

УДК 556.08:528.83

## Результати моделювання температурних аномалій на водній поверхні дослідного басейну Інституту гідромеханіки НАН України

О. Д. Федоровський<sup>1</sup>, В. Ю. Філімонов<sup>2</sup>, І. О. Пестова<sup>1\*</sup>, С. С. Дугін<sup>1</sup>, В. Г. Якимчук<sup>1</sup>, А. В. Хижняк<sup>1</sup>, К. Ю. Суханов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ДУ «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України», Київ, Україна

<sup>2</sup> Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна

Представлено результати фізичного моделювання і дослідження температурних аномалій природного чи техногенного походження на водній поверхні, отриманих на базі дослідного басейну Інституту гідромеханіки Національної академії наук України на основі самохідної моделі, як генератора гідродинамічних процесів. В процесі обробки знімків була отримана інформація, яка дозволила значно розширити існуючі уявлення про механізм утворення аномалій на вільній поверхні при наявності гідродинамічних збурень від покладів вуглеводнів та рухомого зануреного об'єкту. Взаємодія виникаючих гідродинамічних збурень з приповерхневим водним шаром і виникнення на вільній морській поверхні демаскуючих температурних аномалій як у випадку з покладами вуглеводнів так і рухомого зануреного об'єкту багато у чому схожі. В якості інформативної ознаки дешифрування на знімках поверхні води температурних аномалій при наявності покладів вуглеводнів та рухомого зануреного об'єкту, запропоновано використання відмінності їх структуро-текстурних параметрів, шляхом обчислення значення «ентропії». Дешифрування температурних аномалій складається з двох етапів: навчання і власне дешифрування. Перший етап є навчанням з учителем, в ході якого система навчається за допомогою наявної множини знімків, на яких є тільки фон і не має покладів вуглеводнів чи рухомого зануреного об'єкту. Навчання виконується з метою визначення ознаки належності до фону або покладів вуглеводнів та рухомого зануреного об'єкту. Визначено, що фон має мінімальні значення ентропії, а з появою аномалії ентропія росте до максимального значення, після чого по мірі дисипації температурного сліду, починає падати до значень фону. Це підтверджує інформативність ознаки ентропії для дешифрування на аерокосмічних знімках морської поверхні оптичних аномалій техногенного і природного походження.

**Ключові слова:** температурні аномалії, дослідний басейн, ентропія, аерокосмічні знімки

© О. Д. Федоровський, В. Ю. Філімонов, І. О. Пестова, С. С. Дугін, В. Г. Якимчук, А. В. Хижняк, К. Ю. Суханов. 2018

Методи математичного моделювання не дозволяють у всіх деталях описати гідродинамічні процеси (ГДП), що відбуваються у водному середовищі. Крім того дослідження ГДП в реальних умовах є дуже коштовними і складними в реалізації. З цієї причини фізичний модельний експеримент у дослідному басейні чи швидкісному каналі є невід'ємною частиною досліджень температурних аномалій, які виникають на водній поверхні морських акваторій.

Метою роботи є представлення результатів моделювання і дослідження температурних аномалій природного чи техногенного походження на водній поверхні, отриманих на базі дослідного басейну інституту гідромеханіки НАН України на основі самохідної моделі, як генератора ГДП.

Температурні аномалії природного походження виникають, серед іншого, при наявності покладів вуглеводнів (ВВ). По розломних структурах літосфери шельфової зони газу з покладів вуглеводнів можуть розвантажуватися у водне середовище, утворюючи бульбашки, а також викликати утворення

внутрішніх хвиль, які, піднімаючись до водної поверхні, взаємодіють із нею і створюють температурні аномалії [3, 9].

Температурні аномалії техногенного походження створюються рухомими зануреними об'єктами (РЗО) у водному середовищі. При русі РЗО в стратифікованому водному середовищі утворюється так званий кільватерний слід, для якого характерна наявність кількох різномасштабних зон збудження гідрофізичних полів. Перша вузька зона, що розвивається на горизонтах близьких до горизонту руху об'єкта, зона турбулентної супутньої течії. Вона визначається дифузійними процесами переносу від об'єкту імпульсу, а також тепла та маси. Може супроводжуватись спливанням теплої води та бульбашок газу. Друга широка зона, що розвивається на різних горизонтах аж до вільної водної поверхні. Ця зона виникає за рахунок гідродинамічного тиску корпусу об'єкта та хвильовими рухами (корабельними внутрішніми хвилями (КВХ)) та акустичним полем об'єкту. Джерелом генерування КВХ у першу чергу є корпус об'єкту, який відхиляє лінії постійної щільності водного середовища від початкового ста-

\* E-mail: ipestova@casre.kiev.ua

ну. КВХ генеруються також за рахунок колапсу зони турбулентної супутньої течії [1, 4].

Гідрофізичні процеси у поверхневому шарі води над покладами вуглеводів чи рухомим зануреним об'єктом, формуючи його гідротермодинамічний режим, досить складні і багато в чому схожі. Це дозволяє на основі відповідних інформативних ознак використовувати методологію аерокосмічного моніторингу шельфу прибережної зони, а саме, виявляти у шельфі прибережної зони температурні аномалії різного походження [2].

Дослідження ГДП на границі розділу вода-атмосфера виконувались в багатьох роботах, наприклад, [5, 10]. Експерименти в натурних умовах і дослідному басейні з моделлю на буксирі описані в [6], але при цьому не були визначені інформативні ознаки, крім температури, які виникали на водній поверхні.

Для більш глибокого вивчення, моделювання ГДП й визначення інформативних ознак температурних аномалій нами були виконані дослідження в швидкісному дослідному басейні (гідродинамічному каналі) Інституту гідромеханіки (ІГМ) НАН України (рис. 1).



Рис. 1. Зовнішній вигляд швидкісного дослідного басейну — гідродинамічного каналу ІГМ НАНУ

Гідродинамічний канал має довжину 140 метрів, ширину 4 метри, глибину 1.8 метра і обладнаний візком для буксирування, який приводиться до руху гідроприводом за допомогою троса і призначений для буксирування моделей суден зі швидкістю до 10 м/с. Числа Рейнольдса при випробуваннях на цьому буксировочному візку досягають  $Re \sim 106$ . У басейні є система збирання та оброблення інформації, яка дозволяє здійснювати реєстрацію кінематичних характеристик буксировочного візка, зокрема швидкості буксирування та параметрів хвиль, що утворюються навколо моделей суден.

У якості генератора ГДП була використана самохідна модель з двома валами (рис. 2), яка рухалась по направляючому тросу і створювала гідродинамічні збурення.

Параметри моделі:

- максимальна довжина корпусу  $L, мм$  — 1300;
- діаметр корпусу  $d, мм$  — 120;



Рис. 2. Самохідна двохвальна модель

- діаметр гребного гвинта,  $мм$  — 45;
- кількість гвинтів — 2.

Експериментальні дослідження кільватерного сліду моделі РЗО були виконані на різних глибинах занурення  $H/d = 3$  та  $H/d = 4.5$ .

На рис. 3. наведені значення температури при проведенні експериментальних досліджень. Температура повітря дорівнювала  $21.0^{\circ}C$ .



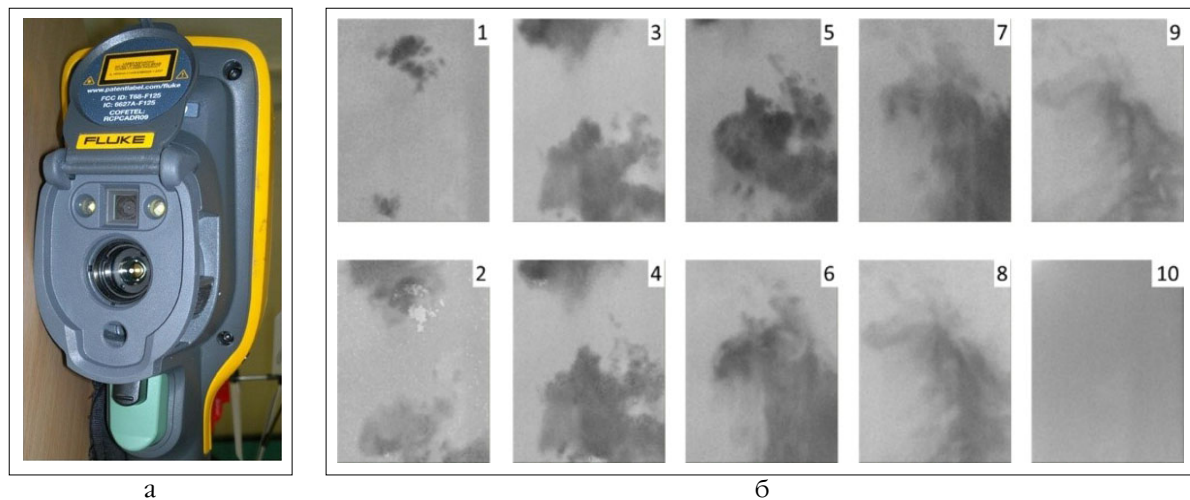
Рис. 3. Температурний розріз по глибині дослідного басейну — гідродинамічного каналу ІГМ НАНУ отриманий 29 червня 2016 року

Для реєстрації температурних аномалій застосовувався тепловізор з параметрами: спектральний діапазон 7.5 — 14  $мкм$ , кут зору 22.50 — 310, який дистанційно (2 м) вимірював температуру на ділянці  $0.5 см^2$  з точністю  $0.1^{\circ}C$  (рис. 4 а).

На рис. 4 б наведено результати моделювання утворення на водній поверхні температурних аномалій — знімки водної поверхні басейну, отриманні тепловізором в інфрачервоному спектральному діапазоні, що відображають фонову температуру (незбурена водна поверхня) і температурні аномалії викликані ГДП, різного часу існування.

З метою автоматизації процесу дешифрування на інфрачервоних космічних знімках оптичних аномалій природного і техногенного походження пропонується використовувати в якості інформативної ознаки ентропію [8].

Ентропія це міра хаосу й неупорядкованості системи, що проявляється в різних галузях і ентропію можна назвати унікальним фізичним поняттям: це єдина величина, що описує напрямок процесу і ха-



**Рис. 4.** Тепловізор (а); інфрачервоні знімки температурного фону і температурних аномалій різного часу існування на водній поверхні гідродинамічного каналу (б)

рактизує розсіювання енергії, зумовлене перетворенням усіх її видів на теплову і рівномірним розподілом тепла.

Виникнення аномалії від покладів ВВ або РЗО на температурному фоні морської поверхні має свої особливості. Якщо амплітуда розсіювання фону невелика, то наявність покладів ВВ або РЗО має збурити середовище. У цьому випадку середня амплітуда розкиду значень аномалії перевищить середній розкид значень фону, що призведе до збільшення ентропії аномалії. Якщо амплітуда фону велика, то поклади ВВ або РЗО структурують середовище, що має привести до зменшення ентропії. Тобто дешифрування покладів ВВ або РЗО виконується порівнянням значень ентропії для досліджуваних ділянок з попередньо визначеним пороговим інтервалом фону, як ознакою належності до фону. Якщо значення ентропії досліджуваної ділянки попадає в пороговий інтервал, то це фон, а якщо знаходиться за межами порогового інтервалу, то на цій ділянці наявні поклади ВВ або РЗО.

Дешифрування температурних аномалій складається з двох етапів: навчання і власне дешифрування. Перший етап є навчанням з учителем, в ході якого система навчається за допомогою наявної множини знімків, на яких є тільки фон і не має покладів ВВ та РЗО. Навчання виконується з метою визначення ознаки належності до фону або покладів ВВ і РЗО.

**Перший етап.** Для визначення ознаки належності фону будуємо гістограму значень пікселів фону і оцінюємо ентропію за формулою [7, 8]:

$$H = -\sum_{i=0}^{N-1} P_i \log_2(P_i), \quad (1)$$

де  $N$  — число квантів зображення,  $P_i$  — частота появи  $i$ -го значення,  $X$  і  $Y$  — ширина й висота зображення в пікселях, а  $C_i$  — число  $i$ -х значень в зображенні.

Будемо називати ознакою належності до фону

значення ентропії у пороговому інтервалі  $(T_F^L, T_F^U)$  від найменшого значення  $T_F^L$  до найбільшого  $T_F^U$ :

$$T_F^L = \bar{H}_F - \sigma_F, \quad (2)$$

$$T_F^U = \bar{H}_F + \sigma_F, \quad (3)$$

де  $\bar{H}_F$  — середнє арифметичне значень ентропії фону,  $\sigma_F$  — середнє квадратичне відхилення значень ентропії фону.

**Другий етап.** Дешифрування оптичних аномалій природного і техногенного походження на аерокосмічних інфрачервоних знімках морської поверхні пропонується виконувати методом визначення ентропії на контрольованій ділянці  $H_K$  і наступною перевіркою попадання чи непопадання її в пороговий інтервал фону. Якщо ентропія контрольованої ділянки  $H_K$  задовольняє виразу:

$$T_F^L \leq H_K \leq T_F^U, \quad (4)$$

то відносимо ділянку до фону, а якщо  $H_K$  задовольняє умовам:

$$H_K > T_F^U \text{ або } H_K < T_F^L, \quad (5)$$

тобто за межами інтервалу (4) — це означає наявність ПВВ або РЗО.

Запропонований спосіб реалізується такою послідовністю дій (рис. 5):

**Перший етап:**

1. Створення бази даних космічних знімків (КЗ) інфрачервоного діапазону морського шельфу, на яких є тільки фон і не має покладів ВВ та РЗО (блок 1).
2. Визначення для кожного з КЗ морської шельфу з п.1 значень параметра ентропія за формулою (1), (блок 2).

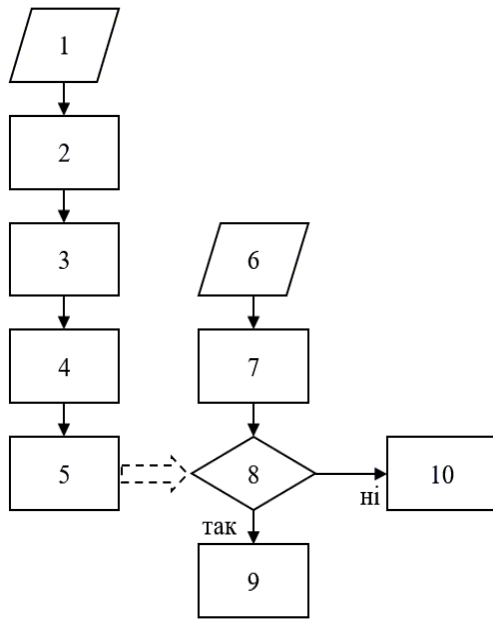


Рис. 5. Алгоритм дешифрування оптичних аномалій на водній поверхні

3. Обчислення усередненого значення параметра ентропія для всіх значень ентропії КЗ, одержаних в п.2 (блок 3).
4. Обчислення середньоквадратичного відхилення значення параметра ентропія для всіх значень ентропії КЗ, одержаних в п.2 (блок 4).
5. Визначення порогових значень фону та у відповідності до виразів (2, 3) (блок 5).

**Другий етап:**

6. Одержання аерокосмічного знімка у інфрачервоному діапазоні досліджуваної ділянки акваторії морського шельфу (блок 6).
7. Визначення для досліджуваної ділянки на КЗ морської поверхні параметра ентропія за формулою (1), (блок 7).
8. У блоці 8 виконується порівняння визначеної для досліджуваної ділянки ентропії в блоці 7 з пороговим інтервалом. Якщо значення ентропії досліджуваної ділянки попадає в пороговий інтервал (4), це фон (блок 9), якщо знаходиться за межами інтервалу (5) то наявна аномалія від покладів ВВ або РЗО (блок 10).

Результати обчислення параметра ентропія представлено графічно на рис. 6, де по вертикальній осі — значення ентропії  $H$ , а по горизонтальній — час існування оптичної аномалії —  $N$ . Крайні точки на кривих відповідають значенням ознак для фону.

З графіка рис. 6 видно, що фон має мінімальні значення ентропії  $H$ , а з появою аномалії ентропія росте до максимального значення, після чого по мірі дисипації температурного сліду, починає падати до значень фону, що підтверджує інформативність ознаки ентропія для дешифрування на

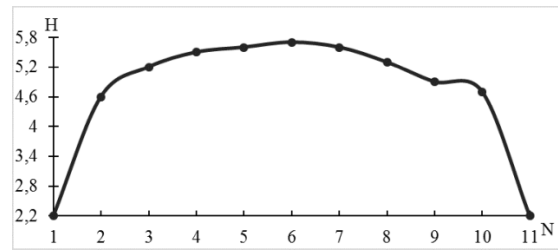


Рис. 6. Результати обчислення параметра  $H$  – ентропія для фону і температурних аномалій різного часу існування на водній поверхні гідродинамічного каналу

аерокосмічних знімках морської поверхні оптичних аномалій техногенного і природного походження.

**Висновки**

Результати фізичного моделювання в гідродинамічному каналі й оброблення знімків дозволили значно розширити існуючі уявлення про механізм утворення аномалій на вільній поверхні при наявності гідродинамічних збурень від покладів ВВ і РЗО. Взаємодія виникаючих гідродинамічних збурень з приповерхневим водним шаром і виникнення на вільній морській поверхні демаскуючих температурних аномалій як у випадку з покладами ВВ, так і РЗО багато у чому схожі.

Необхідне продовження вивчення фізичної природи поверхневих температурних аномалій в гідродинамічному басейні з збереженням неперервності у реєстрації зображення температурної аномалії в режимі сканування.

**Література**

1. Клейтон Б. Механика морских судов. Л.: Судостроение, 1986. 434 с.
2. Лялько В. И. Перерва В. М., Костюченко Ю. В. Теоретико-методические основы и результаты поисков газовых месторождений на шельфе Черного моря с использованием материалов космических схемок *Геология и полезные ископаемые Черного моря*. К.: 1999. С. 67–79.
3. Перерва В. М., Костина Т. И. Геофлюидодинамические структуры литосферы и диапиризм. *Доп. НАН України*. 2002. № 2. С. 131–136.
4. Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые двигатели / под ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. 68 с.
5. Федоровский А. Д., Никифорович Е. И., Приходько Н. А. Процессы переноса в системах газ-жидкость. К.: Наукова думка, 1988. 255 с.
6. Федоровский А. Д., Никифорович Е. И., Филимонов В. Ю. Термическая структура границы раздела воздух-вода и оптические методы ее исследования. Тр. междунар. конф. *Гидродинамика и физические процес-*

- сы в жидкостях и в дисперсных системах. Прага, 24–26 мая, 1983. С. 317–320.
7. Федоровский А. Д., Федоровский А. Д., Якимчук В. Г., Рябоконеко С. А., Пахомов И. П., Суханов К. Ю. Дешифрирование космических снимков ландшафтных комплексов на основе структурно-текстурного анализа. *Космічна наука і технологія*. 2002. Т. 8. № 2/3. С. 76–83.
  8. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Изд. иностр. лит., 2002. С. 259–268.
  9. Шнюков Е. Ф., Шнюков Е. Ф., Старостенко В. И., Коблев В. П. и др. Геологические исследования. *Геол. журн.* 2004. 26. №4. С. 116–132.
  10. McAlister E. D. Measurement of total heat flow from the sea surface. *Appl. Opt.* 1964. № 5 b. P. 188–201.
- References**
1. Kleyton B (1986). L.: Shipbuilding, pp. 434.
  2. Lyalko V. I., Pererva V. M., Kostyuchenko Yu. V. (1999). Theoretical and methodological foundations and the results of the search for gas fields on the shelf of the Black Sea with the use of materials of space shemek. *Geology and minerals of the Black Sea* (pp. 67–79). Kiev .
  3. Pererva V. M, Kostina T. I. (2002). Geofluidodynamic structures of the lithosphere and diapirism. *Dop. NAN Ukrainy*, no. 2, pp. 131–136.
  4. Voytkunskogo Ya. I. (ed.) (1985). Handbook on the theory of the ship: In three volumes. Volume 1./ Hydromechanics. Resistance to the movement of ships. Ship propulsion. L.: Shipbuilding, pp. 768.
  5. Fedorovskiy A. D. (1988) Transport processes in gas-liquid systems. Kiev: Naukova Dumka, pp. 255.
  6. Fedorovskiy A. D., Nikiforovich E. I., Filimonov V. Yu. (1983). Thermal structure of the air-water interface and optical methods for its study. Tr. International conf. Hydrodynamics and physical processes in liquids and dispersed systems, Prague, May 24–26, pp. 317–320.
  7. Fedorovskiy A. D., Yakimchuk V. G., Ryabokonenko S. A., Pakhomov I. P., Sukhanov K. Yu. (2002). Interpretation of satellite images of landscape complexes based on structural and texture analysis. *Kosmichna nauka i tekhnologhija*, vol. 8, no. 2/3, pp. 76–83.
  8. Shennon K. (2002). Works on information theory and cybernetics. M: Izd. foreign lit., pp. 259–268.
  9. Shnyukov E F, Starostenko V. I., Koble V. P. (2004). Geological studies. *Geof. zburn.*, vol. 26, no. 4, pp. 116–132.
  10. McAlister E. D. (1964). Measurement of total heat flow from the sea surface. *Appl. Opt.*, no. 5 b, pp. 188–201.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ АНОМАЛИЙ НА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО БАССЕЙНА ИНСТИТУТА ГИДРОМЕХАНИКИ НАН УКРАИНЫ

А. Д. Федоровский, В. Ю. Филимонов, И. А. Пестова, С. С. Дугин, В. Г. Якимчук, А. В. Хижняк, К. Ю. Суханов

Представлены результаты физического моделирования и исследования температурных аномалий природного или техногенного происхождения на водной поверхности, полученных на базе исследовательского бассейна Института гидромеханики Национальной академии наук Украины на основе самоходной модели, как генератора гидродинамических процессов. В процессе обработки снимков была получена информация, которая позволила значительно расширить существующие представления о механизме образования аномалий на свободной поверхности при наличии гидродинамических возмущений от залежей углеводородов и подвижного погруженного объекта. Взаимодействие возникающих гидродинамических возмущений с приповерхностным водным слоем и возникновение на свободной морской поверхности демаскирующих температурных аномалий как в случае с залежами углеводородов, так и подвижного погруженного объекта во многом похожи. В качестве информативного признака дешифрирования на снимках поверхности воды температурных аномалий при наличии залежей углеводородов и подвижного погруженного объекта, предложено использование различия их структурно-текстурных параметров, путем вычисления значения “энтропии”. Дешифрирование температурных аномалий состоит из двух этапов: обучения и собственно дешифрирования. Первый этап является обучением с учителем, в ходе которого система учится с помощью имеющейся множества снимков, на которых только фон и нет залежей углеводородов или подвижного погруженного объекта. Обучение выполняется с целью определения признаков принадлежности к фону или залежам углеводородов, подвижному погруженному объекту. Определено что фон имеет минимальные значения энтропии, а с появлением аномалии энтропия растет до максимального значения, после чего по мере диссипации температурного следа, начинает падать до значений фона. Это подтверждает информативность признака энтропии для дешифрирования на аэрокосмических снимках морской поверхности оптических аномалий техногенного и природного происхождения.

**Ключевые слова:** температурные аномалии, опытный бассейн, энтропия, аэрокосмические снимки

#### RESULTS OF MODELING TEMPERATURE ANOMALIES ON THE WATER SURFACE OF THE RESEARCH BASIN OF THE INSTITUTE OF HYDROMECHANICS NAS OF UKRAINE

O. D. Fedorovsky, V. Yu. Filimonov, I. O. Piestova, S. S. Dugin, V. G. Yakimchuk, A. V. Khyzhniak, K. Yu. Sukhanov

The results of the research and physical modeling of temperature anomalies of natural or man-made origin on the water surface are presented. The information for the research was obtained from the experimental basin of the Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine from the self-propelled model as the generator of hydrodynamic processes. The information obtained after image processing allowed to significantly expand the existing ideas about the mechanism of

formation of anomalies on the open surface with the hydrodynamic disturbances from hydrocarbon deposits and moving submerged object. The interaction of the emerging hydrodynamic disturbances with the near-surface water layer and the occurrence of unmasking temperature anomalies on the open sea surface have a lot in common between the hydrocarbon deposits and the moving submerged object. The application of the difference of the above structural and textural parameters by calculating the value of “entropy” has been proposed as the informative feature for decoding the images of the water surface with the presence of hydrocarbon deposits or moving immersed objects. The decoding of temperature anomalies consists of two stages: learning and proper decoding. The first stage is the supervised learning, during which the system is being researched using the existing set of images, in which only the background and no hydrocarbon deposits or moving submerged object. Training is carried out in order to determine the signs of belonging to the background or hydrocarbon deposits, moving submerged object. It was determined that the background has minimal entropy values, and with the appearance of an anomaly, the entropy grows to the maximum value, after which, as the temperature trace dissipates, it begins to fall to background values. This confirms the informativity of the entropy feature for decoding the optical anomalies of man-made and natural origin on the sea surface from aerial photos.

**Keywords:** temperature anomalies, experimental pool, entropy, aerospace images