



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2026.13.1.292>

УДК 528.8:550.8:553.98

Математичні методи аерокосмічного геомоніторингу природних ресурсів з оцінюванням їх попиту і прикладами використання: частина друга – поклади вуглеводнів

О. І. Архіпов*, <https://orcid.org/0000-0003-2986-6185>

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

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

А. Д. Бондаренко, <https://orcid.org/0000-0002-2257-6196>

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

Стаття присвячена актуальній проблемі: обґрунтуванню можливості використання окремих запропонованих математичних методів оброблення дистанційних та наземних спектрометрувань рослин та ґрунтів, які вже апробовані, для вирішення різних нафтогазопошукових завдань, поряд з відомими прямими методами (геофізичними, геохімічними, біологічними та ін.) у різних геологічних та ландшафтних умовах. На основі системного підходу розроблено або модифіковано цілу низку математичних методів аерокосмічного геомоніторингу природних ресурсів, зокрема і вуглеводнів (ВВ).

Понад тридцять років співробітники ЦАКДЗ ІГН НАНУ у процесі дистанційних та наземних досліджень апробували десятки відомих та авторських розробок для оброблення результатів спектрометрувань рослин та ґрунтів: факторний аналіз, методи спектральних контрастів, аналітичних мереж, структурно-текстурного аналізу, міждисциплінарної інтеграції аерокосмічної і наземної інформації та системного підходу тощо. Крім того, для детального оцінювання нафтогазоперспективності окремих ділянок на суходолі, застосовувались метод евристичного критерію, спосіб прийняття рішень та ін.

На основі експертних оцінок та методу аналізу ієрархій, викладеного у частині 1 (Хижняк та ін., 2017), були визначені найбільш оптимальні з них: статистичний метод виділення оптичних аномалій ландшафту, обумовлених покладами вуглеводнів, за матеріалами аерокосмічних зображень, метод спектральних контрастів, метод спектральної автокореляції, метод генетичних алгоритмів та метод багатокритеріальної оптимізації, які описуються у цій статті, з прикладами їхнього використання при пошуку покладів вуглеводнів і результатами їх оцінювання у різних геологічних і ландшафтних умовах.

Ключові слова: аерокосмічний геомоніторинг, методи системного аналізу, оптичні та геофізичні аномалії, геофлюїдодинамічні та неотектонічні процеси, морфометричні дослідження, структурне дешифрування, фотометрування.

© О. І. Архіпов, О. Д. Федоровський, А. В. Хижняк, А. Д. Бондаренко, 2026

Вступ

В Україні, у зв'язку з вичерпаністю фонду вже досліджених антиклінальних структур, на перший план виходять пошуки неантиклінальних пасток вуглеводнів (ВВ). Потужність прошарків пісковиків продуктивних горизонтів тут, як правило, становить не більше 10–20 м, що значно нижче розрізняльної здатності існуючих сейсмічних методів. І головне – сейсмічні методи не дають відповіді про наявність покладів ВВ у виділених пастках. Відомо, що у процесі нафтогазопошукових робіт будь-якими методами вирішуються два основні завдання: перше – це пошук (визначення) потенційних пасток (колекторів), що слугують резервуарами покладів ВВ, друге – визначення наявності ВВ у цих пастках. Справа в тому, що далеко не кожному новітньому

підняттю у всіх горизонтах осадового чохла відповідають продуктивні структурні форми.

Перспективним підходом до підвищення достовірності способів вирішення нафтогазопошукових завдань на суходолі є застосування методів, які дають змогу виявляти аномалії, зумовлені покладами ВВ, за прямими ознаками їх прояву в різних середовищах і полях або за непрямыми – за ознаками впливу покладів ВВ на вміщувальне середовище та поля. Цим вимогам задовольняють геохімічні та деякі інші геофізичні методи. За визначенням О. Ю. Лукіна, під прямими методами розуміють спостереження на земній поверхні (а також у приповерхневих відкладах, ґрунтах та неглибоко залягаючих водоносних горизонтах) в атмосфері та гідросфері геохімічних і геофізичних аномалій, зумовлених покладом, а не пасткою (Лукин, 2004).

*Corresponding author / Автор для кореспонденції: О. І. Arkhipov / О. І. Архіпов / aiarh19443@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/>)

Завдання прямого пошуку промислових скупчень ВВ є одним з найгостріших у нафтогазовій геології. Проте, воно досі не має ефективного рішення, придатного для широкого використання у виробничому процесі. Привабливість знайдення такого рішення базується на можливості істотного здешевлення геологорозвідувальних робіт, підвищення їхньої геологічної ефективності, прискорення введення в промислове розроблення нових родовищ.

Для уточнення структурної будови досліджуваних площ та виявлення неотектонічних піднятих, що є певними індикаторами перспективних на поклади ВВ ділянок, зараз широко використовуються дані ландшафтного аналізу, які є основою для подальшого морфографічного та морфометричного аналізу, заснованого на якісному аналізі гіпсометрії та розчленованості рельєфу, малюнку гідромереж, розташування кільцевих структур, лінеamentів і інших ознак тектонічних структур, що мають непряме, але іноді цілком визначене відношення до можливих покладів ВВ. Морфометричні методи дають змогу подати якісні морфографічні показники в кількісній формі: у вигляді цифрової інформації, карт ізоліній і т.д. Однак відзначимо, що основним недоліком цих методів є “розпливчастість” їх результатів: поряд з перспективними площами вони виділяють, наприклад, за тотожністю тектонічної будови ділянок, території, явно безперспективні.

Для оцінювання продуктивності виділених структур використовуються прямі пошукові методи покладів ВВ. Їх ефективність визначається ступенем відповідності виділених аномалій типу поклад (АТП) самому покладу, що варіює в дуже широких межах. Випадки такої повної відповідності в практиці геологорозвідувальних нафтогазопошукових робіт досить рідкісні й відзначені лише щодо деяких, порівняно неглибоко залягаючих у специфічних геологічних умовах, родовищ. Часто доводиться зустрічатися з несправжніми АТП, що виникають з різних причин. По-перше, це можуть бути різноманітні артефакти, обумовлені особливостями того чи іншого методу або суб’єктивними особливостями його інтерпретації. По-друге, АТП можуть бути пов’язані з іншими природними, не вуглеводневими факторами. По-третє, АТП, що сформувалася над покладом, може залишатися й після її руйнування. Треба відзначити, що в наш час жоден з існуючих методів не забезпечує успішного вирішення обох типів завдань. Виникає проблема раціонального комплексування найбільш інформативних та економічно обґрунтованих для геологічних і ландшафтних умов нафтогазопошукових методів (Перерва та ін., 1995).

У Центрі аерокосмічних досліджень Землі Національної академії наук України проводяться дослідження щодо розроблення одного з методів прямого пошуку промислових скупчень ВВ на основі матеріалів аерокосмічних знімків. Важливою перевагою нашого підходу під час оброблення дистанційних і наземних даних є орієнтація на кількісну оцінку зміни характеристик рослин і

грунтів над покладами ВВ, що в значною мірою дає змогу виключати суб’єктивний фактор на різних етапах досліджень, а також використовувати комп’ютерні технології та сучасний математичний апарат. На жаль, пряме опрацювання результатів спектрометрування дає досить високі значення ймовірності помилки $\varepsilon(k) \geq 0.4$ (Архіпов та ін., 2009). Поліпшити достовірність виявлення фітоіндикаційної аномалії можна за рахунок оптимізації даних спектрометрування. Метою оптимізації є одержання системи нових спектрограм суттєво меншої розмірності, ніж базова, що забезпечує при цьому розв’язання задачі.

Відомі два підходи до формування зазначеної системи спектрограм. Перший підхід (feature extraction) передбачає лінійне чи нелінійне перетворення вихідних спектрограм. Другий підхід (band selection) полягає у виборі інформативної підмножини спектральних відліків вихідних спектрограм. Використання band selection для виявлення спектральних фітоіндикаційних аномалій над родовищами вуглеводнів дає змогу знизити ймовірність помилки на 6–10 % (Станкевич та ін., 2008).

У рамках feature extraction досить інформативними виявляються нормалізовані спектральні індекси – відношення, в яких чисельник і знаменник є, відповідно, різницею та сумою коефіцієнтів відображення $\rho(\lambda)$ у двох різних спектральних діапазонах (Stankevich & Titarenko, 2013). Зокрема, для виявлення спектральних фітоіндикаційних аномалій над родовищами вуглеводнів позитивні результати дає зелений хлорофільний індекс (GCI) між спектральними діапазонами 546–562 нм і 682–686 нм.

Також для виділення ландшафтних аномалій, пов’язаних із покладами вуглеводнів, може застосовуватися картування геопросторивх даних, одержуваних на основі геологічних карт та багатоспектральних і радарних супутникових знімків за теорією свідчень (Stankevich, Titarenko & Svideniuk, 2019) або суб’єктивної логіки (Popov et al., 2020).

За допомогою запропонованого методу можна вирішувати такі типи нафтогазопошукових завдань: ранжувати нафтогазопошукові об’єкти, які підготовлено до пошукового буріння за допомогою різних геологічних і геофізичних методів за критерієм продуктивності;

уточнювати зовнішній контур нафтогазоносності, особливо для покладів ВВ, що характеризуються гетерогенною побудовою природних резервуарів;

оперативно оцінювати нафтогазоносність маловивчених площ на етапі, що передує їхньому введенню в пошукове буріння.

Метою цієї публікації є оцінювання можливості використання окремих запропонованих математичних методів для вирішення нафтогазопошукових завдань у різних геологічних та ландшафтних умовах.

1. Статистичний метод виділення оптичних аномалій ландшафту, які обумовлені покладами вуглеводнів

Аномалії над прогнозними пастками вуглеводнів, крім сейсмічних досліджень та структурного дешифрування аерокосмічних матеріалів, можна виділити за методом, який ґрунтується на аналізі розподілу ймовірностей оптичних яскравостей ландшафтів до заданого теоретичного. Сутність методу полягає в такому: припустимо, є ділянка зображення однорідного ландшафту і довільна ділянка зображення ландшафту (Рис. 1). Розглянемо ділянку зображення однорідного ландшафту (поле λ) як фонову, а відповідний їй теоретичний розподіл ймовірностей оптичних яскравостей як еталонну. Побудуємо розподіл ймовірностей оптичних яскравостей на довільній ділянці (поле μ), та оцінимо, чи належить він до теоретичного (еталонного) розподілу, визначеного на фоновій ділянці (як критерій належності розподілу до теоретичного, використовується непараметричний критерій Колмогорова – Смірнова). Якщо критерій не задовольняється, то ці оптичні яскравості належать неоднорідностям. Як свідчать численні дослідження, такі аномалії спостерігаються над покладами вуглеводнів (Перерва та ін., 1995; Станкевич та ін., 2008).

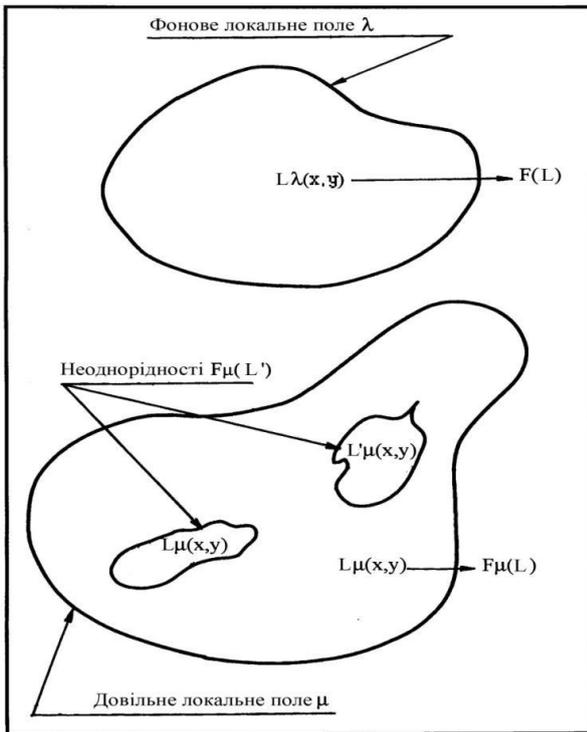


Рис. 1. Схема розміщення однорідних та неоднорідних оптичних яскравостей у межах локальних ділянок

Формальна постановка задачі

Умовні позначення:

$L_\lambda(x, y)$ – оптична яскравість зображення фонового локального поля λ ;

$F_\lambda(L)$ – розподіл ймовірностей оптичних яскравостей $L_\lambda(x, y)$ на фоновому локальному полі λ ;

$L_\mu(x, y)$ – оптична яскравість зображення довільного локального поля μ ;

$F_\mu(L)$ – розподіл ймовірностей оптичних яскравостей L_μ на довільному локальному полі μ ;

$F'_\mu(L)$ – розподіл ймовірностей оптичних яскравостей L'_μ на довільному локальному полі μ .

Визначення 1. **Фоновим локальним полем зображення** будемо називати таке поле, розподіл ймовірностей оптичних яскравостей якого $F_\lambda(L)$ належить до заданого теоретичного розподілу.

Визначення 2. **Неоднорідним локальним полем зображення** будемо називати таке поле, розподіл ймовірностей оптичних яскравостей якого $F_\mu(L')$ не належить $F_\lambda(L)$.

Будемо виходити з асоціативного закону композиції оптичних яскравостей $L_\mu(x', y')$ та $L'_\mu(x'', y'')$ при $x' \neq x'', y' \neq y''$; $x, y \in \{x, y\}\mu$.

При формуванні поля оптичних яскравостей $L_\mu(x, y)$, тоді:

$$L_\mu(x, y) = L_\mu(x', y') \cup L'_\mu(x'', y''), \quad (1)$$

а закон розподілу $F_\mu(L)$ являє собою композицію законів розподілу:

$$F_\mu(L) = F_\mu(L) \cup F_\mu(L'). \quad (2)$$

З урахуванням викладеного сформулюємо задачу: виділити оптичні яскравості $L(x', y')$ на множині координат $\{x', y'\}$ локального поля μ так, щоб $F_\mu(L') \notin F_\lambda(L)$.

Цю задачу можна звести до двох підзадач: перевірка належності розподілу ймовірностей до заданого теоретичного розподілу та пошук тих оптичних яскравостей, що породжують $F_\mu(L') \notin F_\lambda(L)$.

Перша підзадача є типовою задачею математичної статистики. Будемо використовувати її рішення на основі критерію Колмогорова – Смірнова (Merriam, Daniel F., February 1982).

Маємо локальне поле λ оптичних яскравостей зображення $L_\lambda(x, y)$. Побудуємо емпіричний розподіл $\Gamma_\lambda(L)$ і підберемо відповідний йому теоретичний розподіл $F_\lambda(L)$; будемо розглядати його як фоновий. Вибір теоретичного розподілу виконується шляхом перебору відомих розподілів і оцінки їхньої відповідності емпіричному на основі критеріїв погодження (наприклад, критеріїв Пірсона, Колмогорова – Смірнова).

Як викладено в роботі (Schowengerdt, 2007), розподіли ймовірностей оптичних яскравостей зображення однорідних ландшафтів, отриманих у середніх масштабах, є нормальними. Для конкретності викладу будемо розглядати нормальний розподіл як теоретичний фоновий розподіл із середнім значенням \bar{L} та дисперсією σ^2 :

$$F(L) = \frac{1}{\sigma_L \cdot \sqrt{2\pi}} \int_0^L e^{-\frac{(L-L)^2}{2\sigma^2 L}} \cdot dL. \quad (3)$$

Нехай на довільному локальному полі оптичних яскравостей отримано емпіричний розподіл:

$$\Gamma_\mu(L) = \begin{cases} 0, L < L(1), \\ k/n, L(k) \leq L \leq L(k+1), k=1, \dots, n-1, \\ 1, L(n) \leq L, \end{cases} \quad (4)$$

де n – число дискретних значень $L(x, y)$ на полі μ .

Обчислимо різницю між емпіричним і заданим теоретичним розподілами:

$$\Delta_k = \Gamma_\mu(L) - F(L), \quad (5)$$

визначимо $\max_{1 \leq k \leq n} \Delta_k$, що відповідає k -му елементу

послідовності значень L_k . Застосовуючи критерій Колмогорова – Смірнова, оцінимо:

$$\lim P_{vob}\{n^{1/2} \Delta_k < Z\} = L(Z), \quad (6)$$

де $L(Z)$ – асимптотична накопичена функція розподілу величини $n^{1/2} L_k$ і за припустимим граничним рівнем α приймемо рішення про відповідність розподілів $\Gamma_\mu(L)$ і $F(L)$.

Якщо $L(Z) \leq \alpha$, $F_\mu(L)$ відповідає $F(L)$, тобто на локальному полі μ немає аномальних яскравостей.

Якщо $L(Z) > \alpha$, на полі μ є аномальні оптичні щільності, принаймні, одна щільність $L_\mu(x'', y'')$ розташована на k -му місці в ряді $\Gamma_\mu(L)$. Видалимо цю точку з ряду і до підмножини точок, що залишилися, застосуємо розглянуту процедуру. Будемо повторювати її доти, поки не задовольниться критерій відповідності розподілів. У результаті буде сформоване шукане поле $L'_\mu(x', y')$ і залишкове фонове поле $L_\mu(x', y')$. Алгоритм рішення задачі, з використанням статистичного методу запропоновано на Рис. 2. На схемі, крім пояснених у тексті:

$\{L_\mu\}$ – упорядкований за зростанням значень масив оптичних яскравостей, порохований на локальному полі $L_\mu(x, y)$;

$1 \leq k \leq n$; n – число дискретних значень L_{ij} на полі $L_\mu(x, y)$;

$L_m(x', y')$ – масив аномальних оптичних яскравостей, виділених на полі $L_m(x', y)$;

m – число виявлених аномальних значень оптичних яскравостей зображення, рівне числу циклів застосування критерію;

p – число локальних ділянок на досліджуваному зображенні.

Зауваження. Оскільки критерій Колмогорова – Смірнова можна застосувати до вибірки обсягу $n \geq 100$, число дискретних аномальних яскравостей на локальному полі $L_\mu(x, y)$ повинне бути таким, щоб ця умова виконувалася після відкидання з вихідної вибірки $\{L_k\}$ аномальних значень L_k .

Модифікації алгоритму. Розглянутий вище алгоритм побудований з припущення, що $F_\lambda(L)$ не змінюється для скорегованих у фотометричному відношенні зображень. Однак, задача виділення аномалій оптичної яскравості може бути розв'язана і для первинних спектрометрувань.

Розглянемо два випадки зміни $F_\lambda(L)$ у межах зображення.

I випадок. Вид закону розподілу $F_\lambda(L)$ фонового поля не залежить від розташування локальної ділянки на зображенні, але змінюються параметри закону розподілу. У цьому випадку для побудови $F_\lambda(L)$ необхідно визначити тільки його параметри на конкретній ділянці λ , тому задача зводиться до оцінювання параметрів розподілу за емпіричним рядом спостережень.

II випадок. Вид закону розподілу $F_\lambda(L)$ і його параметри змінюються в межах зображення. Таке може бути, коли при спектрометруванні є різні природні об'єкти, наприклад, гірські масиви і

рівнинні ділянки, поля і лісові масиви. В цьому разі необхідно попередньо виділити різні однорідні ділянки, після чого для виділення аномалій оптичної яскравості в межах кожної ділянки застосовується розглянутий алгоритм.

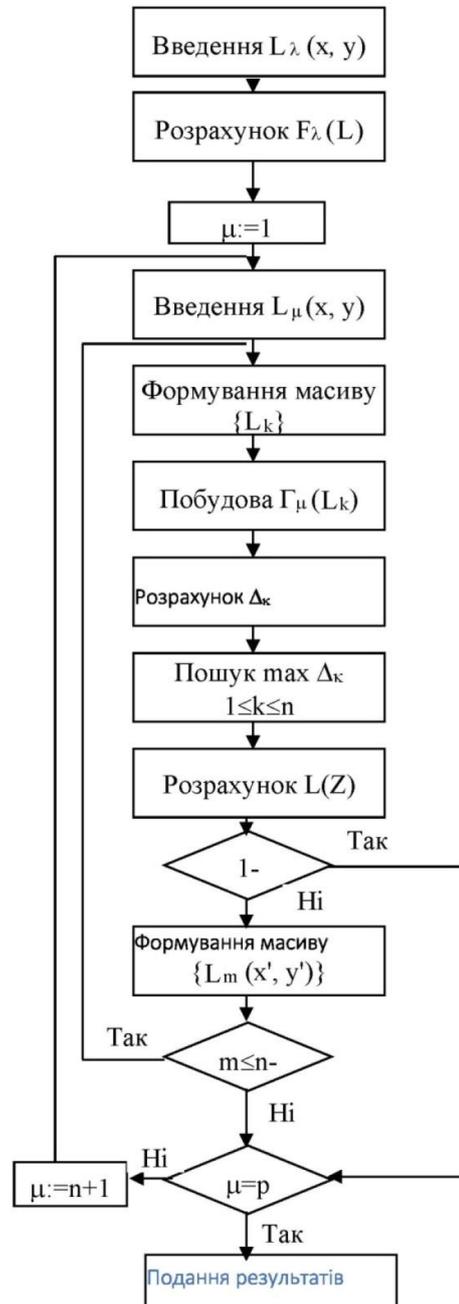


Рис. 2. Блок-схема алгоритму математичної моделі виділення мультиспектральної оптичної аномалії над покладами вуглеводнів за матеріалами багатозонального аерокосмічного знімання

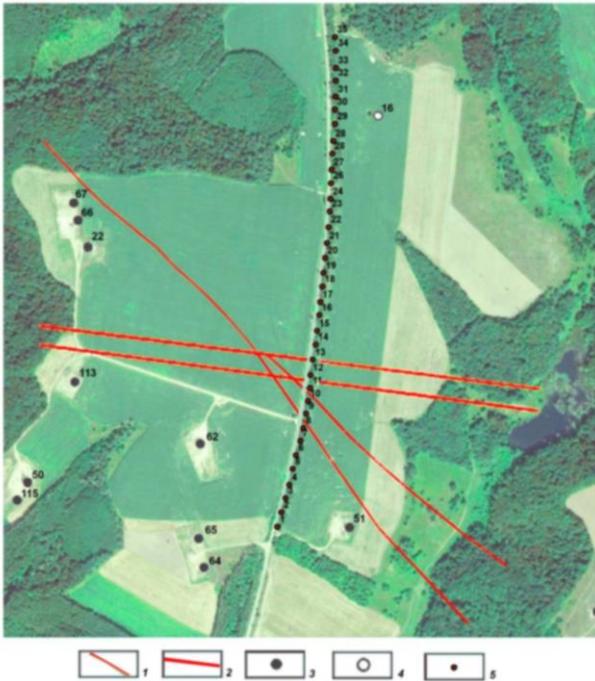
Висновок Наявність оптичних аномалій або аномалій іншої природи (геохімічної, геофізичної, тощо) може свідчити про перспективність прогнозних пасток, над якими вони знаходяться. Крім вирішення нафтогазопишукових завдань, цей метод може бути застосований і для інших галузей, де потрібно виділити окремі аномалії на площах, що досліджуються.

2. Метод спектральної автокореляції

Він ґрунтується на статистичному взаємозв'язку між значеннями спектральних інтервалів тієї самої спектрограми, взятими зі зсувом по довжині хвилі (Daw, 1970). Якщо розглядати спектрограму як реалізацію процесу з невідомими характеристиками вздовж осі довжин хвиль спектра випромінювання, то для визначення інформативності спектральних діапазонів доцільно застосувати автокореляційну функцію, яка є кореляційним моментом другого порядку одного процесу. Якщо аналізована спектрограма $\Phi(\lambda)$ задана кінцевим набором дійсних значень $\Phi_m = \Phi(\lambda_m)$ на рівномірній сітці $\lambda_m = \Delta\lambda \cdot m$, $m = 0, 1, \dots, M-1$, то автокореляція R_n ($n = 0, 1, \dots, N$) цієї спектрограми визначається згідно з виразом

$$R_n \equiv R(\Delta\lambda \cdot n) = E \left\{ \left[\Phi_m - \bar{\Phi}_m \right] \left[\Phi_{m+n} - \bar{\Phi}_{m+n} \right] \right\} / D.$$

Функцію $R(\Delta\lambda \cdot n)$ називатимемо спектральною автокореляцією. Як приклад наводяться результати оцінювання положення контуру нафтогазоносності на ділянці Східнорігінцівського нафтового родовища у Дніпровсько-Донецькій западині (Рис. 3).



Умовні позначення: розломи: 1 – за даними геофізичних досліджень, 2 – за даними бурових робіт; свердловини: 3 – продуктивні, 4 – непродуктивні; 5 – точки спектрометрування рослин спектродіаметром Ocean Optics STS-VIS Developers kit, який встановлено на квадрокоптері (БПЛА).

Рис. 3. Східнорігінцівська площа. Фрагмент космічного знімка Sentinel-2

На ділянці з однорідною рослинністю була прокладена траса довжиною 1100 м, яка проходить між продуктивними свердловинами № 51, № 62 та непродуктивною № 16. Через кожні 30–35 м проводилися вимірювання відбивних характеристик листя берези спектрофотометром СФ-18 (роздільна здатність за спектром 2 нм у діапазоні 400–750 нм). Автокореляції обчислювалися для спектрограм: R_n^S – над покладами вуглеводнів та R_n^F – над фоновими

ділянками. Гранична автокореляція R_n^P визначалася згідно з виразом

$$R_n^P = \frac{1}{2} (R_n^S + R_n^F). \quad (7)$$

Оцінка належності обчисленої автокореляції до нафтогазоносної ділянки визначалася за сумарним відхиленням від граничної:

$$G = \sum_{n=0}^N (R_n - R_n^P). \quad (8)$$

Класифікація проводилася за правилом: якщо $G < 0$, то ділянка класифікується як нафтоперспективна, якщо $G \geq 0$, то досліджувана ділянка безперспективна (Рис. 4).

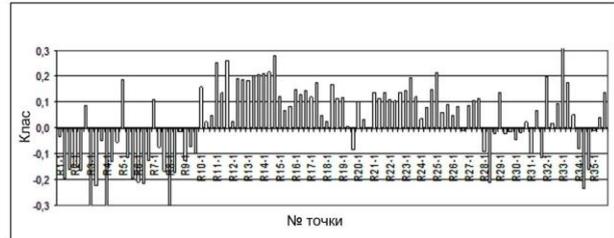


Рис. 4. Результати оцінювання положення контуру нафтогазоносності у північно-західній частині Східнорігінцівського нафтового родовища

Висновок. Аналіз отриманих результатів дає змогу зробити висновок, що оптична аномалія, яка обумовлена покладом ВВ, відповідає ділянці між точками 1–10 (Рис. 4), що досить точно виділяє перехід від родовища вуглеводнів до фону (Якимчук, 2012). Це відповідає межі покладу за даними геофізичних досліджень та бурових робіт (точки 8–10 на профілі Рис. 3). Тобто, було підтверджено принципову можливість виділення малоінтенсивної оптичної аномалії над покладом ВВ за методом спектральної автокореляції для наземних спектрометрувань рослинних покривів. Пізніше аналогічний результат було отримано і за результатами дистанційного знімання з використанням спектродіаметра STS-VIS Developers kit (Седлєрова та ін., 2021).

3. Гібридна генетично-багатокритеріальна модель для оцінювання нафтогазоперспективності на основі геолого-геофізичних та дистанційних досліджень

Оцінювання нафтогазоперспективності територій є складним багатофакторним завданням, яке вимагає інтеграції різномірних даних: геологічних, геофізичних, а також даних дистанційного зондування Землі. Через велику кількість потенційно інформативних ознак наявності покладів ВВ на суходолі, виникає потреба в ефективних методах відбору найвпливовіших релевантних параметрів для ідентифікації перспективності досліджуваних ділянок. У цьому контексті особливої актуальності набуває застосування **генетичних алгоритмів** (ГА), які на основі принципів еволюційного відбору дають змогу автоматизувати та оптимізувати процедуру формування компромісного набору ознак. Визначивши такий оптимальний набір, необхідно формалізувати процес оцінювання та порівняння

досліджуваних ділянок. Для цього доцільно застосувати методологію **багатокритеріальної оптимізації**, яка дає змогу врахувати множинність і потенційну суперечливість критеріїв, забезпечуючи комплексний підхід до класифікації ділянок за рівнем нафтогазоперспективності. Отже, поєднання

генетичних алгоритмів для скорочення простору ознак з багатокритеріальним підходом до їх аналізу створює ефективний гібридний інструмент, здатний підвищити обґрунтованість та достовірність прийняття рішень при оцінюванні нафтогазоперспективності ділянок дослідження (Рис. 5) (Хижняк та ін., 2016).

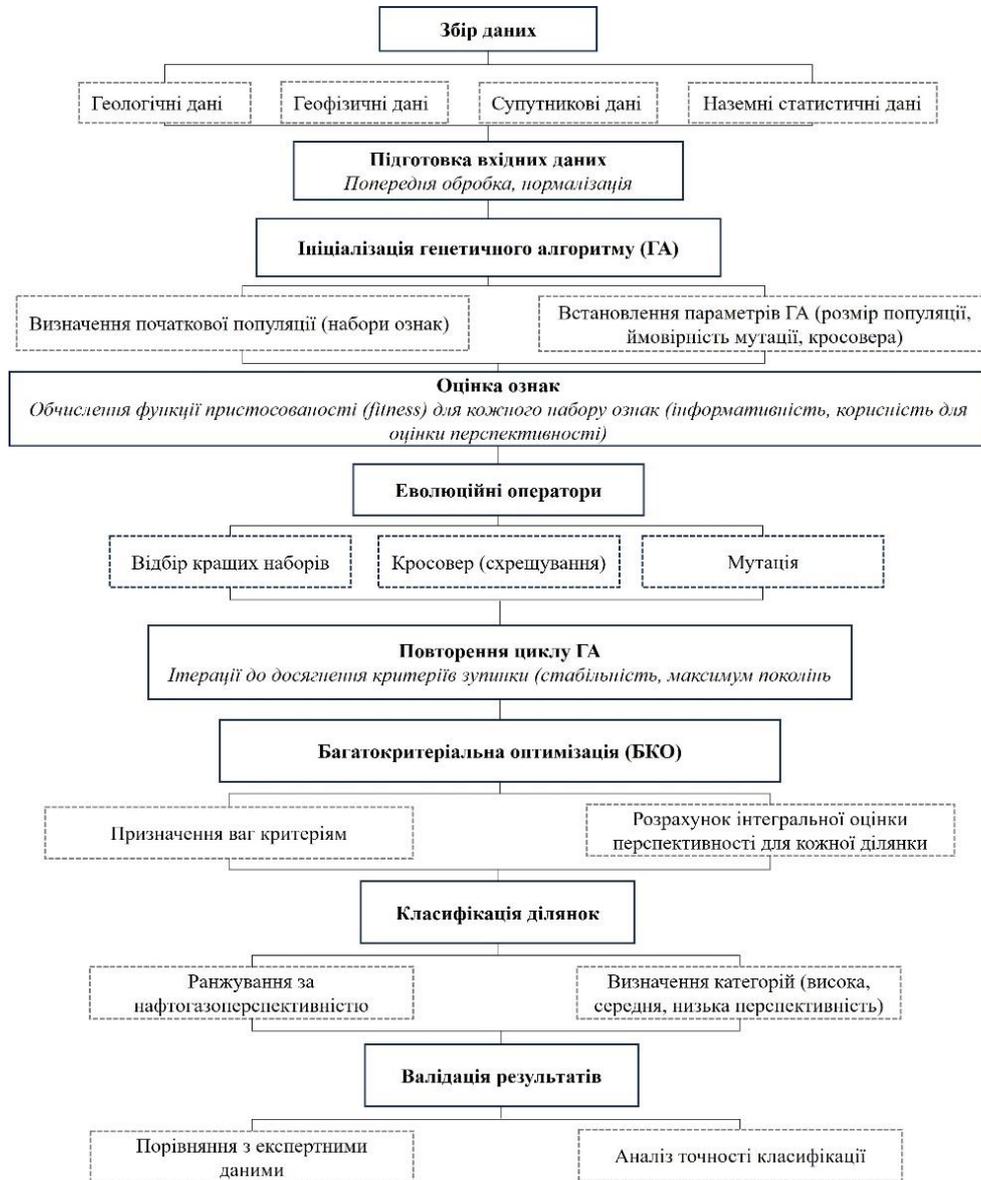


Рис. 5. Алгоритм гібридної генетично-багатокритеріальної моделі для оцінювання нафтогазоперспективності на основі геолого-геофізичних та супутникових даних

Для валідації запропонованого алгоритму обрано Турутинсько-Рогінцівську зону структур, яка розташована в межах північної прибортової зони Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) у Роменському районі Сумської області (Рис. 6), оскільки в її межах розташовані родовища вуглеводнів, які можуть слугувати еталонними об'єктами в процесі аналізу: Бабчинське нафтогазоконденсатне, Великобубнівське та Володимирівське газоконденсатні, Східнорогінцівське, Житне та Турутинське нафтові родовища.

У цій зоні знаходяться також і структури з потенційною продуктивністю: Плужниківська, Південнобочаренківська, Горова, Північнорогінцівська,

Північнокалінівська, Погрібська, Романівсько-Бабчинська, Східнокалінівська, які можуть бути використані для валідації запропонованого методу. Отже, є можливість сформувати компромісний набір інформативних ознак їх ділянок, значення яких максимально відповідають параметрам кожного із зазначених родовищ. Створення такого “узагальненого портрета” пов’язано з перебором усіх поєднань ознак, число яких в задачі синтезу компромісного варіанта (залежно від кількості ознак і використаних ділянок родовищ) може досягти надзвичайно великих значень і з використанням методу прямого перебору стає громіздким завданням.

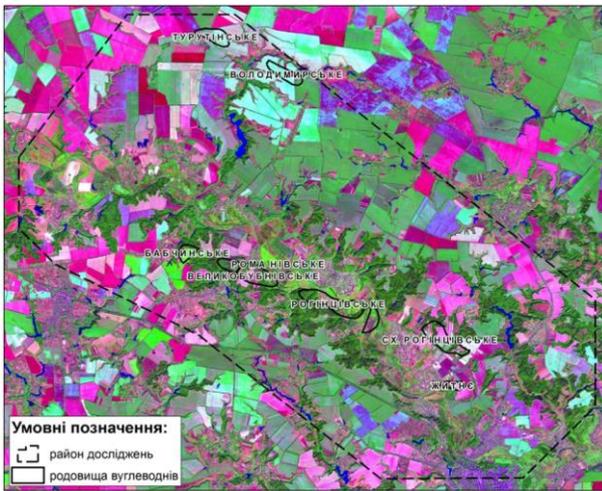
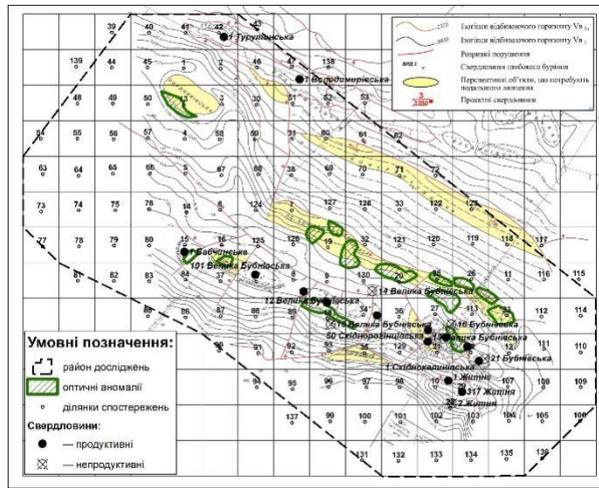
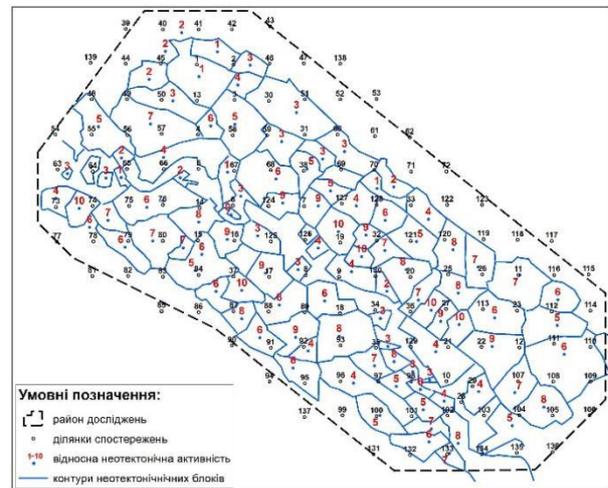


Рис. 6. Турутинсько-Рогінцівська зона структур. Фрагмент космічного знімка Landsat-8, 30.08.2015 р. (комбінація каналів 6, 5, 3)

Розмір досліджуваної площі 540 км². Вона була розділена на 139 елементарних ділянок розміром 2×2 км² (Рис. 7а). Для виявлення оптичних аномалій рослинності та ґрунтів використано багатозональні аерокосмічні знімки, на яких зафіксовані різні періоди вегетації рослин та стану ґрунтів. Це дало змогу визначити найбільш інформативні періоди реєстрації аномалій, пов'язаних із покладами ВВ. Неотектонічна активність ділянок (Рис. 7б) виділялася за такими геологічними ознаками: аномально підвищені геоморфологічні рівні, незвичне розташування терасових рівнів у долині річки Ромен, зміщення русла річки, центробіжне розтікання яружно-балкової мережі, асиметрія схилів, а також розвиток донних врізів, молодих ярів і конусів виносу. За цими ознаками територія Турутинсько-Рогінцівської зони була поділена на окремі неотектонічні блоки, активність яких оцінена за шкалою від 1 до 10.



а



б

Рис. 7. Турутинсько-Рогінцівська зона структур:

а – структурна карта за горизонтами відбиття V_{B2} та V_{B3} з результатами попередніх аерокосмічних досліджень; б – схема відносної неотектонічної активності блоків

Для скорочення процедури формування оптимального компромісного набору інформативних ознак наявності вуглеводнів і оцінювання нафтогазоперспективності ділянок застосовано ГА, які базуються на еволюційному принципі, запозиченому з мікробіології. Генетичні методи – це евристичні алгоритми пошуку квазіоптимальних рішень, засновані на гіпотезі Холланда, за якою кращі рішення при схрещуванні породжують ще кращі варіанти (Siddique, etc., 2017). У контексті пошуку покладів ВВ завдання формується як визначення подібності досліджуваної ділянки до узагальненого “портрета” родовища, враховуючи різні геологічні, стратиграфічні та гідрогеологічні фактори. ГА імітують процеси еволюції, використовуючи поняття з генетики: популяція ознак формується випадково, далі через операції схрещування, мутації та селекції відбираються найкращі набори. Цей цикл повторюється від покоління до покоління до стабілізації якості рішень, що дає змогу швидко виділити найбільш інформативні ознаки і сформувані “узагальнений

портрет” перспективної ділянки. У цьому випадку запозичення з мікробіології еволюційних методів для математичного моделювання пошуку ВВ на основі ГА слугує прикладом міждисциплінарного підходу до вирішення технічних задач (Alam T., etc., 2020). Для всіх сформованих наборів (комплектів) значень ознак обчислюється функція фітнесу, за максимальним значенням якої вибирається компромісний варіант (Федоровський та ін., 2004). Функція фітнесу для кожної X_l хромосоми:

$$FF(X_l) = \min_{i=1}^k \{F_{il}\}, \quad (9)$$

$$F_{il} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m p_j G(b_{jl}, a_{jl}), \quad (10)$$

$$G(b_{jl}, a_{jl}) = 1 - S(b_{jl}, a_{jl}), \quad (11)$$

$$S(b_{jl}, a_{jl}) = \frac{|(a_{jl} - b_{jl})|}{|a_{jl}|}, \quad (12)$$

де F – функція належності; G – функція відповідності; S – функція близькості; k – кількість ділянок родовищ ВВ; $l = 1, 2, \dots, k$; m – кількість

інформативних ознак; a_{jl} – значення j -ї ознаки l -ї ділянки родовища ВВ; p_j – значення вагового коефіцієнта j -ї ознаки l -ї свердловини, $j = 1, 2, \dots, m$; n – кількість сформульованих наборів (комплектів) значень ознак; b_{jr} – значення j -ї ознаки r -го варіанта набору значень ознак, $r = 1, 2, \dots, n$.

Як вхідна інформація для апробації зазначеної моделі були використані:

топографічні карти масштабів 1:50000 – 1:100000; структурні карти масштабів 1:200000 – 1:25000 за різними відбивними горизонтами;

матеріали багатозональних космічних зніманих;

дані радарного топографічного знімання (SRTM);

основні відомості про нафтогазоносність еталонних родовищ та промислові дані щодо продуктивності свердловин, які пробурені в межах району досліджень (параметричні, пошукові, розвідувальні, експлуатаційні).

Для оцінювання нафтогазоперспективності ділянок Турутинсько-Рогінцівської зони структур ДДЗ на регіональному рівні було вибрано такі інформативні ознаки (Хижняк та ін., 2016):

1. Інтенсивність залишкових аномалій гравітаційного поля (–16 – +4 мГал);
2. Інтенсивність гравітаційного поля (–5 – +2 мГал);
3. Величина геотермічного ступеня (20 – 40 м/С);
4. Інтенсивність магнітного поля (–500 – 0 нТл);
5. Температура на зрізі 3500 м (140 – 180 С);
6. Температура на зрізі 5000 м (140 – 180 С);
7. Температура підшви відкладів верхньовізейського під'ярусу нижнього карбону (75 – 150 С);
8. Неотектонічна активність блоків (1 – 10);
9. Інтенсивність оптичних аномалій (1 – 10).

У Табл. 1 надані інформативні ознаки окремих ділянок родовищ ВВ Турутинсько-Рогінцівської зони структур, а також результати обчислення значень функції належності F для цих ділянок.

На основі викладеного методу ГА була створена програма, за допомогою якої на основі ознак ділянок родовищ ВВ отримано компромісний варіант комплексу інформативних ознак (за максимальним значенням функції $FF(X_r) = 0,865$) для оцінювання нафтогазоперспективності ділянок Турутинсько-Рогінцівської зони структур ДДЗ на регіональному рівні (Табл. 1).

Таблиця 1. Інформативні ознаки ділянок родовищ ВВ

№№ ділянок родовищ ВВ	Функція F	Значення окремих ознак								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
21	0,81	-4	-10	45	-210	120	150	150	10	10
27	0,81	-2	-6	45	-215	100	145	80	8	9
22	0,83	-3	-9	45	-185	110	140	80	7	8
10	0,84	-5	-10	45	-200	100	145	100	5	6
16	0,82	-4	-3,5	40	-270	90	130	100	7	9
17	0,82	-5	-4	40	-275	150	140	110	7	9
18	0,82	-5	-5,5	40	-250	100	150	100	7	6
15	0,82	-3	-2	40	-260	100	130	95	6	9
29	0,81	-6	-12	40	-185	110	150	100	5	6
Вагові коефіцієнти		3	4	2	3	4	4	4	8	8
Значення компромісного набору ознак		-5	-9	40	-210	100	150	100	6	9

Отриманий комплект інформативних ознак було використано для порівняння з ним характеристик

(ознак) при класифікації кожної із 139 ділянок Турутинсько-Рогінцівської зони структур ДДЗ, шляхом послідовного обчислення функції належності F . На лінгвістичному рівні абстракції завдання оцінювання нафтогазоперспективності ділянки може бути сформульована зокрема так: наскільки об'єкт розпізнавання (в нашому випадку це ділянки досліджуваної території) відповідає компромісному набору ознак.

Для формалізації процесу автоматичного порівняння ділянок з компромісним комплектом ознак застосовано методологію класифікації дискретних об'єктів. Для цього були використані алгоритм і програма на основі методу багатокритеріальної оптимізації (Хижняк та ін., 2017). Для розв'язання таких задач використовуються алгоритми, які ґрунтуються на обчисленні оцінок, що складаються з таких етапів: введення функції близькості порівнюваних величин – S , обчислення оцінки для функції близькості (функції відповідності) – f , обчислення оцінок відповідності ознак досліджуваної ділянки території інформативним ознакам ділянки, прийнятої за еталон (функції приналежності), – F (узагальнений критерій). Оцінка ступеня відповідності досліджуваної ділянки компромісному комплекту ознак визначається автоматично за значенням функції належності.

Для оцінки ступеня належності об'єкта (процесу) A до об'єкта (процесу) B визначається функція належності, як узагальненого критерію:

$$F(B, A) = \sum_{j=1}^n \rho(b_j, a_j) \cdot f(b_j, a_j). \quad (13)$$

Обчислення оцінок на опорній множині означає визначення близькості між усіма параметрами одного класу і об'єктом, що класифікується, з урахуванням міри важливості характеристик класу – $\rho(b_j, a_j)$. Найбільшого значення функція належності досягає при збігу значень усіх параметрів, а найменшого значення, рівного нулю, – коли не відповідає жодному параметру.

Функція відповідності значення параметра a до параметра b визначається як

$$f(b_j, a_j) = [1 - S_j(b_j, a_j)]. \quad (14)$$

Функція відповідності f має тим більше значення, чим менша похибка, тобто, чим менша різниця між значенням вимірюваної характеристики задачі та значенням параметра апаратури.

Визначаємо близькість значення параметра a до параметра b за допомогою функції близькості $S_j(b_j, a_j)$, оскільки об'єкти та явища природокористування – це складні системи, які між собою взаємодіють, та, своєю чергою, мають різний вплив на отримання максимального значення. Тому автором було адаптовано метод багатокритеріальної оптимізації для задач природокористування шляхом введення $S_j(b_j, a_j)$ для таких випадків:

$$\begin{aligned} S_j(b_j) &= \bar{a}_j - b_j / \bar{a}_j, && \text{для випадку, коли} \\ &&& \text{розглянутий об'єкт найбільше відповідає еталону;} \\ S_j(b_j) &= b_j - \bar{a}_j / b_j, && \text{для випадку, коли} \end{aligned} \quad (15)$$

розглянутий об'єкт найменше відповідає еталону.

Тепер класифікацію процесів чи об'єктів можна формалізувати як задачу багатокритеріальної оптимізації m критеріїв, кожний з яких виступає як функція відповідності характеристики b параметру a .

У разі, якщо для якої-небудь характеристики тематичної задачі не буде відповідного параметра, тоді $S(b_j, a_j) = 0$.

Результати оцінювання перспективності ділянок Турутинсько-Рогінцівської зони, отримані методом генетичних алгоритмів з інтеграцією аерокосмічних і наземних даних, наведені на Рис. 8. Відносна перспективність відображена градієнтними кольорами, пропорційними рівню нафтогазоперспективності. Аналіз проведених досліджень свідчить, що найбільш неотектонічно активні блоки збігаються зі Східнорогінцівським родовищем (10 балів), Північнорогінцівською, Східнокалінівською та Південнобочаренківською структурами (9–10 балів). У неотектонічному плані досить значний інтерес становить блок, розташований на південний захід від Великобубнівського родовища (10 балів).

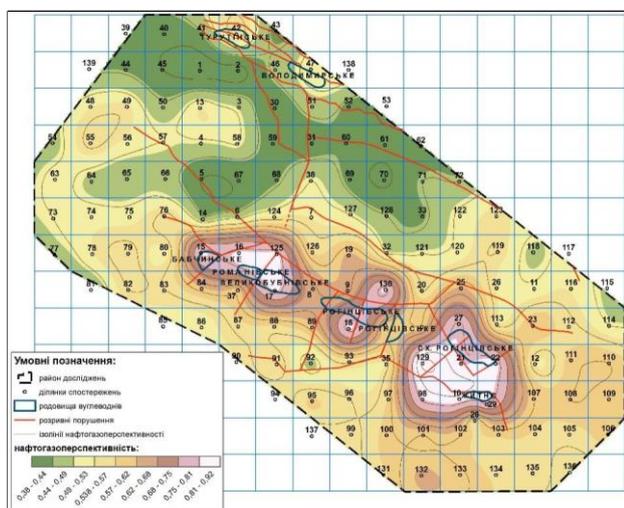


Рис. 8. Результат оцінювання нафтогазоперспективності ділянок Турутинсько-Рогінцівської зони структур ДДЗ

На відміну від традиційних прямих методів, які припускають однозначність і точність відповідності аномалій, запропонований підхід враховує нелінійний і нерівномірний характер процесів нафтогазонакопичення, а також математичну некоректність прямих і обернених задач розвідки (Хижняк та ін., 2017). Це робить його особливо корисним на етапі, що передуює проведенню бурових робіт та екологічного моніторингу площ.

Висновки

Викладені дані свідчать, що вивчення та використання оптичних характеристик елементів ландшафту (рослин та ґрунтів) у різних діапазонах спектра – новий перспективний напрямок у вирішенні нафтогазопошукових завдань. На сьогодні у різних геологічних і ландшафтних умовах суходолу виконано апробацію математичних методів аерокосмічного геомоніторингу для вирішення різноманітних нафтогазовшукових завдань більш ніж на ста об'єктах. Підтвердженість прогнозів при цьому становила не менше 80%.

Нааявність оптичних аномалій або аномалій іншої природи (геохімічної, геофізичної тощо) може свідчити про перспективність прогнозних пасток, над якими вони знаходяться. Крім вирішення нафтогазопошукових завдань, статистичний метод виділення оптичних аномалій ландшафту, які обумовлені покладами вуглеводнів, може бути застосований і для інших галузей, де потрібно виділити окремі аномалії на досліджуваних площах.

Використання методу спектральної автокореляції дає змогу успішно уточнювати контури покладів вуглеводнів за результатами як наземних, так і дистанційних спектрометрувань.

На прикладі Турутинсько-Рогінцівської зони структур доведено можливість використання евристичних методів генетичного алгоритму і методу багатокритеріальної оптимізації для оцінювання нафтогазоперспективності і вибору ділянок для наступних геофізичних та геохімічних розвідувальних робіт на основі міждисциплінарної інтеграції аерокосмічної і наземної інформації різної фізичної природи і даних різної розмірності.

Отже, можна стверджувати, що евристичні методи: генетичних алгоритмів, багатокритеріальної оптимізації, міждисциплінарна інтеграція аерокосмічної та наземної інформації можуть бути успішно застосовані для вирішення різних нафтогазопошукових завдань.

Внесок авторів: Концептуалізація – О. І. Архіпов, О. Д. Федоровський; методологія – О. І. Архіпов, О. Д. Федоровський, А. В. Хижняк, формальний аналіз – О. І. Архіпов, А. В. Хижняк, систематизація, візуалізація – О. І. Архіпов, А. В. Хижняк, підготовка тексту статті: авторський рукопис – О. І. Архіпов, А. В. Хижняк, рецензування та редагування – О. І. Архіпов, А. В. Хижняк, А. Д. Бондаренко, візуалізація – А. Д. Бондаренко. Всі автори прочитали та погодились 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.

Authors contribution: Conceptualization – O. I. Arkhipov, O. D. Fedorovsky; methodology – O. I. Arkhipov, O. D. Fedorovsky, A. V. Khyzhnyak, formal analysis – O. I. Arkhipov, A. V. Khyzhnyak, systematization, visualization – O. I. Arkhipov, A. V. Khyzhnyak, preparation of the text of the article: author's manuscript – O. I. Arkhipov, A. V. Khyzhnyak, review and editing – O. I. Arkhipov, A. V. Khyzhnyak, A. D. Bondarenko, 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

- Архіпов, О. І., Станкевич, С. А., Титаренко, О. В. (2009). Картування границь нафтогазоносних ділянок за даними наземного спектрометрування. *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики*, 6, 123–131. Взято з <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0000176818>.
- Лукин, А. Е. (2004). Прямые поиски нефти и газа: причины неудач и пути повышения эффективности. *Геолог Украины*, 3, 18–43.
- Перерва, В. М., Лялько, В. И., Архипов, А. И. и др. (1995). *Прямой поиск залежей нефти и газа дистанционными методами (предварительный опыт, перспективы развития)*. Киев : НАН Украины, Центр аэрокосм. исслед. Земли. Препр.
- Седерова, О. В., Архипов, О. І., Голубов, С. І., Бондаренко А. Д. (2021). Експериментальне обґрунтування використання безпілотних літальних апаратів для прогнозування нафтогазоперспективних об'єктів. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 8(3), 49–57. doi.org/10.36023/ujrs.2021.8.3.200.
- Станкевич, С. А., Титаренко, О. В. (2008). Оптимізація даних наземного спектрометрування при картуванні меж фітоіндикаційних аномалій. *Науковий вісник Національного аграрного університету*, 128, 312–319.
- Федоровський, А. Д., Артюшенко, М. В., Козлов, З. В. (2004). Параметрический синтез космических систем зондирования Земли на основе генетического метода. *Космична наука і технологія*, 10(1), 54–60. doi.org/10.15407/knit2004.01.054.
- Хижняк, А. В., Єфіменко, Т. А., Архипов, О. І., Томченко, О. В., Суханов, К. Ю., Федоровський, О. Д. (2016). Евристичні методи оцінки ділянок нафтогазоперспективних територій на основі міждисциплінарної інтеграції аерокосмічної і наземної інформації (на прикладі Дніпровсько-Донецької западини). *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 9, 12–21. doi.org/10.36023/ujrs.2016.9.75.
- Хижняк, А. В., Архипов, О. І., Федоровський, О. Д., Єфіменко, Т. А. (2017). Пошук покладів вуглеводнів на основі аналізу космічної і наземної інформації методами багатокритеріальної оптимізації та аналітичних мереж (на прикладі Дніпровсько-Донецької западини). *Доповіді Національної академії наук України*, 7, 56–63. Взято з <https://nasplib.isofts.kiev.ua/handle/123456789/126799>.
- Якимчук, В. Г., Левчик, Є. І., Суханов, К. Ю., Порушкевич, А. Ю., Федоровський, А. Д. (2012). Визначення інформативних ознак у спектрах відбиття та індукованої лазером флуоресценції рослинного покриву для аерокосмічного зондування земної поверхні. *Доповіді Національної академії наук України*, 1, 132–136. Взято з http://nbuv.gov.ua/UJRN/dnanu_2012_1_22.
- Alam, T., Kwon, H., Lee, J. (2020). A review on genetic algorithm: Past, present, and future. *Multimedia Tools and Applications*, 79(23–24), 15253–15286. doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6.
- Daw, R. H. (1970). The Advanced Theory of Statistics. By M. G. Kendall and A. Stuart. Volume 1, Distribution Theory (Second Edition) 1963. Pp. xii + 433, Price 84s. Volume 2, Inference and Relationship. 1961. Pp ix + 676. Price 132s. Volume 3, Design and Analysis, and Time Series. 1966. Pp. ix + 552. Price 136s. London: Charles Griffin & Co., Ltd. *Journal of the Staple Inn Actuarial Society*, 19(01), 72–77. doi.org/10.1017/S0020269X00008276.
- Fedorovskiy, A. D., Artyushenko, M. V., Kozlov, Z. V. (2004). Parametric synthesis of the Earth sensing space systems based on the genetic method. *Space science and technology*, 10(1), 54–60. doi.org/10.15407/knit2004.01.054 (in Ukrainian).
- Khyzhnyak, A. V., Yefimenko, T. A., Arkhipov, O. I., Tomchenko, O. V., Sukhanov, K. Yu., Fedorovskiy, O. D. (2016). Heuristic methods for evaluating areas of oil and gas promising territories based on interdisciplinary integration of aerospace and ground information (on the example of the Dnieper-Donets Depression). *Ukrainian Journal of Remote Sensing of Earth*, 9, 12–21. doi.org/10.36023/ujrs.2016.9.75 (in Ukrainian).
- Volume 2, Inference and Relationship. 1961. Pp ix + 676. Price 132s. Volume 3, Design and Analysis, and Time Series. 1966. Pp. ix + 552. Price 136s. London: Charles Griffin & Co., Ltd. *Journal of the Staple Inn Actuarial Society*, 19(01), 72–77. doi.org/10.1017/S0020269X00008276.
- Merriam, D. F. (1982). Development, significance, and influence of geomathematics: Observations of one geologist. *Mathematical Geology*, 14, 1–10. doi.org/10.1007/BF01037443.
- Popov, M. O., Topolnytskyi, M. V., Titarenko, O. V., Stankevich, S. A., Andreiev, A. A. (2020). Forecasting gas and oil potential of subsoil plots via co-analysis of satellite, geological, geophysical and geochemical information by means of subjective logic. *WSEAS Transactions on Computer Research*, 8, 90–101. doi.org/10.37394/232018.2020.8.11.
- Schowengerdt, R. A. (2007). *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. Amsterdam : Elsevier. doi.org/10.1016/B978-0-12-369407-2.X5000-1.
- Siddique, A., Adeli, H. (2017). Nature-inspired computing: An overview and some future directions. *Cognitive Computation*, 9(5), 701–715. doi.org/10.1007/s12559-017-9502-z.
- Stankevich, S. A., Titarenko, O. V. (2013). Multi-segment oil and gas deposit edge detection by high-dimensional spectrometric data. *Journal of Information, Control and Management Systems*, 11(2), 145–154.
- Stankevich, S. A., Titarenko, O. V., Svideniuk, M. O. (2019). *Landslide susceptibility mapping using GIS-based weight-of-evidence modelling in Central Georgian regions*. Proceedings of International Scientific Conference “Natural Disasters in Georgia: Monitoring, Prevention, Mitigation”. Tbilisi: Mikheil Nodia Institute of Geophysics, 187–190. Взято з openlibrary.ge/handle/123456789/8668.

Reference

- Khyzhnyak, A. V., Arkhipov, O. I., Fedorovskiy, O. D., Yefimenko, T. A. (2017). Search for hydrocarbon deposits based on the analysis of space and ground information using multi-criteria optimization and analytic network processes (on the example of the Dnieper-Donets Depression). *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 7, 56–63. Retrieved from <https://nasplib.isoftware.kiev.ua/handle/123456789/126799> (in Ukrainian).
- Lukin, A. E. (2004). Direct oil and gas prospecting: reasons of failures and ways to improve efficiency. *Geologist of Ukraine*, 3, 18–43 (in Ukrainian).
- Merriam, D. F. (1982). Development, significance, and influence of geomathematics: Observations of one geologist. *Mathematical Geology*, 14, 1–10. doi.org/10.1007/BF01037443.
- Pererva, V. M.; Lyalko, V. I., Arkhipov, A. I. et al. (1995). *Direct search of oil and gas deposits by remote sensing methods*. National Academy of Sciences of Ukraine, Centre for Aerospace Research of the Earth. Prepr. Kyiv (in Ukrainian).
- Popov, M. O., Topolnytskyi, M. V., Titarenko, O. V., Stankevich, S. A., Andreiev, A. A. (2020). Forecasting gas and oil potential of subsoil plots via co-analysis of satellite, geological, geophysical and geochemical information by means of subjective logic. *WSEAS Transactions on Computer Research*, 8, 90–101. doi.org/10.37394/232018.2020.8.11.
- Schowengerdt, R. A. (2007). *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. Amsterdam : Elsevier. doi.org/10.1016/B978-0-12-369407-2.X5000-1.
- Sedlerova, O. V., Arkhipov, A. I., Golubov, S. I., Bondarenko, A. D. (2021). Experimental priming of unmanned aerial vehicles for forecasting oil and gas promising facilities. *Ukrainian Journal of Remote Sensing of the Earth*, 8(3), 49–57 (in Ukrainian).
- Siddique, A., Adeli, H. (2017). Nature-inspired computing: An overview and some future directions. *Cognitive Computation*, 9(5), 701–715. doi.org/10.1007/s12559-017-9502-z.
- Stankevich S.A., Titarenko O.V. (2008). Optimization of the ground spectrometry data at mapping of inter-phytosynthetic anomalies. *Scientific Vissnik of the National Agrarian University*, 128, 312–319 (in Ukrainian).
- Stankevich, S. A., Titarenko, O. V. (2013). Multi-segment oil and gas deposit edge detection by high-dimensional spectrometric data. *Journal of Information, Control and Management Systems*, 11(2), 145–154.
- Stankevich, S. A., Titarenko, O. V., Svideniuk, M. O. (2019). *Landslide susceptibility mapping using GIS-based weight-of-evidence modelling in Central Georgian regions*. Proceedings of International Scientific Conference “Natural Disasters in Georgia: Monitoring, Prevention, Mitigation”. Tbilisi: Mikheil Nodia Institute of Geophysics, 187–190. Retrieved from <https://openlibrary.ge/handle/123456789/8668>.
- Yakimchuk, V. G., Levchik, E. I., Sukhanov, K. Yu., Porushkevich, A. Yu., Fedorovskiy, A. D. (2012). Determination of informative features in reflection spectra and laser-induced fluorescence of vegetation cover for aerospace monitoring of the earth surface. *Dopovidi National Academy of Sciences of Ukraine*, 1, 132–136 (in Ukrainian).

MATHEMATICAL METHODS OF AEROSPACE MONITORING, ASSESSMENT OF THEIR DEMAND IN THE STUDY OF NATURAL RESOURCES: PART TWO – HYDROCARBON DEPOSITS

Arkhipov O. I., <https://orcid.org/0000-0003-2986-6185>

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

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

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

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

The article addresses a current issue: the justification for applying certain proposed mathematical methods to the processing of remote and ground-based spectrometric data on plants and soils. These methods, previously tested in various oil and gas exploration tasks, are considered alongside established direct approaches (geophysical, geochemical, biological, etc.) under diverse geological and landscape conditions. Based on a systematic approach, several mathematical techniques for aerospace geomonitoring of natural resources, including hydrocarbons, have been developed or adapted.

For over thirty years, researchers at Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine have tested dozens of well-known and proprietary techniques for processing plant and soil spectrometry data collected through remote sensing and ground-based research. These include factor analysis, spectral contrast methods, analytical networks, structural and texture analysis, interdisciplinary integration of aerospace and ground-based data, and a systematic approach. Additionally, heuristic criteria and decision-making methods have been applied for detailed assessments of the oil and gas potential of specific onshore areas.

Based on expert evaluations and the hierarchy analysis method described in Part 1, the most effective methods were identified. These include: a statistical method for detecting landscape optical anomalies associated with hydrocarbon deposits using aerospace imagery, the spectral contrast method, the spectral autocorrelation method, and a multicriteria optimization method.

These techniques are detailed in this article, with examples of their application in hydrocarbon exploration and the results of their evaluation in various geological and landscape settings.

Keywords: aerospace geomonitoring, systems analysis methods, optical and geophysical anomalies, geofluid dynamic and neotectonic processes, morphometric studies, structural interpretation, photometry.

Рукопис статті отримано 03.10.2025

Надійшлою остаточною версією: 03.03.2026

Публікація статті: 30.03.2026

Received 03.10.2025

Revised 03.03.2026

Accepted 30.03.2026