



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2025.12.3.288>

УДК 528.8:551.465:504.064:004.93

Ретроспективний аналіз та удосконалення інформаційних і методичних основ аерокосмічного моніторингу температурних аномалій техногенного походження на морській поверхні

Федоровський О. Д.¹ <https://orcid.org/0000-0003-3611-546X>

Хижняк А. В.¹ <https://orcid.org/0000-0002-8637-3822>

Філімонов В. Ю.²

Бондаренко А. Д.^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-2257-6196>

¹ ДУ “Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України”, вул. Олеса Гончара, 55-Б, Київ, 01054, Україна

² Інститут гідромеханіки НАН України, вул. Марії Капніст, 8/4, Київ, 03057, Україна

У статті наведено результати ретроспективного аналізу багаторічних експериментальних матеріалів, отриманих авторами під час натурних досліджень температурних полів морських акваторій Світового океану з використанням дистанційного знімання в інфрачервоному діапазоні, лабораторного моделювання та тінювого знімання (Теплера). Розглянуто особливості формування температурних аномалій техногенного походження від рухомих надводних та підводних об’єктів, зокрема кильватерних слідів, у контексті впливу природних гідрофізичних та гідрологічних умов на названі аномалії. Також уточнено раніше відомі інформативні ознаки в різних кліматичних зонах, в різні пори року та в різних метеоумовах. Описано результати адаптації структурно-текстурного методу на основі інформативних ознак Хараліка (GLCM-аналіз), що дозволяє ідентифікувати температурні збурення техногенного характеру. Отримані результати дозволяють удосконалювати інформаційну базу аерокосмічного моніторингу морських акваторій для огляду та контролю морської обстановки.

Ключові слова: аерокосмічний моніторинг, температурні аномалії, морська поверхня, інформативні ознаки, кильватерний слід, структурно-текстурний метод.

© О.Д. Федоровський, А. В. Хижняк, В. Ю. Філімонов, А. Д. Бондаренко. 2025

Вступ

У сучасних умовах зростання інтенсивності використання морських ресурсів та ускладнення геополітичної ситуації зростає потреба у високоточних засобах дистанційного моніторингу стану морських акваторій. Одним з перспективних напрямів є аерокосмічний моніторинг температурних аномалій на морській поверхні, які можуть сигналізувати про присутність або діяльність надводних та підводних об’єктів. Виявлення та ідентифікація температурних аномалій техногенного походження на морській поверхні, зокрема пов’язаних з рухом надводних та підводних об’єктів, є важливою складовою аерокосмічного моніторингу з метою посилення екологічної безпеки, обороноздатності та управління морськими ресурсами. Для реалізації ефективної системи моніторингу необхідно глибоко вивчати гідрофізичні, гідрологічні і структурно-текстурні інформативні ознаки, що дають змогу надійно фіксувати техногенні теплові сліди в умовах змінного фону та складної морської обстановки.

На відміну від загальновідомих досліджень температури морської поверхні, спрямованих на аналіз моделювання крупномасштабних кліматичних процесів, у цій роботі увагу зосереджено на ретроспективному аналізі та вдосконаленні інформаційної та методичної основи аерокосмічного моніторингу температурних аномалій техногенного походження на морській поверхні, що утворюються внаслідок руху надводних і підводних об’єктів. Особлива увага приділяється вивченню інформативних гідрофізичних, гідрологічних та структурно-текстурних ознак, за якими можна підвищити точність і надійність виявлення техногенних слідів у різних кліматичних умовах, метеообстановці та типах акваторій.

Такий підхід є актуальним для розв’язання задач оперативного контролю морського шельфу та виявлення малопомітних техногенних слідів.

Ретроспективний аналіз виконано на основі експериментальних матеріалів, отриманих авторами в процесі багаторічної безпосередньої участі в експедиціях в різних акваторіях Світового океану.

*Corresponding author / Автор для кореспонденції: А. Khyzhniak / А. В. Хижняк / avsokolovska@gmail.com

This is an Open Access article under the CC BY licenses (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

За допомогою дистанційної інфрачервоної апаратури (радіометр, тепловізор) з літака, корабля, морської платформи та лабораторно в експериментальному басейні, а також контактено (тінювий прилад Теплера) були отримані двовимірні та одновимірні записи сигналів з морської поверхні та приповерхневого шару.

У методології виявлення слабоструктурованих аномалій широко застосовуються структурно-текстурні ознаки, зокрема GLCM-аналіз (Haralick et al., 1973). Він дає змогу кількісно описувати зміни структури зображення, спричинені тепловими або механічними збуреннями. Подальші дослідження (Clausi, 2002; Albrechtsen, 2008) адаптували цей підхід до завдань моніторингу морського середовища,

зокрема для виявлення нафтових плям і кільватерних слідів. У статті було підтверджено інформативність ознак Contrast, Entropy, Difference Entropy та Sum Entropy для класифікації фонового й аномального температурного поля.

1. Гідрофізичні та гідрологічні особливості морської поверхні і приповерхневого шару

Аерокосмічний моніторинг температурних аномалій техногенного походження істотно залежить від стану природного теплового фону водної поверхні (Лялько та ін., 2006) (Рис. 1).

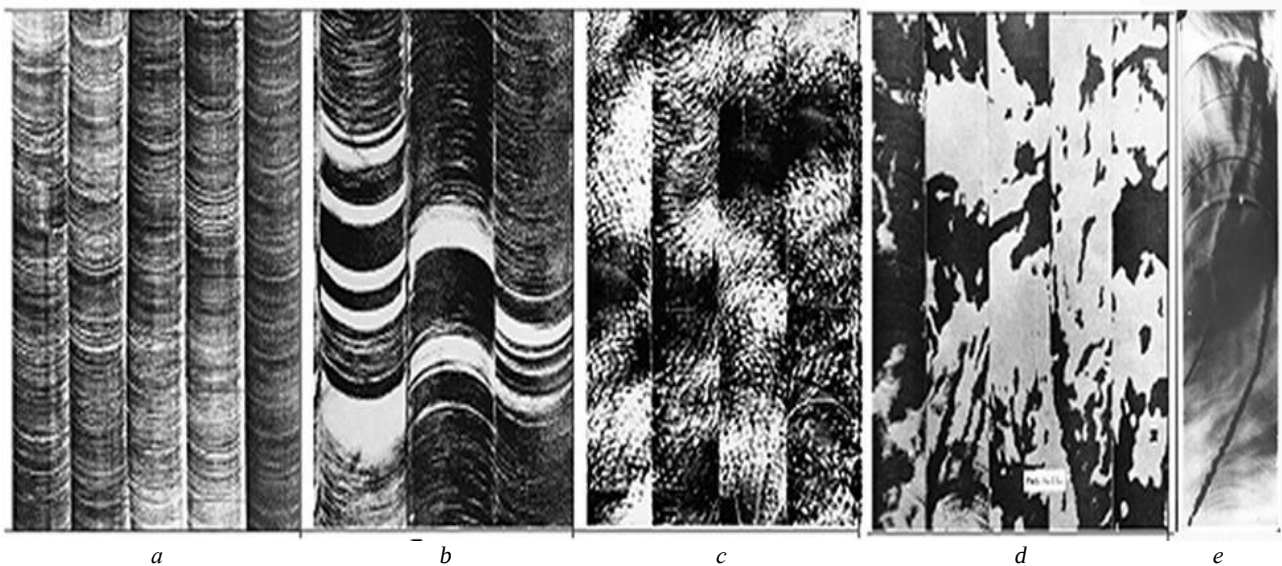


Рис. 1. Приклади авіазнімків температурних полів морської поверхні в різних акваторіях Світового океану (a, b, c, d – в спектральному діапазоні 3,5–5,2 мкм і e – в діапазоні 8–12 мкм)

Поверхнєве теплове поле океану формується під дією різних динамічних та термодинамічних факторів. Важливою особливістю термодинамічної структури водної поверхні є наявність підшару (температурного скін-шару) (McAlister, 1964; Акімов та ін., 2014), який характеризується наявністю від'ємних градієнтів температури. Взаємодії поверхневого холодного шару з різними фізичними явищами (вітер, осаді, поверхневі та внутрішні хвилі і т. д.) багато в чому визначають просторовий розподіл теплових контрастів (Федоровський та ін., 1988; Федоровський та ін., 2021). Механізм формування температурного скін-шару досліджувався в роботах (Щипцов та ін., 2018; Haralick, 1979), з яких випливає, що величина перепаду температури в поверхневому шарі лежить у межах 0,1–1,0 °C при товщині в декілька міліметрів.

На Рис. 2 показані тінюві фотографії (Теплера) приповерхневого шару водної поверхні експериментального басейну при примусовому обдуві (Pulinets, 2006). Справа на рисунку наведені записи водної поверхні за допомогою ГЧ-радіометра. На рисунку спостерігається сходження холодних терміків. Експеримент у басейні змоделивав складні гідрофізичні процеси, які відбуваються у приповерхневому шарі морської поверхні.

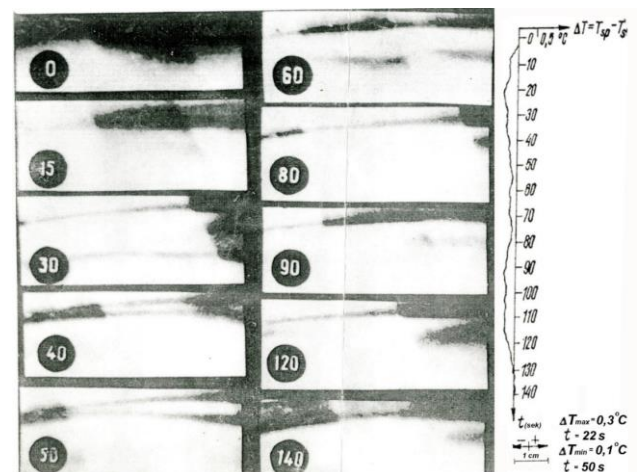


Рис. 2. Тінюва фотографія (камера Теплера). Результати лабораторних експериментальних досліджень мікроконвекції в приповерхневому шарі води з розміром близько 0,5 см при примусовому охолодженні водної поверхні

На рис. 3 наведені тінюві фотографії морського середовища, що знаходиться в різних гідрологічних умовах. Фотознімання проводилося за допомогою теплерівської фотокамери.

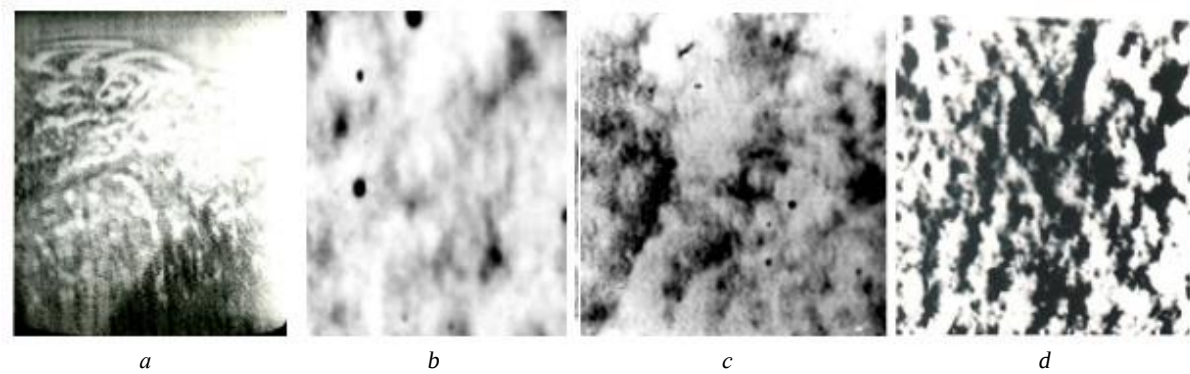


Рис. 3. Приклади різного стану морського середовища на глибинних горизонтах: ізотерія (а), слабо стратифіковано (b), стратифіковано (с), термоклин (d)

На рис. 4 надано приклади стану морського середовища на глибинних горизонтах при зовнішньому збудженні (турбулентність), який помітно відмінний залежно від гідрологічних умов, зміни температури, солоності, підводних течій, структура водного середовища різна. У Чорному

морі термоклин розташовується зазвичай на глибині близько 15–25 м. Збурювання, що виникає в ньому, породжує коливання щільності й температури, які поширюються з області збурювання у вигляді внутрішніх хвиль (BX) (Pulinets, 2006; Ewing & McAlister, 1960; Fedorovsky et al. 1983).

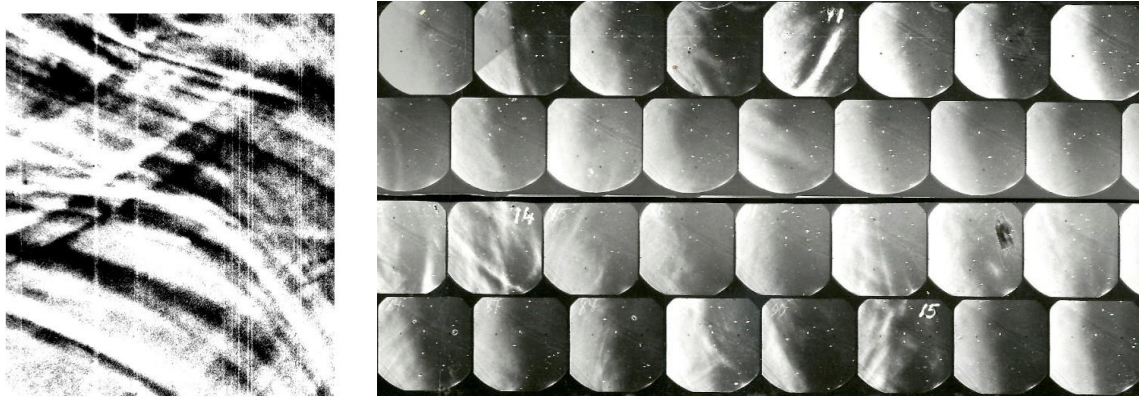


Рис. 4. Приклади тіньових зображень змін текстури морського середовища на глибинних горизонтах після зовнішнього збудження

2. Структурно-текстурний метод, інформативні ознаки Хараліка

У результаті ретроспективного аналізу архівних матеріалів дистанційного зондування та гідрофізичного моделювання процесів формування температурних аномалій техногенного походження на водній поверхні, пов'язаних із функціонуванням нафтогазових об'єктів і рухом морських транспортних засобів, було досліджено інформативність статистичних текстурних ознак. Особливу увагу було приділено параметрам, що базуються на матриці співзастриччів сірого рівня GLCM (Grey-Level Co-occurrence Matrix) за Хараліком, яка відображає просторові залежності між пікселями зображення (Haralick et al., 1973; Haralick, 1979).

Із понад двадцяти базових ознак Хараліка було відібрано п'ять найбільш чутливих до змін структури зображення, викликаних нафтоплівками, скидами бурового шламу, кильватерними слідами та іншими техногенними явищами. Ці показники є ключовими для виявлення структурних і текстурних змін у зонах локалізації техногенних впливів.

Так, наприклад, кильватерні сліди на морській поверхні мають характерну періодичну або спрямовану структуру, часто супроводжуються градієнтами температур або збуреннями, які можна зафіксувати через GLCM-аналіз. Цей підхід дає змогу обчислити статистичні текстурні ознаки, які характеризують стан поверхні, зокрема:

1. Contrast*

$$\text{Contrast} = \sum_{i=0}^{N_g-1} \sum_{j=0}^{N_g-1} (i - j)^2 P(i, j).$$

*при виявленні аномалій від кильватерних слідів зростає на межах хвиль, де змінюється текстура води.

2. Sum Variance*

$$\mu_{x+y} = \sum_{k=2}^{2N_g} k \cdot p_{x+y}(k).$$

$$\text{Sum Variance} = \sum_{k=2}^{2N_g} (k - \mu_{x+y})^2 p_{x+y}(k).$$

*зростає в структурах з повторюваним контрастом — типовим для кильватерного сліду.

3. Difference Entropy*

$$p_{|i-j|} = \sum_{i,j:|i-j|=k} P(i, j).$$

$$\text{Difference Entropy} = - \sum_{k=0}^{N_g-1} p_{|i-j|}(k) \cdot \log_2(p_{|i-j|}(k)).$$

*зростає в зонах турбулентності, де структура води стає менш передбачуваною.

4. Entropy*

$$\text{Entropy} = - \sum_{i=0}^{N_g-1} \sum_{j=0}^{N_g-1} P(i, j) \cdot \log_2(P(i, j) + \varepsilon),$$

де ε – мала додатна стала для уникнення логарифму нуля.

*при виявленні аномалії значення Entropy високе – структура хвиль складна, з великою кількістю непередбачуваних переходів яскравості.

5. Sum Entropy*

$$\text{Sum Entropy} = - \sum_{k=2}^{2N_g} p_{x+y}(k) \cdot \log_2(p_{x+y}(k) + \varepsilon),$$

де $p_{x+y}(k)$ – розподіл сум $i + j$ по всіх піксельних парах.

*при виявленні аномалії значення Sum Entropy високе – підвищується за рахунок широкого діапазону сум.

Для подальшого виявлення аномалій кільватерних слідів на морській поверхні попередньо було опрацьовано дані фонових зображень різних акваторій світового океану та створено інформативну базу. Як приклад, в Табл. 1 наведені деякі середні значення по трьох різних морських акваторіях.

Таблиця 1. Середні значення параметрів Хараліка для температурного фону різних акваторій Світового океану

Параметри Хараліка	А	Б	В
Contrast	2981,84	1820,04	1954,86
Sum Variance	23004,25	13459,29	14892,25
Difference Entropy	6,48	6,25	6,20
Entropy	13,98	14,59	13,79
Sum Entropy	8,43	8,65	8,05

Вище перераховані ознаки дають змогу достовірно виявляти аномалії техногенного походження. Їх поєднання особливо ефективно у виявленні:

- малопомітних турбулентних структур;
- підводних об'єктів, що рухаються;
- симетричних збурень води з періодичністю.

Ці ознаки є ключовим компонентом об'єктно-орієнтованої обробки зображень морської поверхні в задачах подвійного призначення.

3. Приклади температурних аномалій – кільватерних слідів на морській поверхні від рухомих надводних та підводних об'єктів, результати ретроспективного аналізу (Fedorovsky et al., 1983; Федоровський, Соколовська, 2015)

Під час руху заглибленого об'єкта в стратифікованому водному середовищі на поверхні води утворюється кільватерний слід (КС), який характеризується наявністю кількох зон збудження

гідрофізичних полів різного масштабу. Перша зона – вузька й витягнута, розташована на глибинах, близьких до рівня руху об'єкта, – утворюється як зона турбулентної спутної течії (ТСТ). Вона виникає внаслідок дифузійного перенесення імпульсу тепла та маси, викликаного рухом об'єкта. У цій зоні може спостерігатися спливання нагрітої маси води та виділення газових бульбашок.

Друга зона – значно ширша, охоплює різні горизонти, аж до поверхні води. Її формування зумовлене впливом гідродинамічного тиску від корпусу об'єкта, а також хвилювими процесами – корабельними внутрішніми хвилями (КВХ) і генерацією акустичного поля. Основним джерелом КВХ є сам корпус об'єкта, який порушує початкову структуру щільності водного середовища, спричиняючи відхилення ізопікнальних ліній. Крім того, КВХ можуть формуватися в результаті руйнування зони ТСТ.

Нижче наведені приклади температурних аномалій – кільватерних слідів на морській поверхні від рухомих надводних та підводних об'єктів, отримані з літака, морської платформи з встановленою реєструвальною апаратурою, в дослідному басейні, де рухомих об'єктом служить модель.

На Рис. 5 показане тепловізійне зображення кільватерних слідів на морській поверхні від надводних (підводних) рухомих об'єктів.

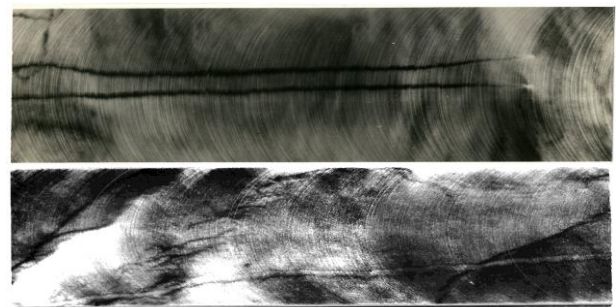


Рис. 5. Тепловізійне зображення кільватерних слідів надводних (підводних) рухомих об'єктів. (Система аерокосмічного тепловізійного моніторингу акваторій)

На Рис. 6 показаний тепловізійний аерознімок кільватерного сліду на морській поверхні від рухомого підводного об'єкта на глибині 100 м.

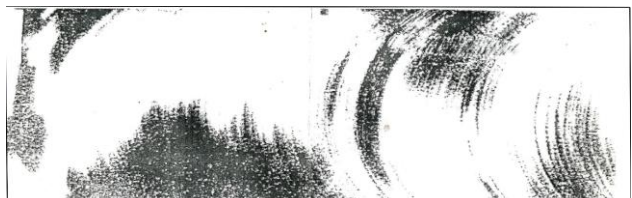


Рис. 6. Тепловізійний аерознімок (3,5–5,2 мкм) кільватерного сліду від рухомого підводного об'єкта

На Рис. 7 показаний фрагмент тепловізійного зображення кільватерного сліду зануреного об'єкта, що рухається, отримане в результаті послідовного перетину кораблем у міру розвитку аномалій на морській поверхні в діапазоні 3,5–5,2 мкм.

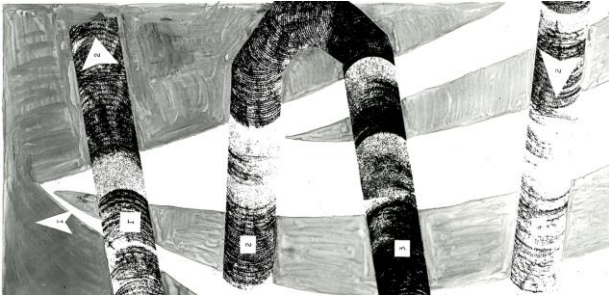


Рис. 7. Фрагмент тепловізійного зображення кільватерного сліду підводного об'єкта, на якому простежується зональний характер слідних сигналів

На Рис. 8 показаний знімок берегової морської платформи з вимірювальною апаратурою, до складу якої входить сканувальний тепловізор для спостережень за формуванням температурних аномалій на морській поверхні від рухомих підводних об'єктів та моделей.



Рис. 8. Берегова морська платформа з вимірювальною апаратурою

Проведено моделювання механізму утворення температурної аномалії в дослідному басейні з урахуванням критерію подібності в однорідному, турбулізованому та стратифікованому середовищах. На Рис. 9 показано фото дослідного басейну Інституту гідромеханіки для моделювання процесу утворення температурних аномалій на водній поверхні від саморухомої підводної моделі.



Рис. 9. Дослідний басейн, де проводилися експерименти (а) та саморухома підводна модель (б)

Експерименти на моделях підтвердили припущення про суттєву роль хвильових процесів в утворенні поверхневого сигналу.

У результаті моделювання отримана залежність імовірності P утворення температурної аномалії на водній поверхні від глибини h та часу t проходження рухомого підводного об'єкта (Рис. 10).

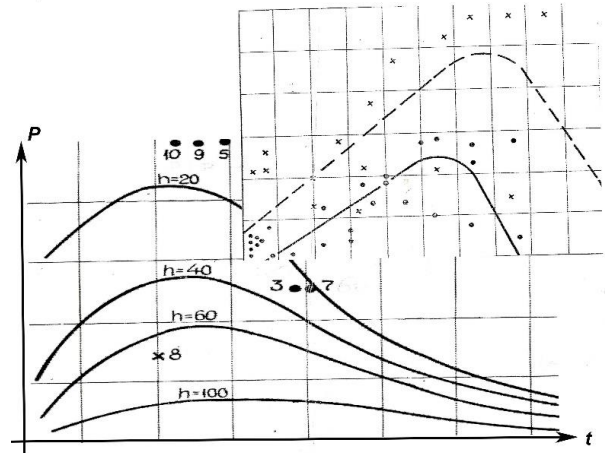


Рис. 10. Імовірність P утворення температурної аномалії від глибини занурення h та часу проходження t рухомої підводної моделі

Ретроспективний аналіз експериментальних матеріалів дав змогу виявити основні параметри фізичної моделі сигнальних явищ на водній поверхні під час руху надводних і підводних об'єктів, зокрема:

Встановлено основні риси фізичної моделі сигналу – зональний характер зі “смугастою” структурою енергетично значущих зон (Рис. 7), квазідетерміновані особливості у поведінці характеристик перемижування (зональності) залежно від часу життя слідних сигналів (Рис. 11), при цьому знайдена залежність середньостатистичної ширини зони збурення, коефіцієнта зональності і просторового розподілу теплових неоднорідностей в зоні збурення сигналу від його часу життя для різних акваторій світового океану:

$$K_3 = \frac{\sum l_i}{L},$$

де K_3 – коефіцієнт зональності, $\sum l_i$ – число перетинів у кільватерному сліду, L – довжина досліджуваної ділянки.

На Рис. 11 показана залежність значень коефіцієнта зональності кільватерного сліду від часу його життя на морській поверхні.

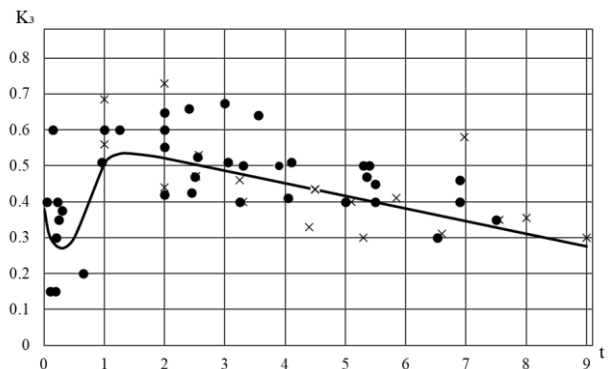


Рис. 11. Залежність значень коефіцієнта зональності K_3 від часу життя t кільватерного сліду підводного об'єкта

Під час натурних досліджень, проведених в акваторіях морів в 90-х роках ХХ сторіччя, зареєстровано переважне утворення на водній поверхні при проходженні підводного об'єкта позитивних температурних контрастів (що свідчить про головну роль у формуванні слідних сигналів фізичних процесів у тонкому поверхневому шарі) та знайдено експериментальну залежність інтенсивності слідних сигналів від температурного градієнта атмосфера-вода.

Виявлено зменшення коефіцієнтів варіації і середньої кількості перетинів центрованим випадковим процесом нульового рівня в сигнальних зонах, що свідчить про згладжування пульсацій температури для метрового масштабу неоднорідностей, та, очевидно, є наслідком підвищеного турбулентного обміну в області сигнальних ефектів.

Розкрито суперечливий характер впливу шару стрибка щільності, який існує між горизонтом руху об'єкта та поверхнею океану, що обумовлює безпосереднє демпфування вихідних турбулентних процесів поряд із генерацією вторинних ефектів. У деяких випадках це призводить до утворення теплових контрастів на водній поверхні в умовах, коли характеристики стійкості водних мас, згідно з існуючою моделлю, не допускають появи поверхневих аномалій.

Встановлено, що в утворенні поверхневого сигналу об'єкта в початковий період його життя основну роль відіграють хвильові процеси. Непрямим підтвердженням цього є поява на водній поверхні характерних бокових смуг і їх розповсюдження в напрямку, перпендикулярному рухові об'єкта із швидкістю порядку 1 м/сек (Рис. 10).

У Табл. 2 надані (як приклад) середньостатистичні значення параметрів Хараліка для температурних аномалій від кильватерних слідів на морській поверхні підводних об'єктів, що рухаються, а також значень поверхневого температурного фону.

Таблиця 2. Середні значення параметрів Хараліка для температурних аномалій від кильватерних слідів на морській поверхні підводних об'єктів різних акваторій Світового океану

Параметри Хараліка	А	Б	В
Contrast	1303,34	948,09	684,45
Sum Variance	35406,26	38724,97	33088,01
Difference Entropy	5,58	5,16	5,06
Entropy	11,90	11,10	10,87
Sum Entropy	7,90	7,57	7,45

Висновки

На основі ретроспективного аналізу досліджено двовимірні (тепловізійні) та одновимірні (радіометричні, тінюві) записи на морській поверхні температурних аномалій техногенного походження від багатотисячних міль кильватерних слідів надводних та підводних об'єктів, що рухаються, а також гідрофізичних та гідрологічних процесів, отриманих в різних кліматичних зонах, у різні пори

року і в різних метеоумовах, з літака, корабля та морських платформ.

У результаті ретроспективного аналізу експериментальних матеріалів були досліджені та виявлені нові інформативні ознаки температурних аномалій техногенного походження, наприклад, залежність коефіцієнта зональності K_z в кильватерному сліду від часу його життя t на морській поверхні, а також уточнені в нових умовах раніше відомі параметри, наприклад, час життя кильватерного сліду на водній поверхні 4–6 годин, залежно від кліматичної зони.

При аналізі записів тінювих фото (Теплера) були встановлені гідрофізичні та гідрологічні особливості приповерхневого шару і на глибинних горизонтах при утворенні температурних аномалій від підводних об'єктів, що рухаються, наприклад, двояка роль шару стрибка щільності при проходженні під ним моделі підводного об'єкта.

Адаптовано структурно-текстурний метод для ретроспективного аналізу експериментальних матеріалів та вибрано інформативні параметри Хараліка для температурної аномалії – кильватерного сліду рухомого підводного об'єкта і температурного фону морської поверхні.

Продовженням досліджень може бути ретроспективний аналіз та удосконалення інформативної основи аерокосмічного моніторингу температурних аномалій на водній поверхні природного походження в інтересах пошуку родовищ нафти і газу на морському шельфі.

Внесок авторів: Концептуалізація – О. Д. Федоровський; методологія – О. Д. Федоровський, А. В. Хижняк, В. Ю. Філімонов, формальний аналіз – О. Д. Федоровський, А. В. Хижняк, систематизація, візуалізація – А. В. Хижняк, підготовка тексту статті: авторський рукопис – О. Д. Федоровський, рецензування та редагування – А. Д. Бондаренко, А. В. Хижняк, візуалізація – А. Д. Бондаренко. Всі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Фінансування: Це дослідження виконано в рамках НДР “Розроблення та удосконалення методів і технологій геопросторового моделювання для вирішення тематичних задач дистанційного зондування Землі”, РК 0123U100684.

Доступність даних: Дані можуть бути надані авторами за обґрунтованим запитом.

Подяки: Автори вдячні Національній академії наук України за підтримку цього дослідження. Ми також вдячні рецензентам і редакторам за їхні цінні коментарі, рекомендації та увагу до роботи.

Конфлікти інтересів: Автори заявляють, що не мають конфлікту інтересів.

Author Contributions: Conceptualisation – O. D. Fedorovsky; methodology – O. D. Fedorovsky, A. V. Khyzhniak, V. Yu. Filimonov; formal analysis – O. D. Fedorovsky, A. V. Khyzhniak; data curation and visualization – A. V. Khyzhniak; writing – original draft preparation – O. D. Fedorovsky; writing – review and editing – A. D. Bondarenko, A. V. Khizhniak; visualization – A. D. Bondarenko. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was carried out within the framework of the research project “Development and improvement of methods and technologies of geospatial modeling to solve

thematic problems of remote sensing”, registration number 0123U100684.

Data Availability Statement: Data available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements: The authors are grateful to the National Academy of Sciences of Ukraine for supporting this research. We are also grateful to the reviewers and editors for their valuable comments, recommendations, and attention to the work.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest

Література

- Акімов, Е. А., Станичний, С. В., Полонський, А. Б. (2014). Використання даних сканера SEVIRI для оцінки температури поверхневого шару Чорного моря. *Мор. гідрофіз. журнал*, 6, 37–46.
- Лялько, В. І., Попов, М. О., Федоровський, О. Д. (ред.). (2006). *Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування*, Київ: Наукова думка. 358 с. ISBN 966-00-0403-1.
- Федоровський, А. Д., Никифорович, С. І., Приходько, Н. А. (1988). *Процеси переносу в газорідних системах*. Київ: Наукова думка.
- Федоровський, О. Д., Хижняк, А. В., Філімонов, В. Ю. (2021). Обґрунтування подвійного використання аерокосмічного геомоніторингу морського шельфу: розвідка родовищ вуглеводнів та “підсвічування” морської ситуації, *Космічні науки та технології*, 27(2), 38–44. <https://doi.org/10.15407/knit2021.02.038>.
- Федоровський, О. Д., Соколовська, А. В. (2015). Дистанційні аерокосмічні дослідження у природокористуванні як міждисциплінарний науковий напрям (на прикладі оцінки нафтогазоперспективності ділянок Каспійського шельфу Туркменістану). *Доповіді Національної академії наук України*, № 3, 100–106. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.03.100>.
- Щипцов, О. А., Федоровський, О. Д., Хижняк, А. В. (2018). Аерокосмічний моніторинг шельфу прибережної зони Чорного моря України як методологія подвійного призначення. *Вісник Національної академії наук України*, 4, 68–75. <https://doi.org/10.15407/visn2018.04.068>.
- Albregtsen, F. (2008). Statistical Texture Measures Computed from Gray Level Cooccurrence Matrices. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:18927855>.
- Clausi, D. A. (2002). An analysis of co-occurrence texture statistics as a function of grey level quantization. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28(1), 45–62. <https://doi.org/10.5589/m02-004>.
- Ewing, F., & McAlister, E. D. (1960). On the thermal boundary layer of the ocean. *Science*, 131(3413), 1374–1375. <https://doi.org/10.1126/science.131.3413.1374>.
- Fedorovsky, O. D., Nikiforovich, E. I., Filimonov, V. Yu. (1983, May 24–26). *Thermal structure of the air–water interface and optical methods of its investigation*. In Proceedings of the International Conference “Hydrodynamics and physical processes in liquids and dispersed systems” (pp. 317–320). Prague.
- Haralick, R. M., Shanmugam, K., Dinstein, I. (1973). Textural features of image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, & Cybernetics*, 3(6), 610–621. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309314>.
- Haralick, R. M. (1979). Statistical and structural approaches to texture. *Proceedings of the IEEE*, 67(5), 786–804. <https://doi.org/10.1109/PROC.1979.11328>.
- Mc Alister, E. D. (1964). Measurement of total heat flow from the sea surface. *Appl. Opt.*, 5b, 188–201.
- Pulinets, S. A. (2006). Space technologies for short-term earthquake warning. *Advances in Space Research*, 37(4), 643–652. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.161>.
- Reference**
- Akimov, E. A., Stanychniy, S. V., Polonsky, A. B. (2014). Use of SEVIRI scanner data to assess the temperature of the surface layer of the Black Sea. *Marine Hydrophysical Journal*, 6, 37–46. (in Ukrainian).
- Albregtsen, F. (2008). Statistical texture measures computed from gray level co-occurrence matrices. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:18927855>
- Clausi, D. A. (2002). An analysis of co-occurrence texture statistics as a function of grey level quantization. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28(1), 45–62. <https://doi.org/10.5589/m02-004>.
- Ewing, F., McAlister, E. D. (1960). On the thermal boundary layer of the ocean. *Science*, 131(3413), 1374–1375. <https://doi.org/10.1126/science.131.3413.1374>
- Fedorovsky, A. D., Nykyforovych, Ye. I., Prykhodko, N. A. (1988). *Mass transfer processes in gas-liquid systems*. Kyiv: Naukova Dumka. (in Ukrainian).
- Fedorovsky, O. D., Khyzhniak, A. V., Filimonov, V. Yu. (2021). Justification of the dual use of aerospace geomonitoring of the marine shelf: Hydrocarbon exploration and maritime situation “highlighting.” *Space Science and Technology*, 27(2), 38–44. <https://doi.org/10.15407/knit2021.02.038>. (in Ukrainian).
- Fedorovsky, O. D., Nikiforovich, E. I., Filimonov, V. Yu. (1983, May 24–26). *Thermal structure of the air–water interface and optical methods of its investigation*. In Proceedings of the International Conference “Hydrodynamics and physical processes in liquids and dispersed systems” (pp. 317–320). Prague.
- Fedorovsky, O. D., Sokolovska, A. V. (2015). Aerospace remote sensing studies in environmental management as an interdisciplinary scientific field (on the example of oil and gas prospect assessment of the Caspian shelf areas of Turkmenistan). *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 3, 100–106. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.03.100>. (in Ukrainian).
- Haralick, R. M. (1979). Statistical and structural approaches to texture. *Proceedings of the IEEE*, 67(5), 786–804. <https://doi.org/10.1109/PROC.1979.11328>.
- Haralick, R. M., Shanmugam, K., Dinstein, I. (1973). Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 3(6), 610–621. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309314>.
- Lyalko, V. I., Popov, M. O., Fedorovsky, O. D. (Eds.). (2006). *Multispectral methods of remote sensing of the Earth for environmental management*. Kyiv: Naukova Dumka. ISBN 966-00-0403-1. (in Ukrainian).
- McAlister, E. D. (1964). Measurement of total heat flow from the sea surface. *Applied Optics*, 5(b), 188–201.
- Pulinets, S. A. (2006). Space technologies for short-term earthquake warning. *Advances in Space Research*, 37(4), 643–652. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.161>.
- Shchiptsov, O. A., Fedorovsky, O. D., Khyzhniak, A. V. (2018). Aerospace monitoring of the shelf of the coastal zone of the Black Sea of Ukraine as a dual-use methodology. *Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 4, 68–75. <https://doi.org/10.15407/visn2018.04.068>. (in Ukrainian).

RETROSPECTIVE ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF THE INFORMATIONAL AND METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF AEROSPACE MONITORING OF TECHNOGENIC SEA SURFACE TEMPERATURE ANOMALIES

O. D. Fedorovsky¹, <https://orcid.org/0000-0003-3611-546X>

A. V. Khyzhniak¹, <https://orcid.org/0000-0002-8637-3822>

V. Yu. Filimonov²

A. D. Bondarenko¹, <https://orcid.org/0000-0002-2257-6196>

¹*State Institution “Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Science of the National Academy of Sciences of Ukraine”, Olesia Honchara Str., 55-b, Kyiv, 01054, Ukraine.*

²*Institution of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 8/4 Marii Kapnist Str., Kyiv 57, 03680, Ukraine*

The article presents the results of a retrospective analysis of long-term experimental data obtained by the authors during field studies of sea surface temperature fields in the World Ocean using infrared remote sensing, laboratory modelling, and shadowgraph (Toepler) imaging. The study examines the formation features of technogenic temperature anomalies from moving surface and underwater objects, including ship wakes, in the context of natural hydrophysical and hydrological conditions. Previously known informative features have been refined for different climatic zones, seasons, and meteorological conditions. The results of adapting a structural-textural method based on Haralick’s informative features (GLCM analysis) are described, enabling the identification of technogenic thermal disturbances. The findings contribute to the improvement of the information base for aerospace monitoring of marine areas for the observation and control of maritime conditions.

Keywords: aerospace monitoring, temperature anomalies, sea surface, informative features, ship wake, structural-textural analysis.

Рукопис статті отримано 15.08.2025

Надійшло остаточної версії: 15.09.2025

Публікація статті: 30.09.2025

Received 15.08.2025

Revised 15.09.2025

Accepted 30.09.2025