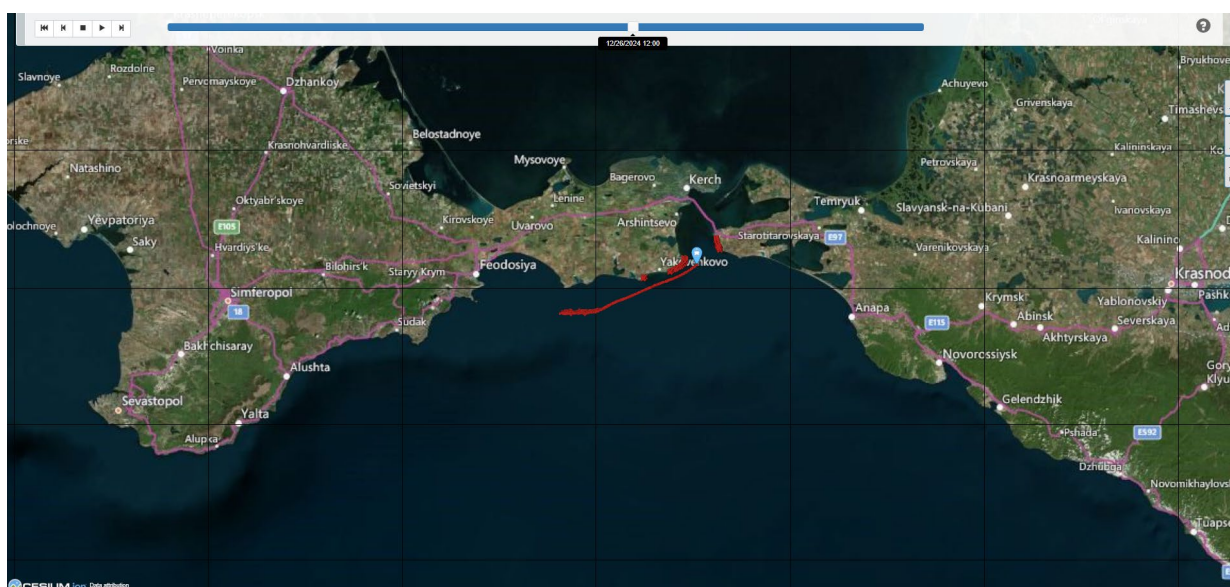


Рисунок 2.22 – Забруднення мазутом станом на 26.12.2024 12:00

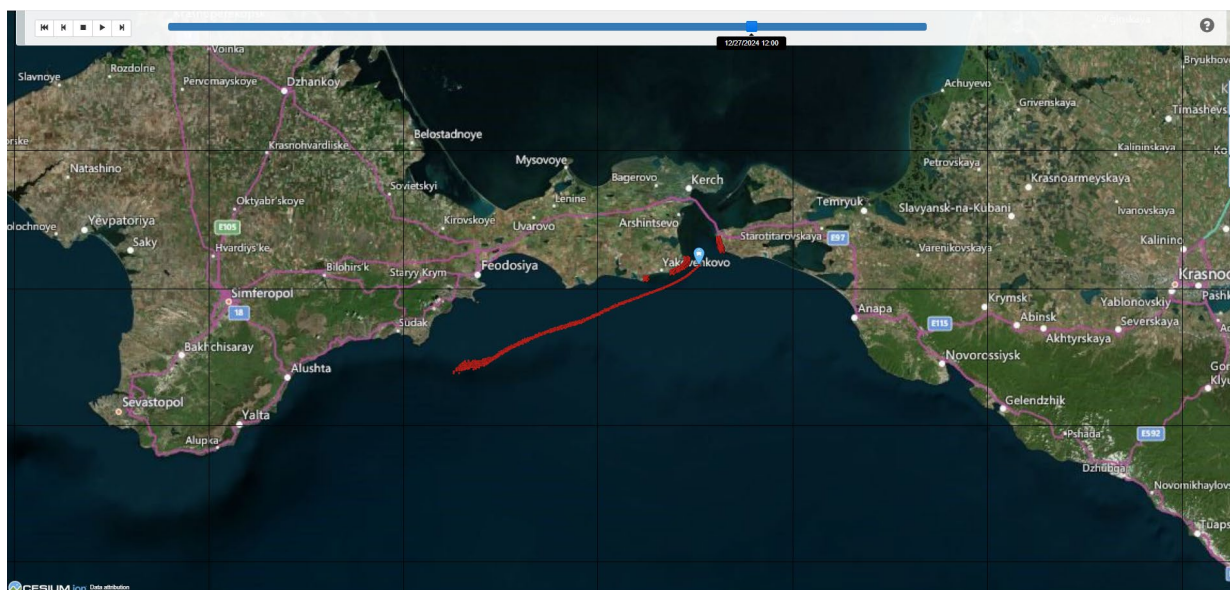


Рисунок 2.23 – Забруднення мазутом станом на 27.12.2024 12:00

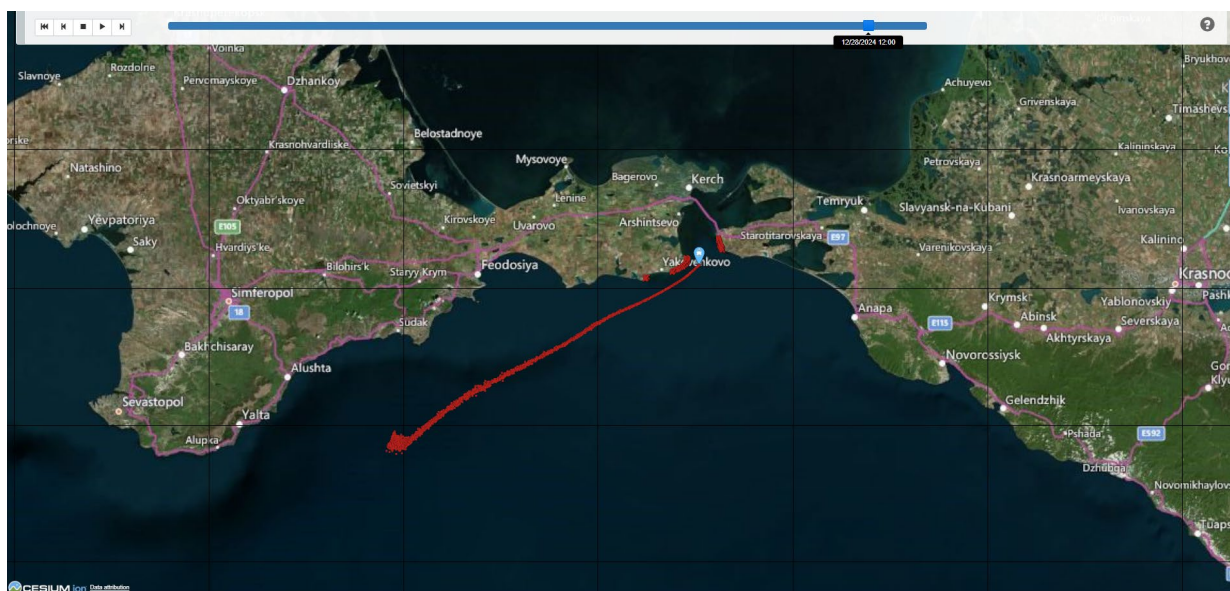


Рисунок 2.24 – Забруднення мазутом станом на 28.12.2024 12:00

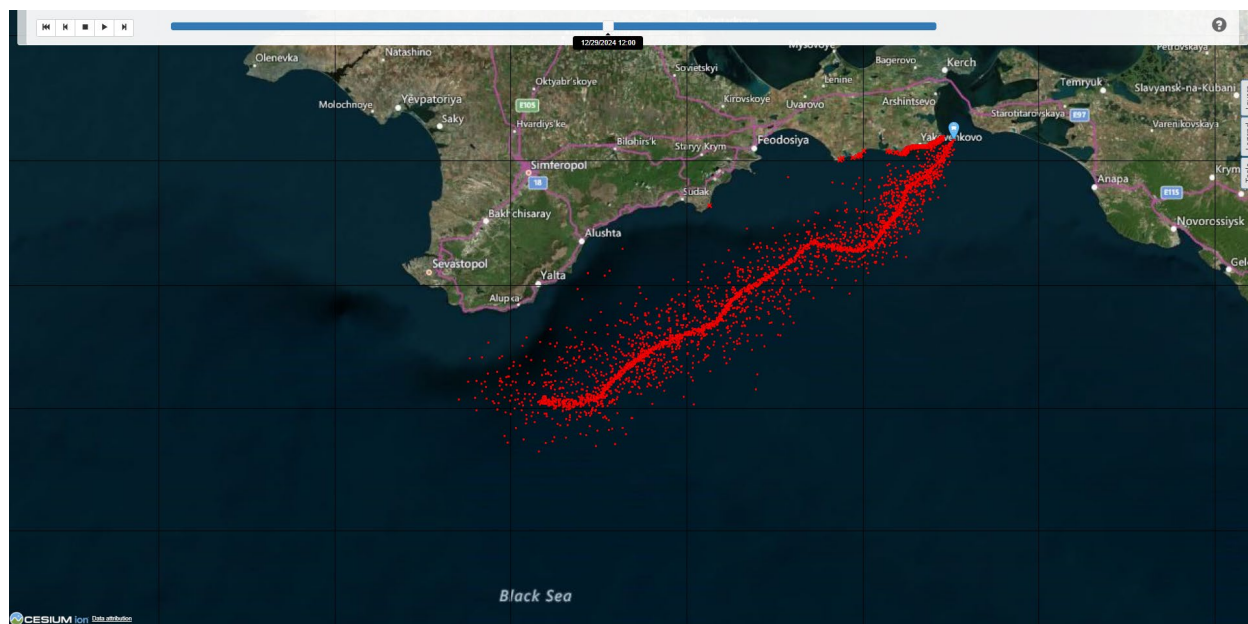


Рисунок 2.25 – Результати моделювання розповсюдження нафтопродуктів
станом на 29.12.2024 12:00

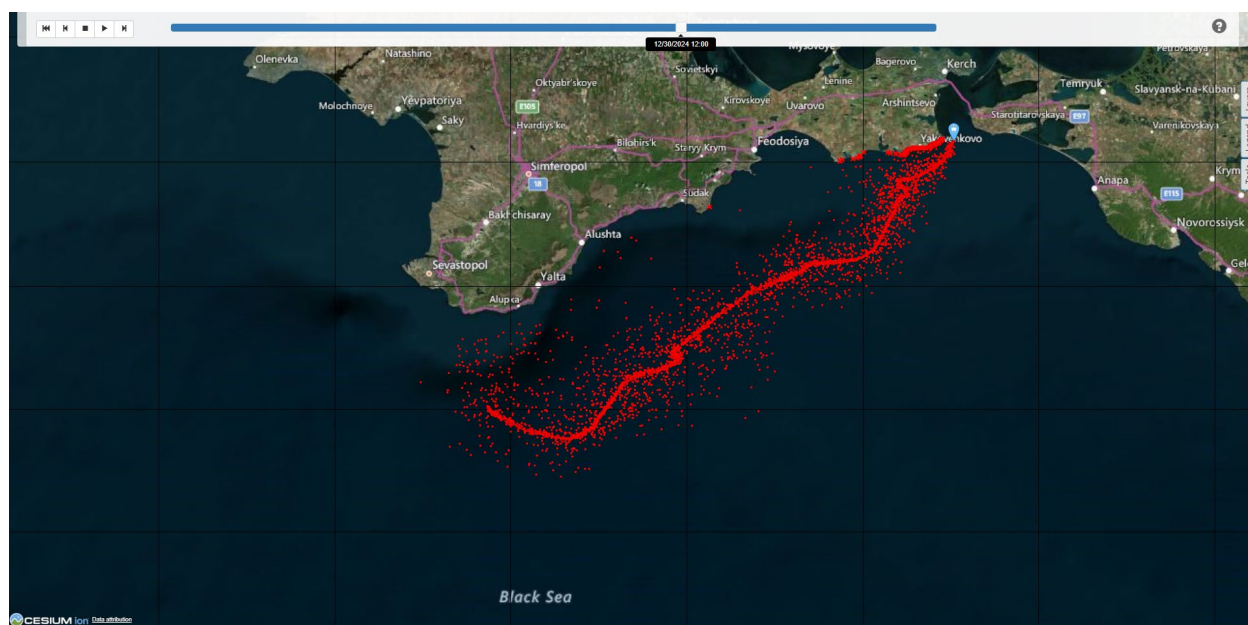


Рисунок 2.26 – Результати моделювання розповсюдження нафтопродуктів
станом на 30.12.2024 12:00

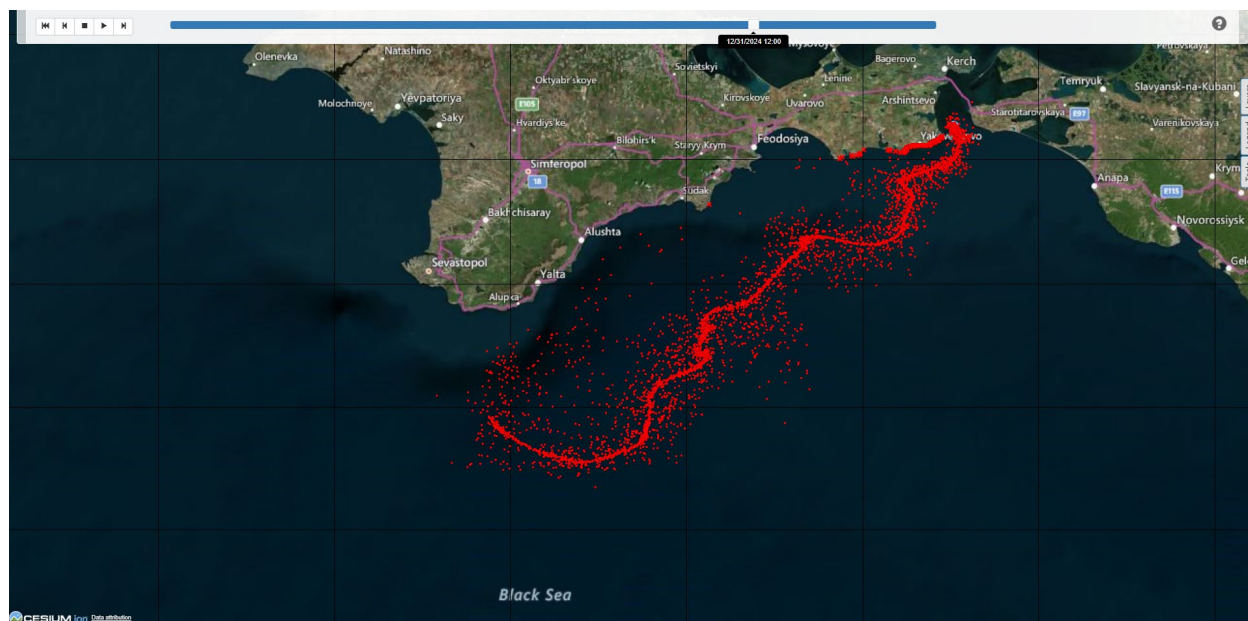


Рисунок 2.27 – Результати моделювання розповсюдження нафтопродуктів
станом на 31.12.2024 12:00

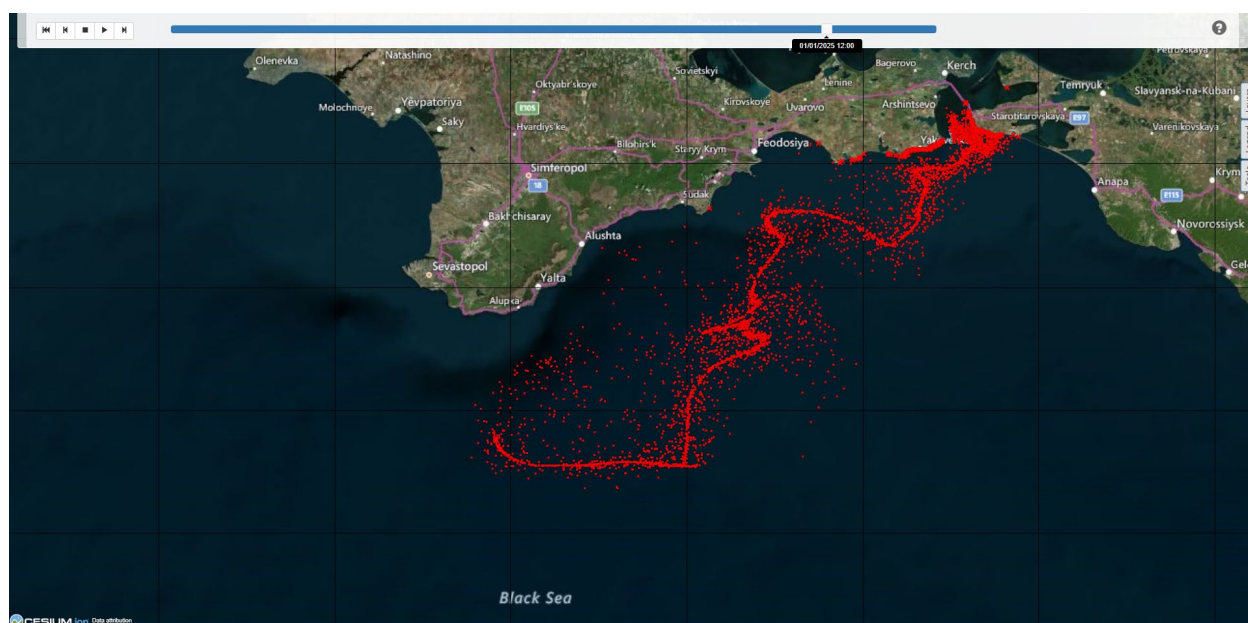


Рисунок 2.28 – Результати моделювання розповсюдження нафтопродуктів
станом на 01.01.2025 12:00

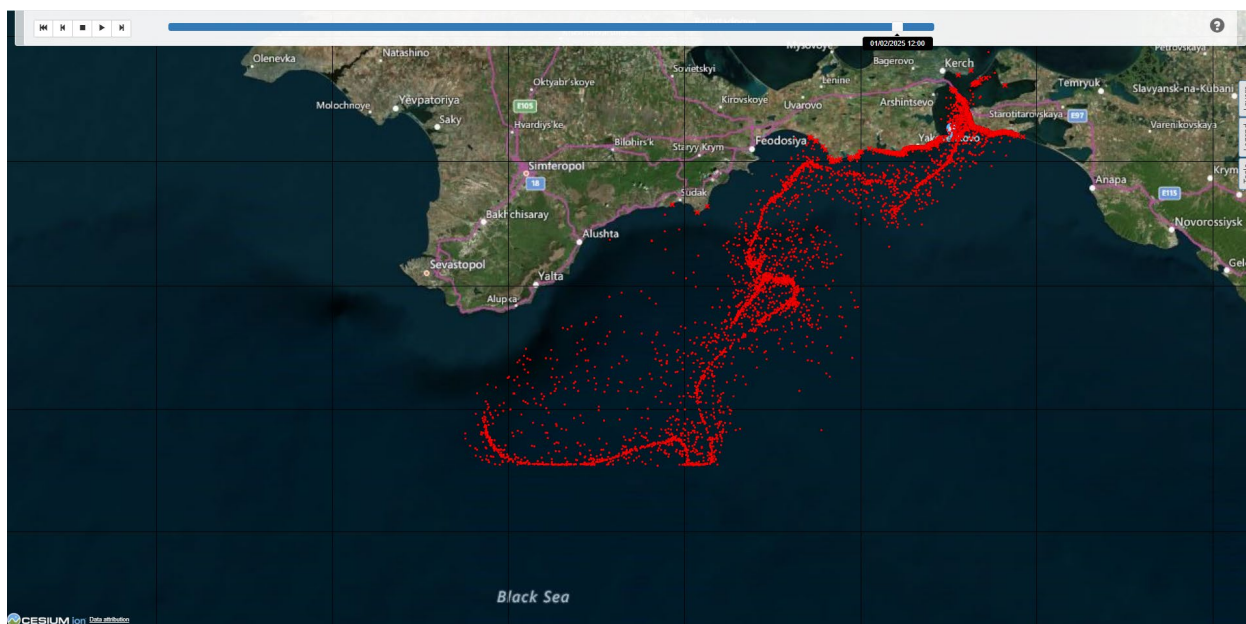


Рисунок 2.29 – Результати моделювання розповсюдження нафтопродуктів станом на 02.01.2025 12:00

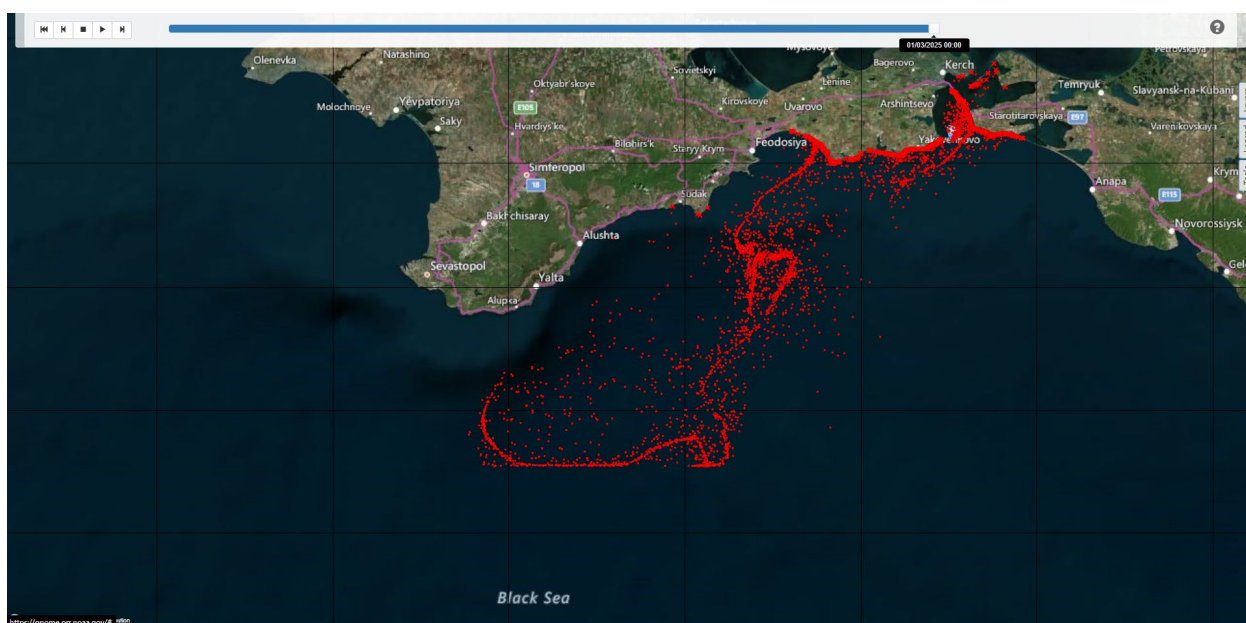


Рисунок 2.30 – Результати моделювання розповсюдження нафтопродуктів станом на 03.01.2025 00:00

Для оцінки можливості впливу аварії, що сталася 15 грудня 2024 року, на узбережжя Одеської області необхідне застосування математичної моделі для довгострокового прогнозування, яка дозволить також визначити потенційний рівень завданої шкоди.

2.3. Прогнозування поширення нафтопродуктів іноземними фахівцями по моделі MEDSLIK

Аварія танкерів привернула увагу багатьох екологів по всьому світу. Нижче викладено результати моделювання (переклад), приведеного в [9].

Відома система прогнозування розливів нафти MEDSLIK, спочатку розроблена Lardner та Zodiatis (1998; 2017), була успішно використана під час великих аварій, пов'язаних з розливами нафти в східному Середземному морі в Лівані та сирійської кризи забруднення нафтою в липні 2006 року та серпні 2021 року, відповідно, у відповідь на запит REMPEC згідно з умовами угоди з MONGOOS. MEDSLIK був адаптований для використання met-ocean файлів netcdf проекту MEDESS4MS, які наразі генеруються системою масштабування CYCOFOS у випадку розливу нафти в Чорному та Середземному морях, використовуючи дані Copernicus Marine Service, CYCOFOS і SKIRON. 15 грудня 2024 року близько 06:00 GMT сталася серйозна морська аварія в Чорному морі, коли на південному вході в Керченську протоку зламався корпус танкера «Волгонефть 212», що призвело до витоку 4 тис. тонн мазуту. Погода в цей час у ширшому районі протоки була надзвичайно суворою з поривами до 18 м/с і висотою хвиль до 3,0-5,5 м. За даними спостережень на місці, витік нафти протягом перших трьох днів торкнувся великої частини прилеглого південно-східного узбережжя, простягнувшись спочатку до 60 км від пляжів Веселовки до Анапи. Важливо, що було важко використовувати супутникові радіолокаційні зображення для оцінки масштабів витоку нафти через обмеження датчиків SAR за переважаючих несприятливих умов моря. Однак 19 і 23 грудня 2024 року RadarSat і ESA вдалося отримати обмежену кількість знімків. Крім того, існує кілька невизначеностей щодо точного розташування джерела розливу нафти, типу нафти та часу викиду нафти. Тому, використовуючи течії Copernicus Marine Service Black Sea MFS і температуру поверхні моря SST, високочастотні вітри SKIRON і хвилі CYCOFOS, команда з

ORION Research, Mare Investigatorum Studia, MHI-RAS і Rowell Computing (Джордж Зодіатіс, Харі Радхакрішнан, Андреас Ніколаїдіс, Дмитро Соловійов і Кіріакос Прокопі) реалізувала MEDSLIK, враховуючи безперервний витік нафти, щоб передбачити масштаби розливу нафти протягом восьми днів, до 23 грудня 2024 року. Повідомлене місце розташування танкера вперше було використано для прогнозування розливу нафти, однак очікуваний вплив на узбережжя не зовсім збігався зі спостереженнями на місці. Враховуючи вищевикладене, нове місце було обрано стохастично на основі позицій AIS, які відображають дві зони бункерування суден, які очікують дозволу на вхід у протоку. Що стосується постраждалих прибережних територій, їх величезної площі та часових рамок періодичних повторюваних відкладень нафти в прибережній зоні, прогнози розливу нафти демонструють високий ступінь узгодження з повідомленими спостереженнями на місці. Прогнози щодо розливів нафти підтверджують масове накопичення розливів нафти на популярних пляжах між Веселовкою та Благовіщенським, які спочатку вплинули на узбережжя вранці 17 грудня 2024 року, через 51-54 години після початку викиду нафти, а також на пляжах Вітязево та Анапи, які спочатку вплинули на узбережжя через кілька годин того ж дня, через 54-57 годин після викидів нафти. Очікувалося, що початковий удар по всьому узбережжю від Анапи до Утріша станеться о 22:00 GMT 17 грудня 2024 року, тобто через 60-63 години після розливу нафти. Прогнозований район впливу між Анапою та Утришем підтверджується знімком SAR, отриманим RadarSat 19 грудня 2024 року о 16:00 GMT. Вранці 20 грудня 2024 року о 04:00 GMT вітер змінився сильним південним вітром до 8 м/с. Це сприяло поширенню розливу нафти всередині протоки, який торкнувся спочатку мису Такіль, а потім і західного узбережжя протоки до порту Керч. Прогнозовані зони впливу вздовж західного узбережжя Керченської протоки підтверджені зображенням SAR, отриманим ESA 23 грудня 2024 року о 03:45 GMT.

Результати моделювання приведено на рисунку 2.31.

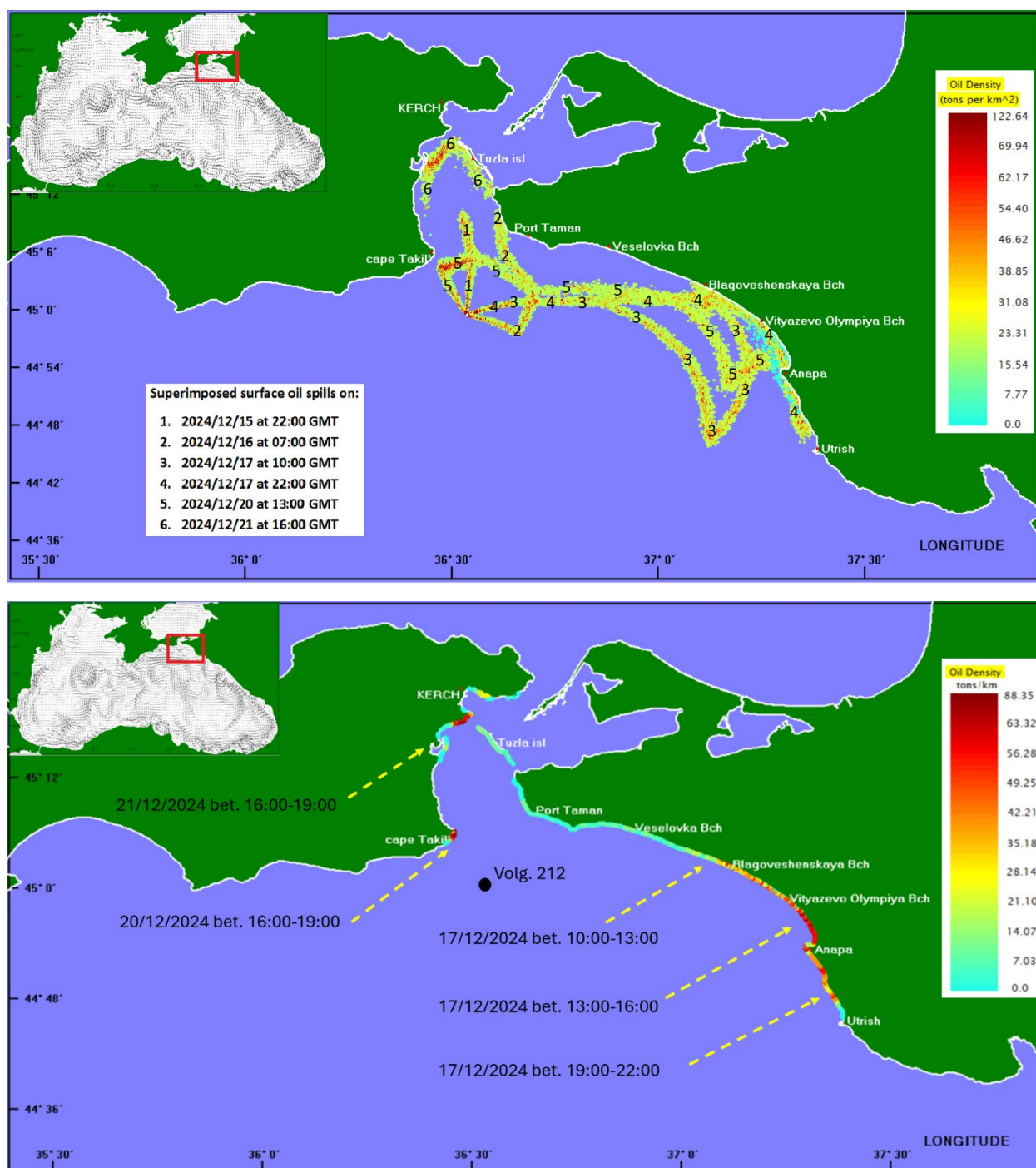


Рисунок 2.31 – Результати прогнозування розливів нафти MEDSLIK

Успіх реагування на великі інциденти, пов'язані з розливами нафти, залежить від передбачення руху та вивітрювання розливів нафти. Такі прогнози можна отримати шляхом застосування моделей розливу нафти, щоб передбачити, куди рухатиметься розлив нафти, як скоро він туди дійде, які ресурси знаходяться під загрозою та в якому стані буде нафта, коли вона прибуде. Перші три запитання є більш критичними для ефективної підтримки

агенцій реагування у боротьбі з розливами та повністю залежать від надійних морських течій, температури поверхні моря, вітрів і хвиль. Система прогнозування розливів нафти MEDSLIK з використанням продуктів Copernicus Marine Services і відповідних даних субрегіональних і прибережних систем прогнозування, таких як дані CYCOFOS, можуть використовуватися для підтримки агентств з реагування на: планування та впровадження вимірювань пом'якшення забруднення нафтою, запобігання розливу нафти, готовність і боротьбу з реагуванням, дослідження масштабів постраждалих прибережних районів, прогнозування першого впливу на критичні прибережні та приморські інфраструктури.

3. ОЦІНКА ВПЛИВУ НАФТОПРОДУКТІВ НА МОРСЬКЕ СЕРЕДОВИЩЕ

Витік мазуту після аварії танкерів «Волгонефть-212» і «Волгонефть-239» призвів до безпосереднього контакту нафтопродуктів з морськими організмами, що становить значну загрозу для їх життєдіяльності. Із ЗМІ вже відомо про сотні постраждалих птахів та десятки дельфінів.

Ці негативні наслідки зумовлені складними фізико-хімічними та біологічними процесами, що відбуваються після потрапляння мазуту у морське середовище. Взаємодія нафтопродуктів з водою, атмосферними факторами та живими організмами визначає подальший сценарій їх поширення, розкладу та потенційного впливу на екосистему. Рисунок 3.1 ілюструє фізико-хімічні та біологічні процеси, що визначають динаміку поширення та трансформації розлитих нафтопродуктів у морському середовищі, а саме:

1. Поширення та перенесення:

- нафтопродукти поширюються поверхнею води під впливом вітру, хвиль та течій;
- турбулентність хвиль сприяє механічному змішуванню та проникненню нафтопродуктів у товщу води.

2. Фізико-хімічні перетворення:

- випаровування легких фракцій відбувається під дією сонячного випромінювання;
- фотоокислення під впливом ультрафіолетового випромінювання сприяє розкладанню органічних компонентів мазуту.

3. Проникнення нафти у водну товщу:

- турбулентне змішування призводить до утворення нафтових емульсій, які можуть залишатися у воді тривалий час;
- краплі або згустки нафтопродуктів під дією течій та турбулентності розсіюються у товщі води;

- частина нафтопродуктів розчиняється у воді, що впливає на якість морського середовища.
4. Осадження та взаємодія з донними відкладеннями:
- важкі компоненти нафтопродуктів можуть поступово осідати на дно, накопичуючись у донних відкладеннях;
 - осаджений мазут створює довготривале джерело забруднення, впливаючи на бентосні організми.
5. Біологічні процеси та токсичність:
- біодеградація нафтових компонентів відбувається під дією мікроорганізмів, здатних розкладати вуглеводні;
 - розчинені у воді нафтопродукти можуть чинити токсичний вплив на водні організми, зокрема фітопланктон, рибу та молюсків.

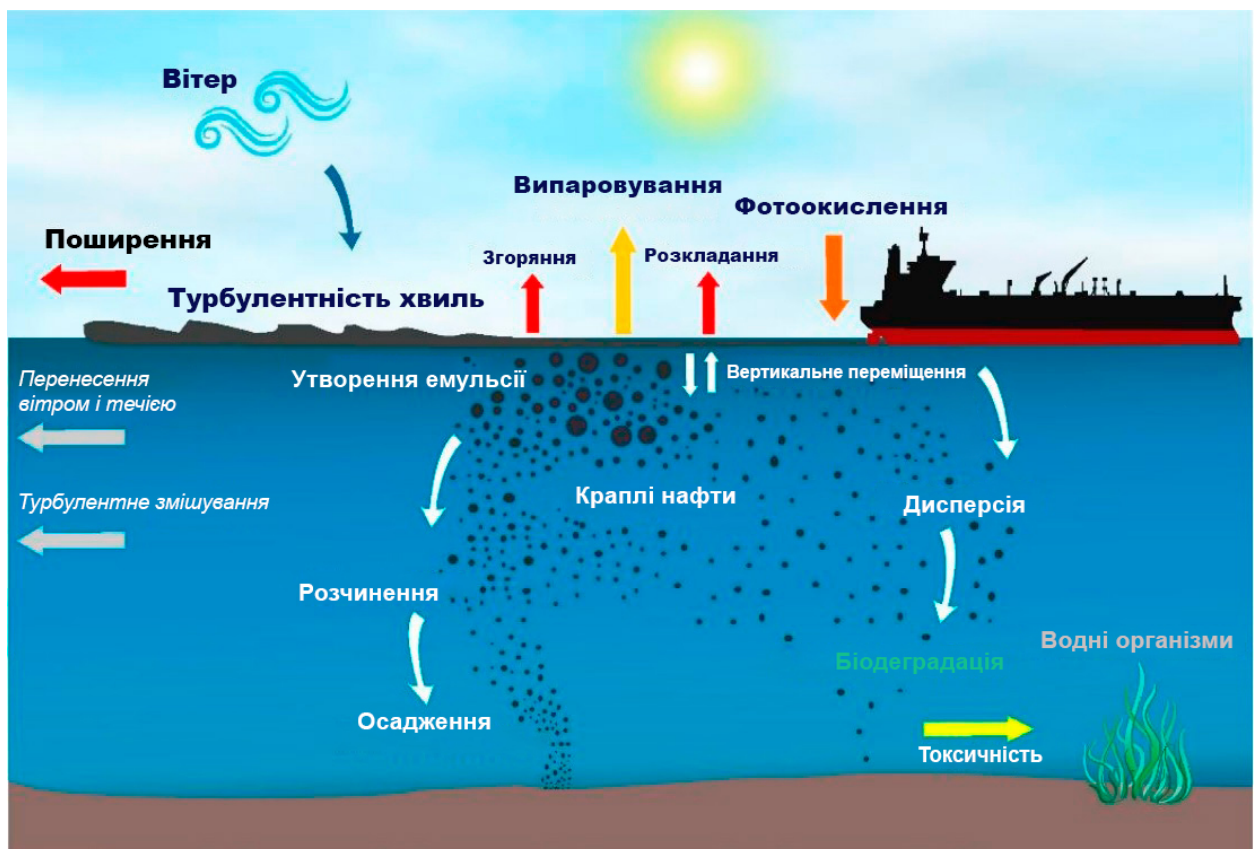


Рисунок 3.1 – Основні процеси, що впливають на розлитий нафтопродукт у морі [10]

Нафтопродукти, потрапляючи у водне середовище, утворюють нафтову плівку, яка обмежує газообмін, знижуючи рівень кисню у воді. Це може спричинити масову загибель планктону, молоді риб та інших гідробіонтів, що є основою морських трофічних ланцюгів.

Крім того, мазут має високий вміст важких вуглеводнів, які є токсичними для морських організмів. У багатьох випадках такі сполуки призводять до пошкодження зябер у риб, порушення функцій печінки та нервової системи у морських безхребетних. Відомо, що водоплавні птахи особливо вразливі до нафтового забруднення – контакт із мазутом руйнує структуру їх пір'яного покриву, що унеможлиблює терморегуляцію і призводить до переохолодження та загибелі.

Вплив нафтозабруднення на морські екосистеми включає токсичний вплив на планктон, рибу та морських ссавців. Vasoroulos et al. (2014) [11] показують, що нафтопродукти можуть акумулюватися в трофічних ланцюгах, створюючи загрозу для біорізноманіття та здоров'я екосистем. Крім того, довготривале осадження нафти у донних відкладах може стати джерелом вторинного забруднення протягом десятиліть, що ускладнює відновлення морських біоценозів [12].

Забруднення нафтопродуктами може мати як короткостроковий, так і довгостроковий вплив на морське середовище.

У короткостроковій перспективі розлив мазуту спричиняє:

- фізико-хімічний вплив на морську воду - підвищення концентрації вуглеводнів у воді, зміни у рівні кисню, зміна прозорості та збільшення концентрації завислих речовин;
- гостру токсичність для гідробіонтів - може спричинити масову загибель планктону, безхребетних, молоді риб та інших видів;
- порушення функціонування екосистем - зокрема через загибель видів, що відіграють ключову роль у трофічних мережах.

У довгостроковій перспективі можливі такі наслідки:

- накопичення токсичних вуглеводнів у донних відкладеннях, що може мати пролонговану дію на бентосні екосистеми;
- біоаккумуляція небезпечних сполук у рибах та морських ссавцях, що загрожує здоров'ю екосистем та створює ризики для рибного промислу та продовольчої безпеки населення;
- зниження продуктивності морських екосистем та довготривале відновлення біорізноманіття, що може тривати роками або навіть десятиліттями після катастрофи.

Враховуючи значний обсяг витоку нафтопродуктів, тривалий період викиду забруднюючих речовин та розповсюдження мазуту в Чорному морі, існує висока ймовірність суттєвих змін у морській екосистемі, що потребуватиме комплексного наукового моніторингу та заходів з реабілітації уражених територій.

4. МОДЕЛІ ДОВГОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ВПЛИВІВ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ

Ключовим методом для аналізу та прогнозування впливу розливу мазуту в морському середовищі в довгостроковій перспективі є математичне моделювання. Даний підхід дозволяє не лише оцінювати поширення забруднення, але й прогнозувати його екологічні наслідки, що критично важливо для прийняття ефективних заходів реагування. На сьогоднішній день такої моделі не існує.

На сьогоднішній день за участю УкрНЦЕМ працює міжнародна робоча група по створенню математичної моделі для прогнозування довгострокових впливів аварійних ситуацій, таких, якою є аварія танкерів в районі Керченської протоки 15 грудня 2024 р.

Моделі розливів нафтопродуктів поділяються на декілька основних категорій залежно від цілей дослідження. Серед них особливе місце займають операційні моделі GNOME, DELFT3D-PART та OpenDrift [13], [14], [15]. GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment) дозволяє здійснювати короткострокове прогнозування руху нафтових плям, інтегруючи метеорологічні та океанографічні дані для визначення потенційно уразливих прибережних зон [13].

Модель DELFT3D-PART [14] забезпечує можливість моделювання довгострокових процесів, зокрема осадження важких фракцій нафтопродуктів та їхню взаємодію із донними відкладами, що дозволяє оцінити кумулятивний ефект забруднення. OpenDrift [15] є гнучкою моделлю, що використовує Лагранжевий підхід для відстеження траєкторій частинок нафтопродуктів у морському середовищі, враховуючи процеси дифузії та вертикального перемішування.

Моделі обчислювальної гідродинаміки (CFD) забезпечують глибоке розуміння фізичних процесів, що відбуваються на межі нафтової плями та

водної товщі. Tkalich (2014) [16] демонструє ефективність застосування CFD для моделювання поведінки нафтопродуктів у турбулентних умовах, що дозволяє оптимізувати заходи із запобігання розповсюдженню забруднення та розробити ефективні стратегії ліквідації наслідків.

Для аналізу довготривалого впливу розливу мазуту на морське середовище нами розглядаються моделі DELFT3D-PART та OpenDrift, які забезпечують комплексний підхід до прогнозування поведінки нафтопродуктів у морській екосистемі.

DELFT3D-PART — це чисельна модель частинок, яка використовується для моделювання транспорту і трансформації розлитих забруднюючих речовин. Вона базується на методі Лагранжевого відстеження частинок і дозволяє моделювати ключові процеси, що визначають довгостроковий вплив нафтопродуктів на морське середовище. Зокрема, модель дозволяє прогнозувати:

- дисперсію нафтопродуктів у товщі води під впливом турбулентності та течій, що визначає масштаби поширення забруднення;
- процеси седиментації, що є критично важливими для оцінки накопичення мазуту у донних відкладеннях і визначення зон із підвищеним рівнем екологічного ризику;
- біодеградацію нафтопродуктів під дією природних мікроорганізмів, що дозволяє оцінити швидкість природного самоочищення екосистем.

Особливо важливою є здатність DELFT3D-PART моделювати осадження важких фракцій на морському дні, що є ключовим фактором для прогнозування довгострокового екологічного впливу. Це дозволяє визначати зони потенційної акумуляції забруднень, які можуть залишатися джерелом вторинного забруднення протягом тривалого часу.

Ще одним потужним інструментом для довгострокового прогнозування є OpenDrift – відкрита моделювальна платформа, яка інтегрує дані про морські течії, атмосферні умови та хвильову динаміку для моделювання поведінки забруднюючих речовин у морському середовищі. OpenDrift також

використовує метод Лагранжевого відстеження частинок, що дозволяє моделювати складні фізико-хімічні процеси, такі як розтікання, випаровування, емульгування, дисперсія, фотоокислення та біодеградація.

Ключовою перевагою OpenDrift є можливість працювати як у режимі реального часу, так і для довгострокового прогнозування, що забезпечує комплексну оцінку впливу нафтопродуктів на морське середовище. Модель дозволяє оцінити потенційно уразливі зони, передбачити динаміку забруднення та його можливий вплив на морські екосистеми, включно з природоохоронними територіями.

Поєднання можливостей моделей DELFT3D-PART та OpenDrift дозволить отримати науково обґрунтовані результати для оцінки довготривалих екологічних наслідків розливу нафти. Результати моделювання створять надійну основу для розробки стратегій управління екологічними ризиками, моніторингових програм і заходів із ліквідації наслідків аварійних розливів нафти.

ВИСНОВКИ

Аварія російських танкерів, що сталась в Керченській перед протоці 15 грудня 2024 року має серйозні екологічні наслідки, що вимагають комплексного підходу до їх ліквідації та відновлення біорізноманіття. Впровадження сучасних технологій очищення та реабілітації є ключовим для мінімізації шкоди та запобігання майбутнім катастрофам.

Виконано аналіз короткострокових та довгострокових екологічних наслідків. Враховуючи значний обсяг витоку нафтопродуктів, тривалий період викиду забруднюючих речовин та розповсюдження мазуту в Чорному морі, існує висока ймовірність суттєвих змін у морській екосистемі, що потребуватиме комплексного наукового моніторингу та заходів з реабілітації уражених територій.

Для оцінки екологічного впливу та контролю за поширенням забруднення буде продовжуватись регулярний моніторинг супутникових знімків, моделювання розповсюдження плям нафтового забруднення, аналіз отриманих даних, також будуть враховуватись повідомлення зі ЗМІ. Цей комплекс заходів спрямований на забезпечення своєчасного реагування та розробку стратегій для мінімізації наслідків забруднення в чорноморському регіоні.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Портал Copernicus Browser: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>.
2. Портал AIRBUS OneAtlas Radar: <https://radar.oneatlas.airbus.com/>
3. Serco Italia SPA (2018). Oil spill mapping with Sentinel-1 (version 1.2). Retrieved from RUS Lectures. https://eo4society.esa.int/wp-content/uploads/2022/01/OCEA03_OilSpill_Kuwait.pdf
4. WebGNOME User Manual: <https://gnome.orr.noaa.gov/doc/>
5. Beegle-Krause, C. J. (2001). General NOAA Oil Modeling Environment (GNOME): A New Spill Trajectory Model. *Proceedings of the International Oil Spill Conference*, 2001(2), 865-871. <https://doi.org/10.7901/2169-3358-2001-2-865>
6. Lehr, W. J., Simecek-Beatty, D., Overstreet, R., & Venkatesh, S. (2000). The Relation of Langmuir Circulation Processes to the Standard Oil Spill Spreading, Dispersion, and Transport Algorithms. *Spill Science & Technology Bulletin*, 6(3-4), 247-257. [https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(01\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(01)00043-3)
7. Zhang, T., Wang, X., & Chen, Y. (2021). GNOME and LBM Model Evaluation on Ocean Oil Spill Far-Field Impacts to Highly Sensitive Areas. *arXiv preprint arXiv:2105.05193*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.05193>
8. Fingas, M. (2018). *Oil Spill Science and Technology*. 2nd Edition. Elsevier. ISBN: 978-0-12-809413-6.
9. The Black Sea Kerch Strait's maritime accident oil spill simulations in December 2024. Powered by ORION Research, Nicosia Cyprus. <https://marine.copernicus.eu/services/use-cases/black-sea-kerch-straits-maritime-accident-oil-spill-simulations-december-2024>
10. Keramea, P., Spanoudaki, K., Zodiatis, G., Gikas, G., & Sylaios, G. (2021). Oil Spill Modeling: A Critical Review on Current Trends, Perspectives, and Challenges. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2), 181. <https://doi.org/10.3390/jmse9020181>

11. Bacopoulos, P., Weisberg, R. H., et al. (2014). Defining Baseline Conditions of Beached Oil Tar Balls: A Field and Model Study. *Marine Pollution Bulletin*, 83(1), 102–110.
12. Toderascu, R., Rusu, L. (2013). Long-Term Simulations of Oil Spill Dispersion in the Black Sea. *Ocean Science Discussions*, 9(3), 1453–1471.
13. Lehr, W. J. (2001). Review of Modeling Procedures for Oil Spill Weathering Behavior. *Marine Pollution Bulletin*, 42(11), 933–941.
14. DELFT3D-PART (2021). Advanced Modeling for Long-Term Oil Spill Impact Assessment. Delft Hydraulics.
15. OpenDrift Team (2018). OpenDrift v1.0: A Generic Framework for Trajectory Modeling. *Environmental Modelling & Software*, 99, 83–96.
16. Tkalic, P. (2014). CFD Solutions for Oil Spill Problems in Marine Environments. *Journal of Environmental Modelling*, 75(4), 245–258.