

<https://doi.org/10.15407/knit2021.02.038>

УДК 556.08:528.83

**О. Д. ФЕДОРОВСЬКИЙ**<sup>1</sup>, зав. відділу, чл.-кор. НАН України, д-р фіз.-мат. наук, проф.,  
Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки (2005 р.)

E-mail: adfedorovsky@ukr.net

**А. В. ХИЖНЯК**<sup>1</sup>, наук. співроб., канд. техн. наук

E-mail: avsookolovska@gmail.com

**В. Ю. ФІЛІМОНОВ**<sup>2</sup>, старш. наук. співроб., канд. техн. наук

<sup>1</sup> Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі

Інституту геологічних наук Національної академії наук України»

вул. О. Гончара 55-6, Київ 54, Україна, 01601

<sup>2</sup> Інститут гідромеханіки Національної академії наук України

вул. Желябова 8/4, Київ 57, Україна, 03680

## ОБҐРУНТУВАННЯ ПОДВІЙНОГО ВИКОРИСТАННЯ АЕРОКОСМІЧНОГО ГЕОМОНІТОРИНГУ МОРСЬКОГО ШЕЛЬФУ ДЛЯ ПОШУКУ ПОКЛАДІВ ВУГЛЕВОДНІВ І «ОСВІТЛЕННЯ» МОРСЬКОЇ ОБСТАНОВКИ

*Гідрофізичні процеси у поверхневому шарі води над покладами вуглеводнів чи рухомих занурених об'єктів, що формують його гідротермодинамічний режим, багато в чому схожі. Це дозволяє на основі відповідних інформативних ознак використовувати методологію аерокосмічного моніторингу морського шельфу подвійного призначення, а саме: для пошуку покладів вуглеводнів і контролю несанкціонованого проникнення занурених рухомих об'єктів шляхом освітлення морської обстановки.*

*Мета даної роботи полягає в обґрунтуванні подвійного використання методології аерокосмічного геомоніторингу морського шельфу шляхом вибору відповідних інформативних ознак, однією з яких є зміна структури і текстури приповерхневого шару води під впливом вуглеводнів і занурених рухомих об'єктів.*

*В результаті ретроспективного аналізу і оброблення архівних експериментальних матеріалів результатів досліджень особливостей процесу формування температурних аномалій природного і техногенного походження було перевірено кілька десятків різних параметрів Хараліка і обрано для подальшого використання п'ять найбільш інформативних з них: Contrast, Sum Variance, Sum Entropy, Entropy, Difference Entropy.*

*Дослідження провадилися у три етапи. По-перше, досліджено і оброблено дані про температурні аномалії природного походження на морській поверхні, отриманих за допомогою космічних апаратів, які виникають при наявності покладів вуглеводнів. По-друге, виконано аналіз і обробку матеріалів моделювання на водній поверхні дослідного басейну температурних аномалій природного і техногенного походження на основі генератора гідродинамічного збурення — заглибленої самохідної моделі при русі у стратифікованому водному середовищі. І по-третє, опрацьовано архівні дані змін температури морської поверхні після проходження рухомих занурених об'єктів, що були зареєстровані ІЧ-апаратурою, розміщеного на морській платформі і на борту корабля.*

*У результаті досліджень були визначені інформативні ознаки температурних аномалій, які відмінні від фону і порівняно з останнім дешифруються на космічному знімку, що підтверджує можливість подвійного використання методології аерокосмічного геомоніторингу морського шельфу.*

**Ключові слова:** аерокосмічний геомоніторинг, морський шельф, методологія, температурні аномалії, поклади вуглеводнів, рухомі об'єкти.

Цитування: Федоровський О. Д., Хижняк А. В., Філімонов В. Ю. Обґрунтування подвійного використання аерокосмічного геомоніторингу морського шельфу для пошуку покладів вуглеводнів і «освітлення» морської обстановки. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 2 (129). С. 38—44. <https://doi.org/10.15407/knit2021.02.038>

Методологія аерокосмічного геомоніторингу морського шельфу при пошуку покладів вуглеводнів і одночасному виявленні несанкціонованого проникнення в акваторію рухомих об'єктів повинна бути забезпечена інформацією про об'єкти, а саме про інформативні ознаки, які демаскують ці об'єкти. Особливо це стосується занурених об'єктів, інформативні ознаки яких мало вивчалися. Тому дослідження, описане нижче, переважно присвячено останнім.

Гідрофізичні процеси у поверхневому шарі води над покладами вуглеводнів чи рухомими зануреними об'єктами, які формують його гідротермодинамічний режим, багато в чому схожі. Демаскуючими факторами в обох випадках є температурні аномалії, що виникають на морській поверхні над покладами вуглеводнів і рухомих об'єктів. Це дозволяє на основі відповідних інформативних ознак використовувати методологію аерокосмічного моніторингу морського шельфу подвійного використання, а саме — виявляти у шельфі прибережної зони температурні аномалії різного походження: пошуку покладів вуглеводнів і освітлення морської обстановки від несанкціонованого проникнення рухомих об'єктів.

Визначення інформативних ознак температурних аномалій природного і техногенного походження виконується на основі ретроспективного аналізу і оброблення архівних матеріалів фізичного моделювання процесу формування температурних аномалій від покладів вуглеводнів і занурених рухомих об'єктів на водній поверхні дослідного басейну [6] і вільній морській поверхні акваторії північно-західного шельфу Чорного моря [1].

Велике значення при дешифруванні космічних знімків морської поверхні має вибір інформативної ознаки. Дослідження гідрофізичних процесів на границі розділу вода — атмосфера виконувались у багатьох роботах, зокрема [5, 7], але при цьому не визначались інші інформативні ознаки, крім температури. Такими є зміна структури і текстури приповерхневого шару води під впливом вуглеводнів і занурених рухомих об'єктів, які тепер є одними з важливих ознак і методів при аналізі та класифікації зображень відповідних аномалій.

У способі, що пропонується, використовуються структурно-текстурні ознаки температурних аномалій, а саме розмірів і форм контурів поверхні зображень аномалій, орієнтації і взаємного розташування їхніх складових. Відповідне підвищення імовірності прогнозування і ефективності пошуку вуглеводнів зумовлене тим, що структурно-текстурні характеристики служать більш стійкою демаскувальною інформативною ознакою на морській поверхні, ніж температура.

За простотою і компактністю описів вони значно перевершують морфологічні ознаки, їх можна порівняти з інваріантами моментів або стохастичними інваріантами. Текстурні характеристики, незважаючи на сезонну мінливість погоди, зберігають якісну і кількісну оцінку протягом усього часу пошуку покладів вуглеводнів і рухомих об'єктів. В основі цих ознак лежить поняття текстури — найважливішої характеристики зорових моделей зображень. Текстура представляється оцінками статистик енергетичних і просторово-енергетичних розподілів (так званих амплітудних і амплітудно-фазових ознак), оцінками автокореляційних і взаємкореляційних функцій (кореляційних ознак), спектрів просторових частот (спектральних ознак) або геометричних і енергетичних параметрів Реона — локальних ознак.

Найбільш часто в практиці дистанційного зондування Землі застосовуються такі текстурні перетворення [4]:

- лінійні ортогональні перетворення: Фур'є, Адамара, Хаара, похиле перетворення та ін. В цьому випадку текстурованим спектром є відповідно спектр Фур'є, Адамара, Хаара та ін., а текстурною частотою — його двовимірний аргумент;

- автокореляційні перетворення. Текстурованим спектром є автокореляційна функція, а текстурною частотою — двовимірне зміщення;

- гістограма. Текстурованим спектром є гістограма яскравості, а роль одновимірної текстурної частоти виконує значення яскравості. Зазвичай використовуються похідні текстурної ознаки: середнє, дисперсія та ін.

В даній роботі за інформативні текстурні характеристики зображень температурних ано-

малій і фону на вільній морській поверхні вибрано параметри Хараліка [8]. В результаті ретроспективного аналізу і оброблення архівних матеріалів процесу формування температурних аномалій природного і техногенного походження було перевірено кілька десятків різних параметрів Хараліка і обрано для подальшого використання п'ять найбільш інформативних з них (табл. 1).

На авіакосмічних знімках морської поверхні спостерігаються температурні аномалії різного походження. Природні теплові аномалії виділяються по відношенню «сигнал/шум», де як шум розглядалися температурні варіації в даному місці в даний час протягом усього періоду спостережень, які викликані метеорологічними та іншими факторами, не пов'язаними з наявністю покладів вуглеводнів і рухомих об'єктів.

При наявності покладів вуглеводнів на морській поверхні так само виникають температурні аномалії природного походження. По розломних структурах літосфери шельфової зони газу з покладів вуглеводнів можуть вивільнятися у водне середовище, утворюючи бульбашки, які при інтенсивному потоку флюїдів створюють ерліфтний процес — підняття флюїдним потоком холодних глибинних вод до морської поверхні [9].

Таблиця 1. Параметри Хараліка і відповідні формули

Ознаки	Формули
Contrast	$\sum_i \sum_j (i-j)^2 p(i,j)$
Sum Variance	$\sum_{k=2}^{2N} (k-\mu_{x+y})^2 p_{x+y}(k)$
Sum Entropy	$-\sum_{k=2}^{2N} p_{x+y}(k) \lg p_{x+y}(k)$
Entropy	$-\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p(i,j) \lg p(i,j)$
Difference Entropy	$-\sum_{k=0}^{N-1} p_{x-y}(k) \lg p_{x-y}(k)$

По-друге, при наявності у стратифікованій водній товщі градієнтів щільності рухомі флюїди викликають утворення внутрішніх хвиль, які поширюються з області збурення до вільної водної поверхні у вигляді внутрішніх хвиль. Частота цих хвиль відома як частота Брента — Вайсяля, що зумовлює коливальні рухи у стратифікованому водному середовищі. Утворені внутрішні хвилі, досягаючи водної поверхні, викликають зміни гідрофізичних характеристик приповерхневого шару води, які відображаються на морській поверхні як аномалії поверхневої температури, а у приповерхневому шарі — як зміни градієнта температури що, природно, відображається на вільній водній поверхні як теплі аномалії [3].

На рис. 1 наведено фрагмент космічного знімка (КЗ NOAA, 4 канал (10.3...11.3 мкм) з температурною аномалією над родовищем вуглеводнів «Голіцина» (за даними О. Ю. Котляра), де видно, що на морській поверхні є як холодні аномалії (темні плями), так і теплі (світлі плями), тобто, можна припустити, що діють два процеси формування поверхневої температурної аномалії: бульбашки і внутрішні хвилі. З табл. 2 видно, що для усіх параметрів Хараліка аномалія покладів вуглеводнів має максимальне значення відносно температурного фону.

Для детального визначення механізму виникнення на водній поверхні температурних аномалій необхідно виконати моделювання процесу. Методи математичного моделювання не дозволяють у всіх деталях описати гідрофізичні і гідродинамічні процеси, що відбуваються у водному середовищі. 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.

Температурні аномалії техногенного походження створюються рухомими зануреними об'єктами у водному середовищі. При русі моделі у 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, — це зона

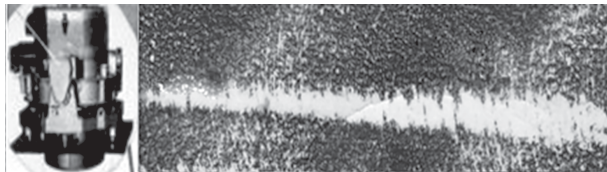


**Рис. 1.** Температурна аномалія над покладами вуглеводнів «Голіцина» (космічний знімок NOAA у  $\lambda = 10.3...11.3$  мкм, надав О. Ю. Котляр)

**Таблиця 2.** Значення параметрів Хараліка над покладами вуглеводнів «Голіцина»

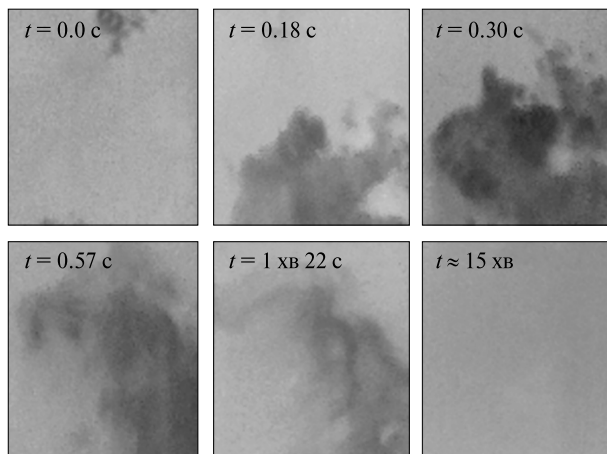
Параметри Хараліка	Аномалія	Фон
Contrast	4.88	0.01
Sum Variance	288	0.37
Sum Entropy	4.24	0.41
Entropy	5.18	0.42
Difference Entropy	1.93	0.08

турбулентної супутньої течії. Вона визначається дифузійними процесами переносу від об'єкта імпульсу, а також тепла та маси. Може супроводжуватись спливанням холодної 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 хвилювими рухами (корабельними внутрішніми хвилями (КВХ) та акустичним полем об'єкта). Джерелом генерування КВХ у першу чергу є корпус об'єкта, який відхиляє лінії постійної щільності



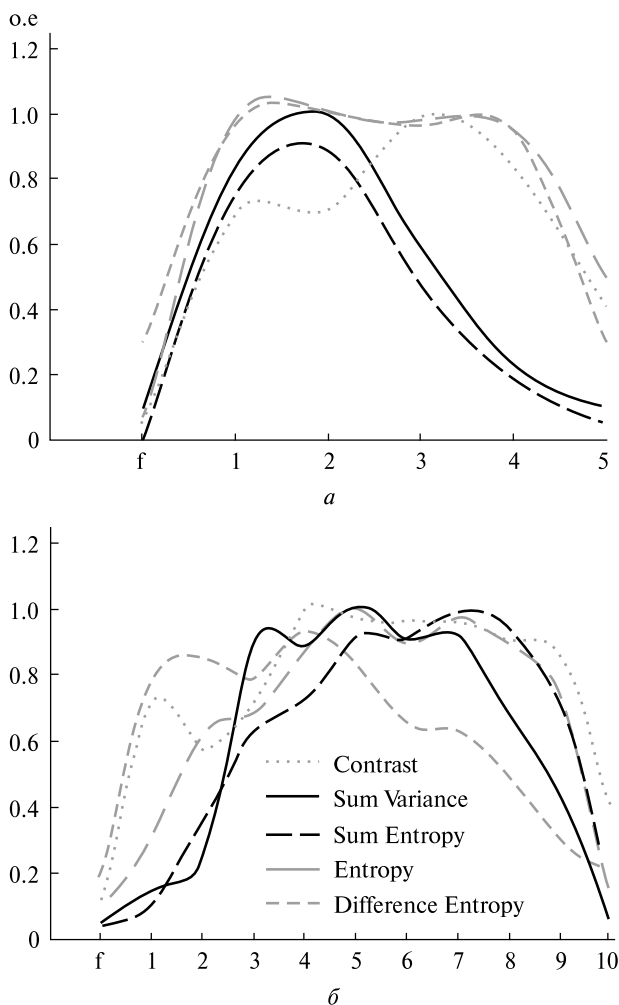
**Рис. 2.** Зображення температурних аномалій, отриманих за допомогою сканувального тепловізора

**Рис. 3.** Зображення температурних аномалій, отриманих за допомогою дискретного інфрачервоного тепловізора



водного середовища від початкового стану. КВХ генеруються також за рахунок колапсу зони турбулентної супутньої течії.

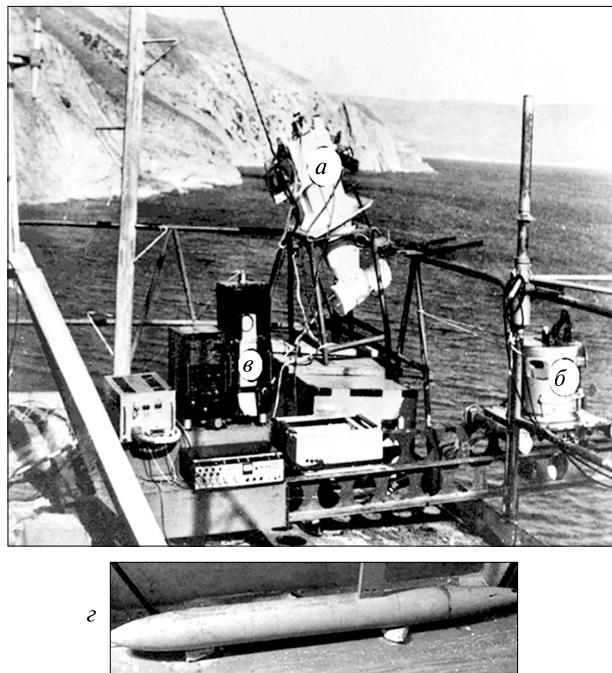
Для реєстрації температурних аномалій у різні періоди застосовувалися тепловізори: сканувальний з спектральним діапазоном  $3.5...5.2$  мкм, поле зору  $120^\circ$  (рис. 2) і дискретний інфрачервоний (рис. 3) з спектральним діапазоном  $7.5...14$  мкм, поле зору  $22.5...31^\circ$ , які дистанційно (2 м) вимірювали температуру на ділянці  $0.5...10$  см<sup>2</sup> з похибкою  $0.1$  °С. Зйомка дискретним ІЧ-тепловізором виконувалася співробітниками ЦАКДЗ.



**Рис. 4.** Результати обчислення по ряду параметрів Хараліка: *a* — по даних сканувального тепловізора, *b* — по даних дискретного ІЧ-тепловізора

Для наочності на рис. 4 представлено обчислені значення  $H$  ряду параметрів Хараліка (по горизонтальній осі — час життя аномалії). Центральна зона кривих відповідає температурній аномалії, край — фону.

Для дослідження у морських умовах поверхневих інформативних ознак, що демаскують занурені рухомі об'єкти, було використано морську платформу (рис. 5) і корабель. Для реєстрації застосовувався інфрачервоний радіометр (рис. 5, *a*), високочутливий сканувальний тепловізор (рис. 5, *б*) з параметрами: спектральний діапазон 3.5...5.2 мкм, просторове розрізнення на водній



**Рис. 5.** Морська платформа з апаратурою: *a* — ІЧ-радіометр, *б* — сканувальний тепловізор, *в* — система реєстрування, модель гідродинамічного збурення, *з* — заглиблена самохідна модель

поверхні 1 м, система реєстрування на електрохімічний папір (рис. 5, *в*). Під час експерименту заглиблена самохідна модель рухалась під платформою на глибинах до 10 м (рис. 5, *з*). Реєструвальна апаратура фіксувала зміну температури водної поверхні в ІЧ-області спектру після проходження моделі занурених рухомих об'єктів.

На рис. 6 приведено архівні результати експерименту. При русі заглибленої моделі у стратифікованому водному середовищі на горизонті руху утворюється зона гідродинамічного збурення у вигляді турбулентної супутної течії, а на поверхні води — кільватерний слід у вигляді уривчастих температурних аномалій. Дугоподібне зображення температурних аномалій пов'язане з відношенням між швидкостями сканування, моделі і протяжки паперу. Було виконано обчислення значення параметрів Хараліка температурних аномалій по інфрачервоних зображеннях. У табл. 2 приведено значення параметрів Хараліка для температурних аномалій і фону, які найбільше відрізняються між собою.

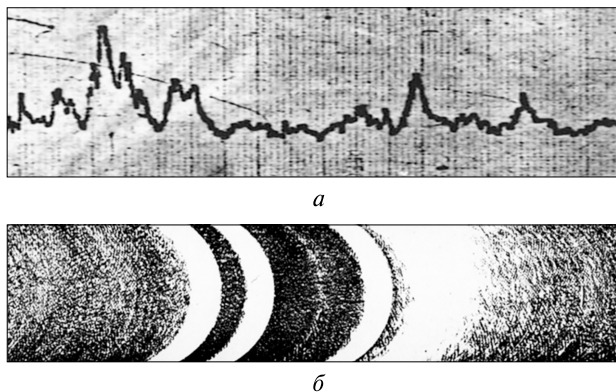


Рис. 6. Запис сигналу від температурної аномалії на морській поверхні: *а* — осцилограма радіотермометра, *б* — двовимірний запис на електрохімічному папері сканувального тепловізора

## ВИСНОВКИ

1. Запропоновано і обґрунтовано подвійне призначення аерокосмічного геомоніторингу морського шельфу: для пошуку покладів вуглеводнів і освітлення акваторії шельфу від несанкціонованого проникнення рухомих об'єктів. Отримані результати експерименту служать основою для формування інформативних ознак температурних аномалій природного і техногенного походження.

2. Виявлено інформативність конкретних структурно-текстурних ознак, а саме: *Contrast*, *Sum Variance*, *Sum Entropy*, *Entropy*, *Difference Entropy*, як для пошуку вуглеводнів, так і для виявлення рухомих об'єктів. Крім того, встановлено їхню взаємну ідентичність на основі аналізу і обробки архівних статистичних експериментальних матеріалів морських експедицій.

3. Встановлено залежність «щільності» температурних аномалій від часу «життя», запропоновано коефіцієнт «щільності» температурної аномалії  $K_{щ}$ , як інформативну ознаку наявності рухомих об'єктів і покладів вуглеводнів.

4. Встановлено провідну роль внутрішніх хвиль у формуванні демаскувальних температурних аномалій від покладів вуглеводнів і рухомих об'єктів у перші хвилини «життя», з розвитком аномалій було зафіксовано як холодні, так і теплі аномалії, що підтверджує суттєву роль у формуванні аномалій від покладів вуглеводнів і рухомих об'єктів обох процесів: бульбашок і внутрішніх хвиль.

5. Отримані результати експерименту служать основою формування інформативних ознак для пошуку температурних аномалій природного і техногенного походження.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Акимов Е. А., Станичний С. В., Полонский А. Б. Использование данных сканера SEVIRI для оценки температуры поверхностного слоя Черного моря. *Мор. гидрофиз. журн.* 2014. № 6. С. 37—46.
2. Колодій В. В., Колодій І. В. Флюїдодинаміка шельфової частини Північно-Причорноморського нафтогазоносного басейну. *Геолог України.* 2004. № 1. С. 41—44.
3. Патент України № 108696. Лялько В. І., Федоровський О. Д., Якимчук В. Г., Соколовська А. В., Воробійов А. І. Спосіб прогнозування покладів газу на морському шельфі.
4. Станкевич С. А., Седлерова О. В. Інтеграція дистанційних та геолого-геофізичних просторових даних при пошуку вуглеводнів на морському шельфі. *Геоінформатика.* 2007. № 3. С. 77—81.
5. Товстюк З. М., Єфіменко Т. А., Седлерова О. В., Лазаренко І. В., Головащук О. П. *Виявлення прогнозних об'єктів, перспективних на поклади вуглеводнів, на північно-західному шельфі Чорного моря за даними космогеологічних досліджень.* Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. Київ: ТОВ «Карбон-сервіс», 2009. С. 186—190.
6. Федоровський О. Д., Філімонов В. Ю., Пестова І. О., Дугін С. С., Якимчук В. Г., Хижняк А. В., Суханов К. Ю. Результати моделювання температурних аномалій на водній поверхні дослідного басейну Інституту гідромеханіки НАН України. *Укр. журн. дистанційного зондування Землі.* 2018. № 19. С. 40—45. doi.org/10.36023/ujrs.2018.19.137.
7. Шнюков Е. Ф., Старостенко В. И., Кобелев В. П. и др. Геологические исследования. *Геофиз. журн.* 2004. 26, № 4. С. 116—132.
8. Haralick R. M. Statistical and structural approaches to texture. *Proc. IEEE.* 1979. 67, № 5. P. 786.
9. McAlister E. D. Measurement of total heat flow from the sea surface. *Appl. Opt.* 1964. 5(6). P. 188.

Стаття надійшла до редакції 10.04.2020; після доопрацювання 15.10.2020

## REFERENCES

1. Akimov E. A., Stanichny S. V., Polonsky A. B. (2014). Using SEVIRI scanner data to estimate the surface temperature of the Black Sea. *Marine Hydrophysical J.*, № 6, 37–46 [in Russian].
2. Kolodiy V. V., Kolodiy I. V. (2004). Fluidodynamics of the shelf part of the North Black Sea oil and gas basin. *Geologist of Ukraine*, № 1, 41–44 [in Ukrainian].
3. Patent of Ukraine N 108696. (2015). Lyalko V. I., Fedorovsky O. D., Yakymchuk V. G., Sokolovska A. V., Vorobyev A. I. Method of forecasting gas deposits on the sea shelf.
4. Stankevich S. A., Sedlerova O. V. (2007). Integration of remote and geological-geophysical spatial data in the search for hydrocarbons on the sea shelf. *Geoinformatics*, № 3, 77–81 [in Ukrainian].
5. Tovstyyuk Z. M., Efimenko T. A., Sedlerova O. V., Lazarenko I. V., Golovashchuk O. P. (2009). Identification of forecast objects promising for hydrocarbon deposits on the north-western shelf of the Black Sea according to cosmogeological studies. *Theoretical and applied aspects of geoinformatics*, 186–190 [in Ukrainian].
6. Fedorovsky A. D., Filimonov V. Yu., Piestova I. O., Dugin S. S., Yakymchuk V. G., Khyzhniak A. V., Sukhanov K. Yu. (2018). Result of modeling temperature anomalies on the water surface of the research basin of the institute of hydromechanics NAS of Ukraine. *Ukr. J. Remote Sensing*, **19**, 40–45 [in Ukraine]. doi.org/10.36023/ujsr.2018.19.137.
7. Shnyukov E. F., Starostenko V. I., Kobelev V. P. (2004). Geological exploration. *Geophys. J.*, **26**, № 4, 116–132 [in Russian].
8. Haralick R. M. (1979). Statistical and structural approaches to texture. *Proc. IEEE*, **67**, № 5, 786.
9. McAlister E. D. (1964) Measurement of total heat flow from the sea surface. *Appl. Opt.*, **5**(6), 188.

Received 10.04.2020

Revised 15.10.2020

O. D. Fedorovskiy<sup>1</sup>, Head of Department, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dr. Sci. in Phys. & Math., Professor, the Winner of State Awards in Science and Technology of Ukraine (2005)

E-mail: adfedorovsky@ukr.net

A. V. Khyzhniak<sup>1</sup>, Researcher, Ph.D. in Tech.

E-mail: avokolovska@gmail.com

V. Yu. Filimovov<sup>2</sup>, Senior Researcher (staff), PhD in Tech.

<sup>1</sup> State Institution “Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Science of the National Academy of Sciences”  
55-b O. Honchara Str., Kyiv 54, 01601 Ukraine

<sup>2</sup> Institution of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine  
8/4 Zheliabova Str., Kyiv 57, 03680 Ukraine

## JUSTIFICATION OF THE DUAL-USE OF AEROSPACE GEOMONITORING OF THE OFFSHORE SHELF: EXPLORATION OF HYDROCARBON DEPOSITS AND “HIGHLIGHTING” THE MARINE SITUATION

Hydrophysical processes in the surface water layer over the hydrocarbon deposits or moving submerged objects that form its hydrothermodynamic regime are very similar. The purpose of this work is to justify the dual-use of the aerospace geomonitoring methodology of the marine shelf using the relevant informative features, in particular, by highlighting the state of the water area showing zones of temperature anomalies of various origin in the marine shelf to search for hydrocarbon deposits and to control the unauthorized moving submerged objects access. As a result of the retrospective analysis and processing of archive materials of the process of formation of temperature anomalies of natural and technogenic origin, several dozens of different Haralik parameters were checked. The five most informative of them were selected for further use: Contrast, Sum Variance, Sum Entropy, Entropy, Difference Entropy.

To achieve these goals, studies were carried out in three stages. Firstly, the temperature anomalies of natural origin on the sea surface, which occur in the presence of hydrocarbon deposits, were obtained using a spacecraft. Secondly, the temperature anomalies of the technogenic origin, which are created by mobile submerged objects in the aquatic environment, were obtained. The above was carried out based on data obtained during a model experiment in the research pool. Thirdly, archived data of changes in the temperature of the water surface in the infrared region of the spectrum after the passage of moving submersible objects were processed. Data were obtained on the sea surface using recording equipment, which was placed on the platform.

As a result of the studies, informative signs of temperature anomalies that are different from the background were determined and, compared with the latter, are determined from a satellite image. This confirms the possibility of dual-use of the methodology of aerospace geomonitoring of the sea shelf.

**Keywords:** aerospace geomonitoring, offshore shelf management, methodology, temperature anomalies, hydrocarbon deposits, moving underwater objects.