

Член-кореспондент НАН України **О. Д. Федоровський,**
А. В. Соколовська

Дистанційні аерокосмічні дослідження в природокористуванні як міждисциплінарний науковий напрямок

Обґрунтовано міждисциплінарну наукову направленість дистанційних аерокосмічних досліджень на прикладі оцінки нафтогазоперспективності ділянок Каспійського шельфу Туркменістану. В процесі досліджень із залученням знань з різних наукових дисциплін: геології, гідрології, гідрофізики, іконіки послідовно визначено відповідні інформативні ознаки наявності покладів вуглеводнів та обчислено їх значення по всій акваторії шельфу, включаючи тестові ділянки — еталони. На заключному етапі за результатами комплексних міждисциплінарних досліджень на основі методу аналізу ієрархій виконано оцінку нафтогазоперспективних ділянок Каспійського шельфу по узагальненому критерію.

У публікаціях, присвячених методичному забезпеченню міждисциплінарних досліджень із залученням різних наукових знань, наводиться перелік складових міждисциплінарного наукового напрямку, наприклад в [1]. З деяким узагальненням і скороченням представимо основні з них: аналіз і класифікація характеристик досліджуваного об'єкта; визначення необхідних наукових знань; організація професійного наукового забезпечення; виконання комплексних досліджень; формулювання практичних рекомендацій і забезпечення їхнього технологічного впровадження.

Мета роботи — показати на прикладі оцінки нафтогазоперспективності ділянок Каспійського шельфу Туркменістану міждисциплінарну наукову спрямованість дистанційних аерокосмічних досліджень у природокористуванні, виконання яких у більшості випадків відбувається на стику наук.

Можливості застосування аерокосмічних методів для пошуку покладів вуглеводнів (ПВВ) у шельфовій зоні зумовлені тим, що морська поверхня є природним інтегратором інформації, що відображає процеси, які відбуваються в товщі води й придонній області. Виявлення ПВВ на основі дешифрування космічних знімків було виконано на базі кількох інформативних ознак із залученням знань із різних наукових дисциплін [2].

На першому етапі в нафтогазоперспективній акваторії Каспійського шельфу вивчаються структурні форми донних ландшафтів, встановлюються їх структурно-геоморфологічні параметри і на тестових ділянках відомих ПВВ (еталонах) обчислюються їхні значення. Потім визначається тип гідрології досліджуваної акваторії, з урахуванням якої виконується аналіз приповерхневих гідрофізичних процесів і вибираються інформативні гідрофізичні ознаки ПВВ. На основі загальної теорії зображень — іконіки й обраних інформативних ознак ПВВ в оптичних і радіоспектральних діапазонах дешифруються космічні знімки морської поверхні шельфової зони. На заключному етапі за результатами комплексних міждисциплінарних досліджень (космічного геомоніторингу, геологічних, гідрологічних, гідрофізичних) на основі системного аналізу виконується оцінка нафтогазоперспективності ділянок Каспійського шельфу.

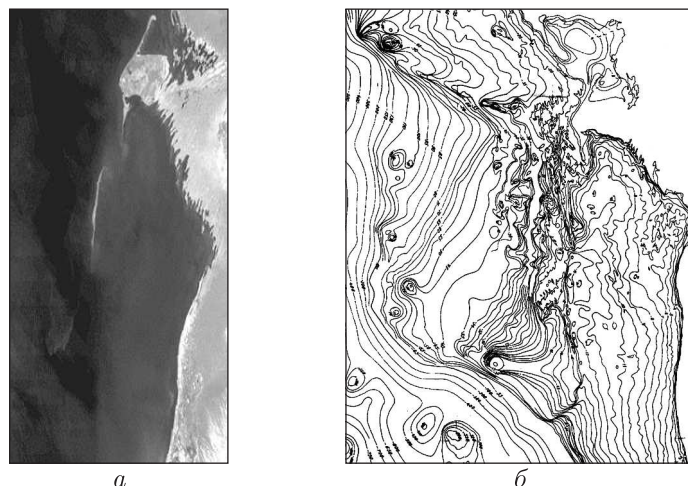


Рис. 1. Фрагмент північно-західної частини Каспійського шельфу Туркменістану: *а* — КЗ Terra-Modis ($R = 500$ м, 545–565 нм); *б* — батиметрична карта

Для дослідження геологічних структур Каспійського шельфу Туркменістану А.І. Архиповим, З.М. Товстюк, Т.А. Ефіменко та іншими науковцями були використані космічні знімки (КЗ) MODIS супутника Terra (див. *а* на рис. 1) і детальні батиметричні карти морського дна північно-східної частини Каспійського шельфу (див. *б* на рис. 1). При цьому для виявлення нафтогазоносних структур використовувався морфометричний метод (один з методів структурно-геоморфологічних досліджень), що базується на картометричних трансформаціях [3].

Дослідження морського дна показали, що його рельєф зберіг морфоструктури різного порядку. Тут найбільш чітко виражені геодинамічні вузли, які проявляються у вигляді лінеamentів і кільцевих структур. Завдяки відображенню в рельєфі морського дна більшості геологічних структур (до 70%) можна було зробити висновок про їхній успадкований розвиток. Глибинним локальним структурам відповідають структурні тераси, замкнуті форми заввишки до 100 м і більше. Було встановлено, що шельф Каспійського моря має розломно-блокову будову та сформований розломами чотирьох напрямів. Субмеридіональні й субширотні розривні порушення, більшість з яких дешифруються як лінеamenti та їхні зони, є найбільш давніми. До структуроформуючих розломів належать більш молоді північно-західні, які контролюють неотектонічно активні зони підвищень. Ці структури найбільш сприятливі для утворення нафтогазоносних пасток [4], що було використано надалі для комплексної оцінки нафтогазоперспективності ділянок Каспійського шельфу Туркменістану.

По флюїдопровідних розломних структурах літосфери шельфової зони вуглеводневі гази надходять у водне середовище, утворюючи пухирці, грифони й грязьові вулкани, інтенсивність яких досить велика [5]. Механізм проходження міграційного потоку вуглеводневих флюїдів через водну товщу і взаємодія його з водною поверхнею зумовлені рядом факторів, зокрема типом гідрології, який залежить від пори року й акваторії. При гідрології з вираженим термокліном досягаючий його потік флюїдів викликає в ньому коливання щільності й температури, що поширюються з області збурювання до вільної водної поверхні у вигляді внутрішніх хвиль. Частота цих хвиль відома як частота Брента–Вяйсялля, а зворотній величина (період хвилі) служить фундаментальним часовим масштабом, що зумовлює коливальні рухи в стратифікованому водному середовищі. Виниклі внутрішні хвилі, до-

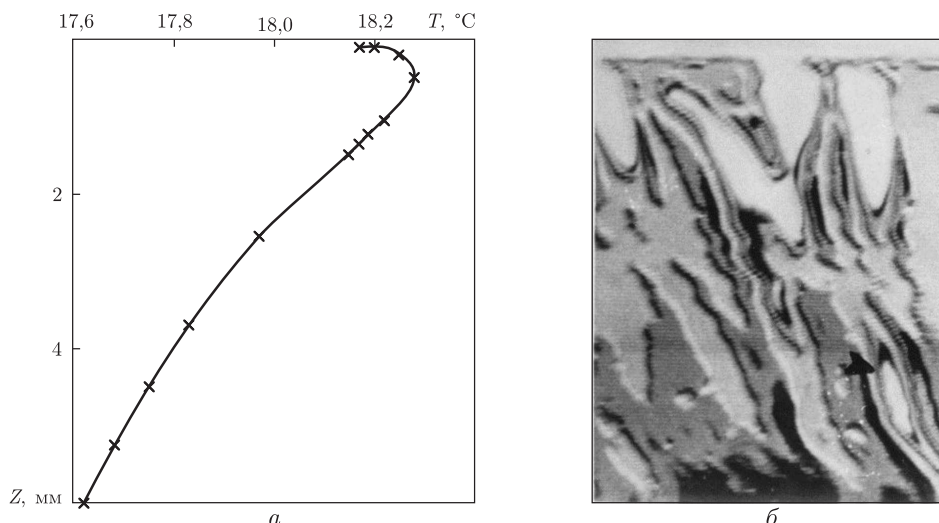


Рис. 2. Приповерхневий шар рідини 5 мм: *a* — характерний профіль температури; *б* — фотографія вертикального розрізу

сягаючи водної поверхні, викликають зміни гідрофізичних характеристик приповерхневого шару води, що відображаються на морській поверхні, як аномалії поверхневої температури, а в приповерхневому шарі — як зміни градієнта температури [6].

Гідрофізичними дослідженнями морської поверхні й прилягаючого до неї шару атмосфери встановлено, що останні перебувають у тісній тепловій і динамічній взаємодії, яка відбувається шляхом променистого й контактного перенесення тепла, а також випаровування. У результаті температура від поверхні води лінійно підвищується з глибиною, а потім монотонно знижується до температури глибинних горизонтів. При цьому в більшості випадків температура поверхні менша за температуру води, що перебуває нижче поверхні. Така термічна структура межі поділу вода — атмосфера отримала назву температурного пограничного шару або температурного скін-шару [7]. Характерний профіль температури в приповерхневому шарі води ілюструє *a* на рис. 2, а тіньову фотографію вертикального розрізу приповерхневого шару рідини з товщиною порядку 0,5 см — *б* на рис. 2. Не менш складною є термічна структура горизонтальних розрізів приповерхневого шару вода — атмосфера. Із графіків, наведених на рис. 3, видно, що в міру наближення до поверхні розділення значення температури стають більш змінними [8]. З аналізу зображень випливає, що процеси, які відбуваються в приповерхневому шарі, мають досить складну структуру [9], експериментальне вивчення яких пов'язане із значними труднощами внаслідок їхніх малих розмірів, а також з неможливістю, у зв'язку з цим, застосувати контактні методи. Тому, як правило, при дослідженні процесів, що відбуваються в приповерхневому шарі, використовують неконтактні тіньові (теплерівські) й фотосистеми, а вільної водної поверхні — дистанційні (оптичні й радіо). У роботі [10] наведено результати натурних морських досліджень динаміки руйнування й відновлення прикордонного шару за різних метеорологічних умов (рис. 4). За допомогою дистанційного радіометра в спектральному діапазоні 3,5–5,2 мкм, що відповідає ефективній глибині 0 й 6 мм, було зареєстровано температуру водної поверхні до руйнування прикордонного шару (T_s) і після його руйнування (T_{sp} , $\Delta T = T_s - T_{sp}$). У всіх дослідках за різних зовнішніх умов було зареєстровано підвищення температури поверхні після руйнування холодного скін-шару.

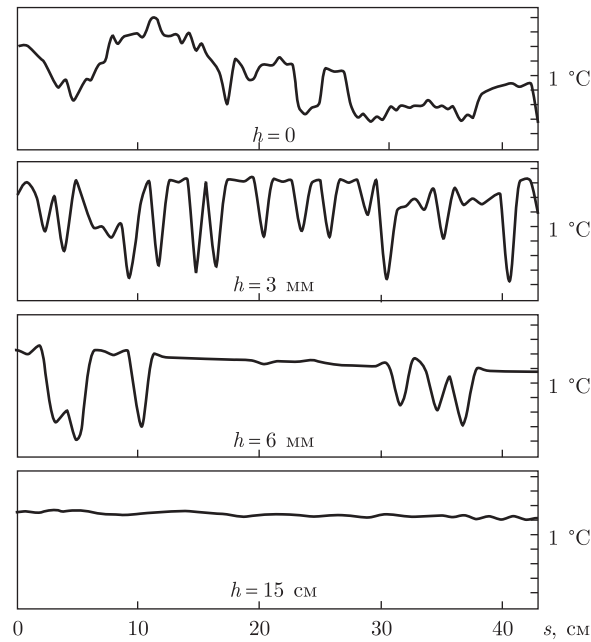


Рис. 3. Горизонтальний розподіл температури на чотирьох глибинах (h)

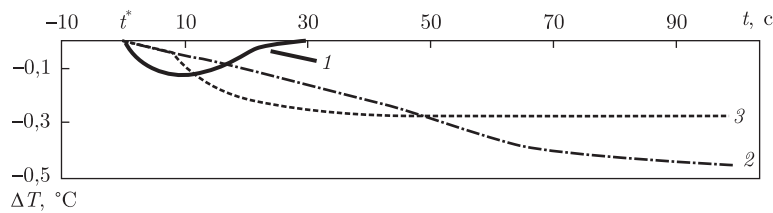


Рис. 4. Часова залежність динаміки відновлення шкірного шару за різних зовнішніх умов: залежність, що отримана при малій інтенсивності випромінювання (1) та більших значеннях сонячної радіації (2, 3). t^* — поверхнева температура в точці реєстрації

На підставі розглянутих гідрофізичних процесів для підвищення ефективності пошуку ПВВ пропонується як додаткові інформативні ознаки використовувати аномалії градієнта температури в приповерхневому шарі води: $q = dT/dZ_{ef}$. Визначити його можна шляхом послідовного вимірювання випромінювання води в дальньому й ближньому інфрачервоних спектральних каналах космічних знімків. Далі, обчислюючи значення температур за відомою методикою [11] і, згідно з формулою (1), — ефективну глибину випромінювання Z_{ef} , розраховано градієнт температури в приповерхневому шарі [12]:

$$Z_{ef} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda) \left(\frac{dm_e}{dZ} \right) \alpha e(\lambda)^{-1} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda) \left(\frac{dm_e}{dZ} \right) d\lambda}, \quad (1)$$

де $\varepsilon(\lambda)$ — спектральний коефіцієнт випромінювання; m_e — енергетична яскравість чорного тіла; $\alpha e(\lambda)$ — спектральний коефіцієнт поглинання.

Для встановлення ефективної глибини випромінювання у випадку вузького спектрального інтервалу Г. Макалистером був виведений вираз $Z_{ef} = 1/\alpha e(\lambda)$ [13]. Для розрахунків, наприклад, використовувався дальній інфрачервоний канал (10,40–12,5 мкм, $Z_{ef} = 0,01$ мм) та ближні інфрачервоні канали (2,09–2,35 мкм, $Z_{ef} = 0,4$ мм) космічного знімка Landsat.

Наступний етап досліджень — дешифрування космічних знімків у різних спектральних діапазонах на підставі отриманої вище геологічної, гідрологічної й гідрофізичної інформації; визначення числових значень інформативних ознак ПВВ на вільній водній поверхні та у приповерхневому шарі по всій досліджуваній акваторії, включаючи еталонні ділянки. Для цього використовували один з методів аналізу космічних зображень — структурно-текстурний аналіз (СТА), враховуючи те, що характеристики СТА зберігають якісну й кількісну оцінку незважаючи на сезонну погоду мінливість. Дешифрування й аналіз космічних знімків, виконаний науковцями праці [14], показує, що на оброблених зображеннях Каспійського шельфу, спостерігаються розташовані уздовж берега лінійні структури різних розмірів і форм, які значною мірою відповідають особливостям рельєфу дна. Це свідчить про інформативність отриманих структурно-текстурних характеристик (СТХ) космічних зображень для вивчення геологічних структур морського дна й формування інформативних ознак ПВВ на основі СТХ, що й було виконано при дослідженні геологічних структур Каспійського шельфу Туркменістану.

На заключному етапі виконувалася інтегральна оцінка нафтогазоперспективності ділянок Каспійського шельфу Туркменістану на основі методу аналізу ієрархій [15]. Вибір останнього зумовлений тим, що зіставлення досліджуваних ділянок необхідно було проводити на різних ієрархічних рівнях оцінки й за множиною різних інформативних ознак і критеріїв. Суть методу аналізу ієрархій полягає в декомпозиції процедури оцінки пріоритетності цих ділянок на більш прості складові по ієрархічних рівнях. Найбільш відповідальним етапом є побудова ієрархічної моделі, представленої нижче.

На нульовому рівні перебуває цільова настанова — системна оцінка нафтогазоперспективності ділянок Каспійського шельфу Туркменістану за даними ДЗЗ і наземними спостереженнями. Перший — складається з різних джерел інформації, яка використовується для аналізу цих ділянок: космічні знімки в оптичних й радіоспектральних діапазонах, різний картографічний матеріал (геологічні, гідрологічні й гідрофізичні карти). Другий — включає методи обробки отриманої інформації: оптичний і радіоспектральний аналіз, структурно-текстурний, морфометричний і морфоструктурний аналізи. На третьому рівні — перелік отриманої інформації для оцінки нафтогазоперспективності досліджуваних ділянок: значення яскравості й кольору космічного зображення, температурного поля, поля градієнта температури, структури й текстури космічного зображення, морфологічні характеристики рельєфу. Четвертий — складається із результатів оцінки нафтогазоперспективності ділянок за отриманими інформативними характеристиками.

Зіставляючи попарно альтернативи, експерт задає систему переваг між елементами рівня, присвоюючи кожному з них певний бал у шкалі відносної значущості. У результаті система переваг представляється квадратною матрицею. Обробка матриць четвертого рівня дає змогу обчислити вектори пріоритетів K^1 , K^2 , K^3 , K^4 відповідних рівнів, компоненти якого визначають їхні пріоритети з погляду експерта.

Метод аналізу ієрархій дозволяє сконструювати необхідну цільову функцію й оцінити ступінь впливу на неї кожної з характеристик досліджуваної системи. Якщо отримано всі необхідні вагові коефіцієнти, то формула узагальненого критерію для порівнювальних варіантів має вигляд:

$$F = \sum K_l^1 \sum K_m^2 \sum K_r^3 \sum K_p^4 \cdot x_p^s,$$

де верхнім індексом критеріального пріоритету позначено рівень ієрархії; x_p^s — коефіцієнт переваги варіанта p за показником s .

Після проведення експертного аналізу та обчислення значень узагальненого критерію F були отримані інтегральні оцінки й встановлена пріоритетність досліджуваних ділянок шельфу за нафтогазоперспективністю.

Таким чином, дистанційні аерокосмічні дослідження нафтогазоперспективності ділянок Каспійського шельфу Туркменістану, які виконано із залученням знань з геології, гідрології, гідрофізики, іконіки та системного аналізу в послідовності таких складових, як методичної (визначення необхідних наукових дисциплін), організаційної (вибір виконавців), інформаційної (інтегральна оцінка нафтогазоперспективності ділянок Каспійського шельфу, передача даних для подальшої сейсмічної розвідки й пошукового буріння), наочно показали міждисциплінарний науковий напрям дистанційних аерокосмічних досліджень у природокористуванні.

1. Козубцов И. Н. Междисциплинарная область знаний – как новая научная специальность // Будущее технической науки: (Сб. материалов XI Междунар. молодеж. науч.-техн. конф.). – Н. Новгород: Изд-во НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2012. – С. 409–410.
2. Лялько В. И., Федоровский А. Д., Попов М. А. и др. Использование данных спутниковой съемки для изучения природоресурсных проблем // Космічні дослідження в Україні 2002–2004. – Киев: КИТ, 2004. – С. 7–14.
3. Философов В. П. Основы морфологического метода поисков тектонических структур. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1975. – 232 с.
4. Пат. No 88090. – Україна, МПК G01V 11/00. Спосіб виявлення нафтогазоперспективних ділянок на морському шельфі / В. І. Лялько, М. О. Попов, С. А. Станкевич, А. І. Воробйов; заявник і патенто-власник Державна установа “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”. – № а 2007 14380; Заяв. 20.12.2007; Опубл. 10.09.2009, Бюл. No 7.
5. Лялько В. И., Костюченко Ю. В., Перерва В. М. Теоретико-методические основы и результаты поисков газовых месторождений на шельфе Черного моря с использованием материалов космических съемок // Геология и полезные ископаемые Черного моря. – Киев: ТОВ “Карбон ЛТД”, 1999. – С. 32–39.
6. Никифорович Е. И., Федоровский О. Д. Гидротермодинамика приповерхневого шару рідини // Вісн. АН УРСР. – 1984. – № 11. – С. 15–21.
7. Куфтарков Ю. М., Нелепо Б. А., Федоровский А. Д. О температурном скин-слое океана // Докл. АН СССР. – 1978. – **238**, № 2. – С. 296 – 299.
8. Katsaros K. D. The aqueous thermal boundary layer // Boundary layer Meteorol. – 1980. – **18**, No 1. – P. 107–127.
9. Федоровский А. Д., Никифорович Е. И., Приходько Н. А. Процессы переноса в системах газ – жидкость. – Киев: Наук. думка, 1988. – 255 с.
10. Федоровский О. Д., Никифорович Е. И., Филимонов В. Ю. Термическая структура границы раздела воздух – вода и оптические методы ее исследования // Тр. Междунар. конф. “Гидродинамика и физические процессы в жидкостях и в дисперсных системах”, 24–26 мая, 1983 г., Прага. – Прага: Б. и., 1983. – С. 317–320.
11. Landsat Science Data Users Handbook: Data Products [Електронний ресурс] // Nat. Aeronaut. and Space Administrat. – 2011. – Р. 186. – Режим доступу до журналу: <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov>.
12. Федоровский А. Д. Оптические методы в гидромеханике. – Киев: Наук. думка, 1984. – 175 с.
13. Mc Alister E. D. Measurement of total heat flow from the sea surface // Appl. Opt. – 1964. – No 5b. – P. 188–201.
14. Архіпова Т. О., Товстюк З. М., Козлов З. В. та ін. Оцінка нафтогазоперспективності територій з використанням системного підходу та космічної інформації для наступної геофізичної розвідки // Геоінформатика. – 2006. – № 3. – С. 40–45.

15. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – Москва: Радио и связь, 1993. – 278 с.

ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень
Землі Інституту геологічних наук НАН України”, Київ

Надійшло до редакції 17.10.2014

Член-корреспондент НАН України **А. Д. Федоровский, А. В. Соколовская**

Дистанционные аэрокосмические исследования в природопользовании как междисциплинарное научное направление

Обоснована междисциплинарная научная направленность дистанционных аэрокосмических исследований на примере оценки нефтегазоперспективности участков Каспийского шельфа Туркменистана. В процессе исследований с привлечением знаний из разных научных дисциплин: геологии, гидрологии, гидрофизики, иконики последовательно определены соответствующие информативные признаки наличия залежей углеводородов и вычислены их значения по всей акватории шельфа, включая тестовые участки — эталоны. На заключительном этапе по результатам комплексных междисциплинарных исследований на основе метода анализа иерархий выполнена оценка нефтегазоперспективных участков Каспийского шельфа по обобщенному критерию.

Corresponding Member of the NAS of Ukraine **A. D. Fedorovsky, A. V. Sokolovska**

Remote aerospace research as an interdisciplinary scientific trend in nature management

The paper proves the interdisciplinary scientific directivity of the remote sensing by the example of evaluating the oil- and gas-bearing areas of the Caspian shelf in Turkmenistan. The relevant informative signs of the presence of hydrocarbon deposits (including reference areas) are defined, and their values across the shelf waters are calculated involving knowledge from different scientific disciplines such as geology, hydrology, hydrophysics, and iconics. In the final stage of the research, the evaluation of the oil- and gas-bearing areas is done, by basing on the hierarchies analysis method with a generalized criterion.