

ШИПЦОВ

Олександр Анатолійович – член-кореспондент НАН України, доктор географічних наук, професор, директор Державної установи «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України»

ФЕДОРОВСЬКИЙ

Олександр Дмитрович – член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу системного аналізу Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України»

ХИЖНЯК

Анна Василівна – кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник відділу системного аналізу Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України»

АЕРОКОСМІЧНИЙ МОНІТОРИНГ ШЕЛЬФУ ПРИБЕРЕЖНОЇ ЗОНИ ЧОРНОГО МОРЯ УКРАЇНИ ЯК МЕТОДОЛОГІЯ ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У статті обґрунтовано використання аерокосмічного моніторингу чорноморського шельфу прибережної зони України як методології подвійного призначення: для пошуку покладів вуглеводнів та для охорони прибережної зони. Досліджено процеси на межі поділу вода–атмосфера, які необхідно враховувати при виявленні температурних аномалій природного і техногенного походження на основі дистанційної реєстрації зміни температури приповерхневого шару води. Запропоновано використання дешифрування космічних знімків для визначення температурних аномалій як додаткової інформативної ознаки наявності покладів вуглеводнів чи аномалій техногенного походження, пов'язаних з рухомими об'єктами у водному середовищі. На моделі збурювання гідродинамічних процесів за допомогою обчислення значення ентропії визначено структурно-текстурні параметри температурних аномалій.

Ключові слова: аерокосмічний моніторинг, шельф, Чорне море, температурні аномалії, поклади вуглеводнів, рухомі об'єкти, модель гідродинамічних процесів.

Вивчення динаміки температури морської поверхні та її розподілу в приповерхневому шарі води важливе для з'ясування механізму енергомасообміну між атмосферою та океаном, який у свою чергу відіграє ключову роль у прогнозуванні погоди й оцінюванні довгострокових кліматичних змін. Крім того, за розподілом температури на поверхні і в приповерхневому шарі можна судити про процеси, що відбуваються на глибинних горизонтах і в донних шарах водного середовища. Отже, для аерокосмічного моніторингу водна поверхня є природним інтегратором інформації, який дає змогу виявити процеси, що відбуваються не тільки на морській поверхні, а й у товщі води та придонному просторі.

У цій статті ми покажемо доцільність використання аерокосмічного моніторингу чорноморського шельфу прибережної зони України як методології подвійного призначення: для

пошуку покладів вуглеводнів і для контролю присутності рухомих об'єктів через «висвітлення» надводної та підводної обстановки.

Аномалії природного походження пов'язані, зокрема, з наявністю покладів вуглеводнів. По флюїдопровідних розломних структурах літосфери шельфової зони газу з таких покладів можуть розвантажуватися у водне середовище, утворюючи бульбашки. Механізм проходження міграційного потоку вуглеводневих флюїдів через водну товщу і взаємодія його з водною поверхнею зумовлені рядом факторів, у тому числі типом гідрології, що залежить від пори року та акваторії. На рис. 1 наведено гідрологічні розрізи за глибиною, отримані в різні пори року, а на рис. 2 — приклади різного стану морського середовища. На різних глибинах, зокрема в термокліні, залежно від гідрологічних умов, зміни температури, солоності, підводних течій структура водного середовища різна. У Чорному морі термоклін у літньо-осінній період зазвичай розташований на глибині близько 25 м. Збурення, що виникає у ньому, породжує коливання щільності й температури, які поширюються з області збурення у вигляді хвиль.

У випадку гідрології, близької до ізотермії, та інтенсивного потоку флюїдів це може бути ерліфтний процес — підняття флюїдними потоками холодних глибинних вод до морської поверхні. За наявності у стратифікованій водній товщі градієнтів щільності мігруючі флюїди спричиняють утворення внутрішніх хвиль, які, поширюючись до водної поверхні, взаємодіють з нею. У випадку гідрології з вираженим термокліном потік флюїдів, досягаючи його, викликає у термокліні коливання щільності й температури, які поширюються з області збурення до вільної водної поверхні у вигляді внутрішніх хвиль. Частота цих хвиль відома як частота Брента–Вяйсяля, а зворотна їй величина (період хвилі) слугує фундаментальним часовим масштабом, що зумовлює коливальні рухи у стратифікованому водному середовищі. Виниклі внутрішні хвилі, досягаючи водної поверхні, спричиняють зміни гідрофізичних характеристик приповерхневого шару води,

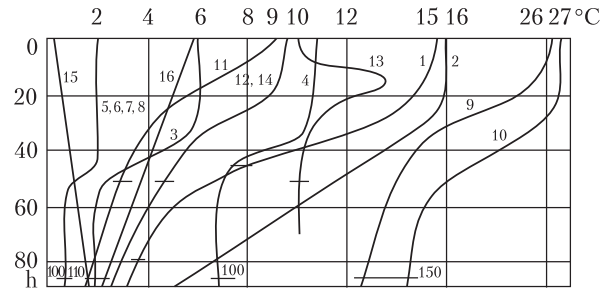


Рис. 1. Гідрологічні розрізи за глибиною, отримані в різні пори року

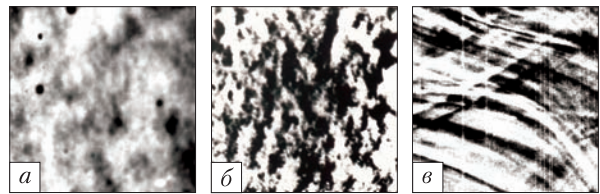


Рис. 2. Приклади різного стану морського середовища: на глибинних горизонтах: *a* — у стратифікованому середовищі; *б* — у термокліні; *в* — в умовах турбулентності

які відображаються на морській поверхні як аномалії поверхневої температури, а в приповерхневому шарі — як зміни градієнту температури, що природно проявляються на вільній водній поверхні як температурні аномалії, які реєструються на космічних знімках в інфрачервоному спектральному діапазоні [1, 2]. На рис. 3 наведено фрагмент космічного знімка природної температурної аномалії північно-західного шельфу Чорного моря, отриманого над Голіцинським родовищем вуглеводнів (О.Ю. Котляр, 2004 р.).

Оптичні аномалії техногенного походження пов'язані з об'єктами, що рухаються у водному середовищі і викликають його турбулентні збурення. При цьому відбувається змішування різних температурних шарів водного середовища та утворюється так званий кільватерний слід, для якого характерна наявність кількох різномасштабних зон збурення гідрофізичних полів. Перша зона, вузька, яка розвивається на горизонтах, близьких до горизонту руху

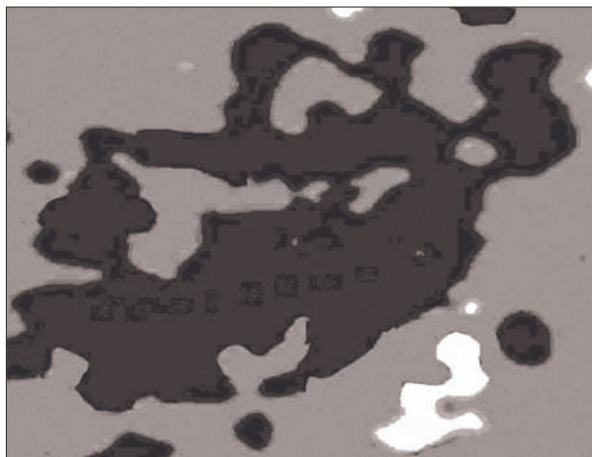


Рис. 3. Фрагмент космічного знімка температурної аномалії північно-західного шельфу Чорного моря. Температурна аномалія над Голіцинським родовищем вуглеводнів. Космічний знімок NOAA, 4-й канал (10,3–11,3 мкм)

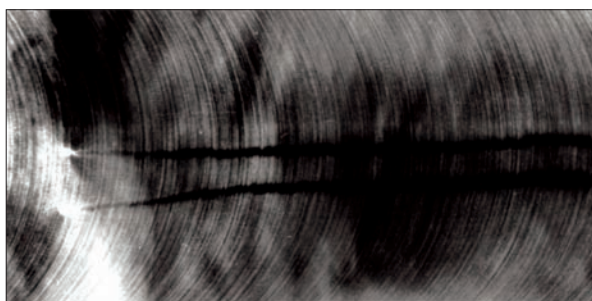


Рис. 4. Кільватерні сліди надводних кораблів на аерознімку ділянки Чорного моря, знято у спектральному діапазоні 8–12 мкм з висоти 4000 м

об'єкта, — це зона турбулентної спутньої течії. Вона визначається дифузійними процесами переносу від об'єкта імпульсу, а також тепла й маси. Турбулентне збурювання приводить до змішування різних температурних шарів води, що може супроводжуватися підняттям теплої води та спливанням бульбашок газу на поверхню. Друга зона, широка, виникає внаслідок гідродинамічного тиску корпусу об'єкта, хвильових рухів — корабельних внутрішніх хвиль та акустичного поля об'єкта. Джерелом генерування корабельних внутрішніх хвиль

насамперед є корпус об'єкта, який відхиляє від початкового стану лінії постійної щільності водного середовища. Крім того, ці хвилі генеруються завдяки колапсу зони турбулентної спутньої течії. Початковий вертикальний зсув води, що породжує корабельні внутрішні хвилі, зумовлений різними факторами, зокрема типом гідрології, варіаціями атмосферного тиску тощо. Коли ці хвилі досягають поверхні води, вони спричинюють зміну температурних параметрів морської поверхні, що на аерокосмічних знімках фіксується як температурна аномалія, а утворений кільватерний слід, який зберігається протягом кількох годин, є інформативною ознакою рухомого об'єкта [3, 4].

У разі наявності покладів вуглеводнів і у випадку рухомих об'єктів результати взаємодії гідродинамічних процесів, що виникають при цьому, з приповерхневим водним шаром і утворення на вільній морській поверхні температурних аномалій багато в чому подібні, що й зумовлює подвійне призначення методології аерокосмічного моніторингу шельфу прибережної зони — для виявлення вуглеводневих покладів і для «висвітлення» надводної та підводної обстановки щодо присутності рухомих об'єктів. Для прикладу на рис. 4 наведено аерознімок, на якому на фоні природних температурних аномалій видно кільватерні сліди надводних кораблів.

Для визначення інформативних ознак розглянемо докладніше механізм виникнення на водній поверхні температурних аномалій. Гідрофізичні процеси, що відбуваються у приповерхневому шарі води і формують його гідротермодинамічний режим, досить складні. Насамперед вони пов'язані з надходженням у водне середовище через межу поділу атмосфера–вода сонячного випромінювання та власного випромінювання атмосфери. Водне середовище у свою чергу формує власний потік довгохвильового випромінювання. Крім того, на приповерхневий шар впливають наявні в ньому конвективні потоки, турбулентність, внутрішні та поверхневі хвилі, гідрологія, вітер, випаровування, опади, хмарність, течії, поверхнево-активні речовини тощо.

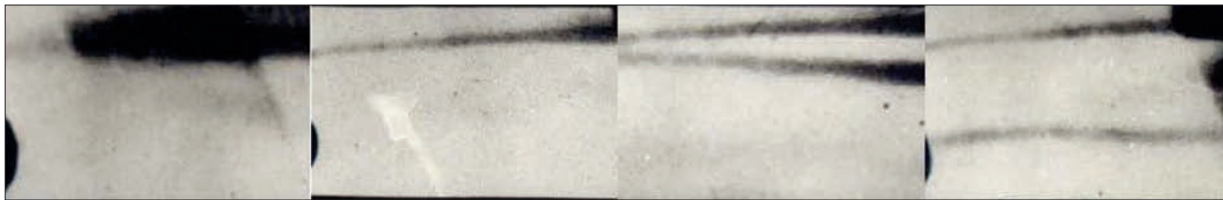


Рис. 5. Тіньові зображення розвитку мікроконвекції в приповерхневому шарі завтовшки 0,5 см, отримані за допомогою теплерівського тіньового приладу ІАБ-451 за імітації зовнішніх умов

Експериментально було встановлено, що в приповерхневому шарі формується специфічний суміжний шар розміром у кілька міліметрів і градієнтом температури в кілька градусів. Це гідрофізичне утворення дістало назву скін-шар. Причому найчастіше температура поверхні виявляється меншою за температуру шарів, розташованих нижче, — холодний скін-шар. Поле температури в ньому формується під дією різних перелічених вище факторів. Було встановлено, що холодна плівка зберігається за швидкості вітру до 10 м/с, а час відновлення скін-шару залежить від багатьох зовнішніх факторів. Після його руйнування внаслідок обвалення хвиль або інших факторів час відновлення плівки може становити десятки секунд. Тому можна припустити, що існування холодного скін-шару — явище досить стійке [4, 5].

Дослідженню гідрофізики виникнення і розвитку температурного суміжного шару присвячено ряд робіт [3–5], пов'язаних насамперед з вивченням і моделюванням великомасштабних процесів у моделях клімату, а також пошуком нафти і газу на морському шельфі. На авіакосмічних знімках морської поверхні спостерігаються температурні аномалії різного походження. Природні теплові аномалії виділяють за співвідношенням сигнал/шум, де як шум розглядають температурні варіації в певному місці в певний час протягом усього періоду спостережень, спричинені метеорологічними та іншими факторами, які не пов'язані з наявністю вуглеводневих покладів чи з перебуванням рухомих об'єктів.

Експериментальне вивчення гідрофізичних процесів у приповерхневому шарі води

є досить проблематичним через малі розміри скін-шару і неможливість у зв'язку з цим застосовувати контактні методи вимірювання, що зумовлено скінченними розмірами реєструвального датчика, впливом поверхневого натягу при переміщенні датчика через межу поділу вода–атмосфера та інерційністю вимірювальної системи. Тому, як правило, в дослідженнях процесів, що відбуваються у вертикальній площині, використовують неконтактні фото- і тіньові теплерівські системи, а на вільній водній поверхні — дистанційні: радіометричні, тепловізійні, флуоресцентні, радіосистеми, що дають можливість отримувати інформацію з високим розрізненням і точністю. У роботі [6] викладено методи і результати лабораторних та морських досліджень гідрофізичних процесів у приповерхневому шарі води за допомогою оптичної апаратури: тіньового теплерівського приладу, тепловізорів і радіометрів.

Проведені дослідження показали, що у верхніх шарах води процеси турбулентної передачі тепла ослаблені. Це приводить до виникнення в поверхневому шарі значних градієнтів температури, величина яких визначається інтенсивністю теплообміну вода–повітря. За звичайних умов температура води на поверхні менша, ніж на певній глибині. Причина цього явища, за рідкісним винятком, полягає в тому, що водна поверхня віддає тепло в атмосферу шляхом променистої і турбулентної теплопередачі. Для виконання умови балансу тепла необхідна наявність потоку, який компенсує ці втрати, до поверхні з нижніх шарів води. У поверхневому шарі виникає нестійка стратифікація, що може приводити до конвективних рухів.



Рис. 6. Корабель із встановленим на ньому тепловізором

У результаті верхні шари води провалюються вглиб рідини, утворюючи холодні терміки. Процес утворення таких терміків має періодичний характер.

На рис. 5 наведено результати досліджень у приповерхневому шарі, отримані за допомогою тіншового приладу ІАБ-451. На зображеннях тіншових картин вертикального розрізу можна бачити розвиток мікроконвекції в приповерхневому шарі впродовж кількох хвилин. При цьому вода, охолоджена випаровуванням і випромінюванням, як більш важка, провалюється вниз (темні смуги), формуючи тонку поверхневу плівку [6]. На отриманих фото можна спостерігати інверсію температури у верхньому шарі досліджуваного об'єму рідини. Верхній край фото відповідає межі поділу повітря–вода, де формується градієнт температури поверхневого шару води, який реагує на глибинні гідродинамічні процеси. Це дає змогу використовувати градієнт температури як додаткову інформативну ознаку при дешифруванні на космічних знімках температурних аномалій, пов'язаних з наявністю покладів вуглеводнів або рухомих об'єктів [7]. Для детального моделювання цих процесів необхідна математична модель температурного скін-шару. У реальних умовах різкої межі між водною поверхнею та атмосферою немає. Над водною поверхнею завжди є водяна пара, щільність якої зменшується з глибиною. Під впливом зовнішніх факторів пара й вода не перебувають у стані

термодинамічної рівноваги, внаслідок чого на межі їх поділу відбуваються фазові переходи. Отримані за допомогою інтегральних законів збереження маси, імпульсу, енергії й ентропії співвідношення пов'язують параметри рідини і пари, які враховують вплив різних джерел тепла через зовнішнє випромінювання – випромінювання сонця, власне випромінювання атмосфери, випромінювання води.

Математична модель нерівноважної термічної структури межі поділу вода–атмосфера побудована на основі припущення, що поверхня поділу вода–пара являє собою пару (при $z > 0$) чи воду (при $z < 0$). З боку пари потрапляє зовнішнє випромінювання I_0 . Припускається, що вода й пара є поглинальними середовищами, при цьому розсіювання не враховується. Перенесення променистої енергії в парі й рідині з деяким уточненням описується за допомогою закону Бугера. Нижче наведено математичну модель розподілу безрозмірної температури $T_l^* = T_l / T_{loo}$ в приповерхневому шарі рідини, отриману за відповідних граничних умов у роботі Є.І. Никифоровича [8]:

$$T_l^* = 1 + T_{loo}^{-1}(T_s - T_{loo})e^{z^{**}} - q_{lo}z^{**}e^{z^{**}},$$

$$T_v(z \rightarrow +\infty) = T_{voo} = \text{const, для пари,}$$

$$T_l(z \rightarrow -\infty) = T_{loo} = \text{const, для води,}$$

$$T_v(z = 0) = T_l(z = 0) = T_s,$$

де $z^{**} = z/z_l$, z_l – масштаб довжини випаровування; $q_{lo} = I_0 z_l / \lambda_l T_{loo}$, λ – коефіцієнт те-

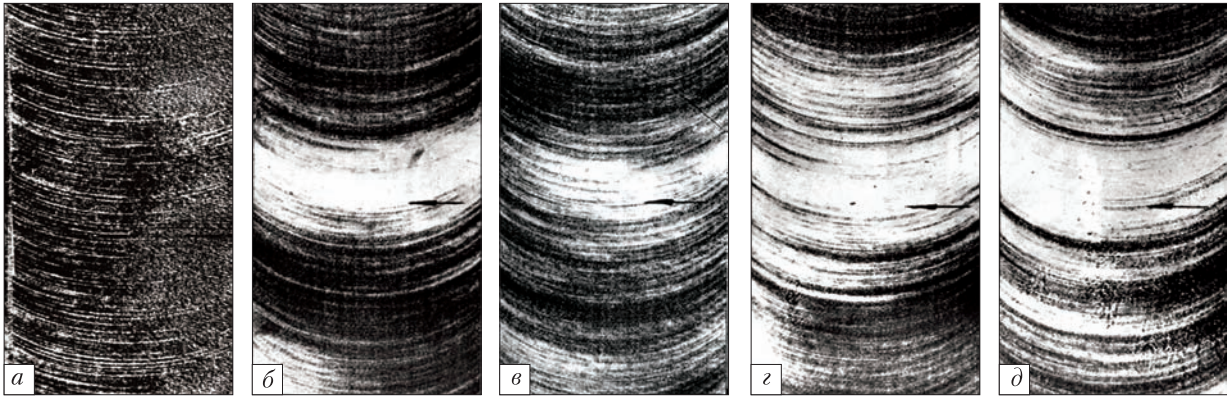


Рис. 7. Фрагменти ІЧ-зображення температурних аномалій на водній поверхні, отриманих у результаті послідовного перетинання їх кораблем у міру розвитку аномалій: *a* – температурний фон морської поверхні (ентропія $H = 8,21$; час розвитку аномалії $t = 0$); *b* – $H = 8,68$; $t = 0,5$ год; *в* – $H = 8,82$; $t = 1,5$ год; *г* – $H = 8,86$; $t = 2$ год; *д* – $H = 8,92$; $t = 3$ год. Стрілками показано напрямок ходу моделі гідродинамічних процесів

плопровідності; T_s – температура водної поверхні.

З появою хмарності порушувався початковий стаціонарний стан холодного ламінарного шару, забезпечений балансом потоків тепла. Ефективне випромінювання зменшувалося, що спричинювало зростання температури скін-шару і збільшення випаровування, яке супроводжується віддачею тепла в атмосферу. Останнє компенсується надходженням тепла з однорідного шару в холодний підшар до настання нового квазістаціонарного стану, пов'язаного з відсутністю припливу прямого сонячного випромінювання. Після проходження хмари температура скін-шару деякий час залишається вищою за свій початковий стан, до повного зникнення хмарності, коли термічні параметри скін-шару почнуть асимптотично наближатися до своїх початкових значень. Таким чином було зафіксовано і обґрунтовано збільшення температури водної поверхні з появою хмарності.

Для подальшого детального дослідження процесу формування на вільній водній поверхні температурних аномалій було використано результати експерименту, виконаного у Чорному морі з борта корабля ОС-6 (рис. 6).

Моделювання процесу формування температурних аномалій виконували шляхом збу-

рення гідродинамічних процесів (як імітатора покладів вуглеводнів та рухомих об'єктів) на глибинних горизонтах за допомогою заглибленої самохідної моделі, а реєстрування аномалій, що виникали при цьому, здійснювали послідовним перетинанням їх кораблем з апаратурою (О.Д. Федоровський, В.Ю. Філімонов). Для реєстрації поверхневих температурних аномалій застосовували високочутливий сканувальний тепловізор (спектральний діапазон 3,5–5,2 мкм, просторове розрізнення на водній поверхні 1–2 м). На рис. 7 наведено фрагменти ІЧ-зображення температурного фону морської поверхні і температурних аномалій, збудованих на водній поверхні заглибленою рухомою моделлю гідродинамічних процесів. Дугоподібна форма температурних аномалій пов'язана з параметрами сканування і швидкістю корабля – носія тепловізора.

Ці ІЧ-зображення аномалій були певним чином оброблені з метою отримання інформативних ознак фону і сигналу. Для цього використовували структурно-текстурні характеристики водної поверхні, на основі яких обчислювали значення параметрів Хараліка. Як найбільш інформативний параметр Хараліка, було визначено ентропію (H) [9]:

$$H = \sum_{i=1}^N \log(1/p_i) p_i,$$

де, p_i — імовірність значення пікселя цифрового зображення; $i = 1...N$ — номер значення пікселя цифрового зображення.

З рис. 7 видно, що фон має мінімальне значення ентропії, а з появою аномалії та зростанням часу її життя значення ентропії збільшується до максимального значення, після чого в міру дисипації температурного кільватерного сліду моделі починає падати до фонових значень.

Проведені дослідження показали, що в приповерхневих шарах води на межі поділу вода–атмосфера відбуваються складні гідрофізичні і

гідродинамічні процеси, вплив яких необхідно враховувати під час виявлення температурних аномалій, пов'язаних з наявністю покладів вуглеводнів чи рухомих об'єктів. Встановлена відмінність ентропії (структури-текстури) температурних аномалій гідродинамічних процесів від температурного фону морської поверхні підтверджує можливість подвійного використання аерокосмічного моніторингу шельфової зони Чорного моря України для пошуку температурних аномалій природного і техногенного походження.

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Lyalko V.I., Vorobyov A.I., Ogolenko V.S., Yaroshuk P.D. Study geofluidodynamic processes in the north-eastern part of the Black Sea by methods of remote sensing of the Earth in connection with the forecast of oil and gas. *Dopov. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2004. (10): 130.
[Лялько В.І., Воробійов А.І., Оголенко В.С., Ярошук П.Д. Вивчення геофлюїдодинамічних процесів в північно-східній частині Чорного моря методами дистанційного зондування Землі в зв'язку з прогнозом нафтогазозносності. *Доповіди НАН України.* 2004. № 10. С. 130–137.]
2. Fedorovsky A.D., Sokolovska A.V. Remote aerospace research as an interdisciplinary scientific trend in nature management. *Dopov. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2015. (3): 100. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.03.100>
[Федоровський О.Д., Соколовська А.В. Дистанційні аерокосмічні дослідження у природокористуванні як міждисциплінарний науковий напрям (на прикладі оцінки нафтогазоперспективності ділянок Каспійського шельфу Туркменістану). *Доповіди НАН України.* 2015. № 3. С. 100–106.]
3. Kuftarkov Yu.M., Nelepo B.A., Fedorovsky A.D. On the temperature of the skin layer of the ocean. *Reports of the USSR Academy of Sciences.* 1978. (2): 296.
[Куфтарков Ю.М., Нелепо Б.А., Федоровський А.Д. О температуре скин-слоя океана. *Докл. АН СССР.* 1978. № 2. С. 296–299.]
4. Ginzburg A.I., Zatsepin A.G., Fedorov K.N. Fine structure of the boundary layer in water near the water-air interface. *Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Atmospheric and Oceanic Physics.* 1977. **13**(12): 1208.
[Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Федоров К.Н. Тонкая структура пограничного слоя в воде у поверхности раздела вода–воздух. *Изв. АН СССР. Физика океана и атмосферы.* 1977. Т. 13. № 12. С. 1208–1277.]
5. McAlister E.D. Infrared-Optical Techniques Applied to Oceanography. I. Measurement of total heat flow from the sea surface. *Appl. Opt.* 1964. **5**(5): 609. <https://doi.org/10.1364/AO.3.000609>
6. Fedorovsky A.D., Nikiforovich E.I., Prikhodko N.A. *Transport processes in gas-liquid systems.* (Kyiv: Naukova Dumka, 1988).
[Федоровский А.Д., Никифорович Е.И., Приходько Н.А. *Процессы переноса в системах газ–жидкость.* К.: Наук. думка, 1988.]
7. Patent of Ukraine No. 108696. Lyalko V.I., Fedorovsky O.D., Yakymchuk V.G., Sokolovska A.V., Vorobyev A.I. Method of forecasting gas deposits on the sea shelf. 25.05.2015.
[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. 25.05.2015.]
8. Nikiforovich E.I. Derivation of boundary conditions for heat and mass transfer in gas-liquid systems with phase transitions. *Hydromechanics.* 1987. **56**: 36.
[Никифорович Е.И. Вывод граничных условий для задач теплообмена в газожидкостных системах с фазовыми переходами. *Гидромеханика.* 1987. Вып. 56. С. 36–39.]
9. Naralick R.M. Statistical and structural approaches to texture. *Proc. IEEE.* 1979. **67**(5): 786. <https://doi.org/10.1109/PROC.1979.11328>

Стаття надійшла 03.01.2018

O.A. Shchypsov ¹, O.D. Fedorovsky ², A.V. Khyzhniak ²

¹ Scientific Hydrophysical Centre of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv)

² Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth, Institute of Geological Sciences,
National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv)

AEROSPACE MONITORING OF THE UKRAINIAN NEAR-SHELF AREAS OF THE BLACK SEA AS A DUAL PURPOSE METHODOLOGY

The article substantiates the use of aerospace monitoring of the Ukrainian near-shelf areas of the Black Sea as a dual purpose methodology for discovering deposits of hydrocarbons and for protection of the coastal zone by exposing surface and underwater situation. The sequential research of the processes at the interface between water and atmosphere, which must be taken into account when searching for deposits of hydrocarbons and immersed objects using remote registration of temperature changes of the surface layer of water, involves using the knowledge from various scientific disciplines such as hydrology, hydrophysics, hydrodynamics, thermodynamics. The decoding of space images of temperature anomalies of the presence of hydrocarbons and anomalies of man-made origin, which are created by objects moving in the water environment, is proposed as the additional informative feature. On the excitement hydrodynamic processes model the structural and texture parameters of temperature anomalies are determined by calculating the value of entropy.

Keywords: aerospace monitoring, shelf, Black Sea, methodology, temperature anomalies, hydrocarbon deposits, moving objects, model of hydrodynamic processes.