

УДК 004.9

¹С.Л. Нікулін, доктор геол. наук, професор,²В.Ю. Каштан, канд. техн. наук, доцент,³В.В. Гнатушенко, доктор техн. наук, професор,⁴О.В. Коробко, асистент^{1,2,3,4}Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» м. Дніпро, Україна
nikulin.s.l@nmu.one, kashtan.v.yu@nmu.one, hnatushenko.V.V@nmu.one, korobko.o.v@nmu.one

Оцінка інформативності контрастних границь яскравості даних дистанційного зондування Землі при вирішенні геологічних задач

Описано підхід до побудови та оцінки інформативності карт складності геологічної будови територій, що ґрунтується на аналізі контрастних границь яскравості, тону або кольору геозображень, до яких відносяться космічні знімки, цифрові моделі рельєфу та растрові карти фізичних полів. Показано, що запропонований показник складності геологічної будови може ефективно використовуватися для пошуку геологічних об'єктів в якості додаткової пошукової ознаки. Побудовано та проаналізовано карти складності для трьох реальних родовищ корисних копалин.

Ключові слова: супутникові знімки, геофізичні поля, контрастні границі яскравості, складність геологічної будови, пошукові ознаки геологічних об'єктів

DOI: 10.31474/1996-1588-2024-1-38-29-38

Вступ

У сфері технологій дистанційного спостереження, яка активно розвивається, інтеграція складних комп'ютерних систем відіграє вирішальну роль у розширенні кількості даних, які можна отримати зі знімків, здобутих цими методами [1]. Від складних алгоритмів обробки зображень до програм машинного навчання, синергія комп'ютерних технологій і дистанційного зондування дозволяє досягти нових результатів в аналізі та інтерпретації неоднорідних просторових даних.

Зокрема, це важливо в при оцінці складності геологічної будови територій, яка традиційно виконується для управління ризиками підземних споруд, таких як тунелі, шахти та підземні комунікації. Крім того, в останні десятиліття складність геологічної структури також була визнана позитивним показником для локалізації родовищ корисних копалин, включаючи як руду, так і нафту/газ. Так, у роботі [2] розглянуто вплив масштабу геологічних карт на силу зв'язку між геологічною складністю та мінералізацією золота. Це демонструє, що геологічна складність виявляється цінною як початкова прогностична карта для аналізу перспектив і визначення цілей розвідки золота. У статті [3] вказується на приуроченість родовищ золота до зон розломів, створених групами допоміжних розломів. У статтях [4-6] геологічну складність використовували як позитивний показник наявності рудних родовищ.

Автори даної роботи показали, що складність геологічної будови знаходиться в

прямій залежності від ймовірності відкриття нафтогазових і рудних родовищ [7-9].

Таким чином, слід визнати перспективним підхід до оцінки перспектив виявлення геологічних об'єктів (у тому числі, родовищ корисних копалин) на основі аналізу складності геологічної будови.

У цій статті використовується методика розрахунку спеціального показника складності геологічної будови (ПСГБ) шляхом виділення та обробки контрастних границь яскравості, тону чи кольору геозображень, а також оцінюється інформативність цього показника при вирішенні практичних задач надкористування.

Методологія

На рис. 1 наведено структурну схему методології. Побудова карток ПСГБ заснована на використанні даних, представлених або у формі піксельних зображень або регулярних ґридів (сіток), тобто, панхроматичних і багатоканальних космічних знімків [10], двовимірних фізичних полів (гравітаційного, магнітного і ін.) та регулярних цифрових моделей рельєфу. Оскільки ґриди дані мають структуру, аналогічну піксельній, можливо трактувати їх як зображення, до яких застосовуються всі стандартні методи обробки растрових зображень.

Постає проблема вибору показника складності геологічної структури, який можна легко обчислити з растрового зображення і який точно відбиває щільність границь геологічних об'єктів та лінійних диз'юнктивних структур. Таким показником може бути протяжність контрастних границь яскравості (або тону чи кольору) зображення. У цьому випадку ми можемо

спростити задачу оцінки складності геологічної будови до 1) виділення контрастних границь на зображенні та 2) розрахунку сумарної довжини границь у межах ковзного вікна розміром $p \times p$, де

$p = 3, 5, 7, \dots$ – деяка непарна кількість пікселів зображення або клітинок сітки (гріду) фізичного поля.

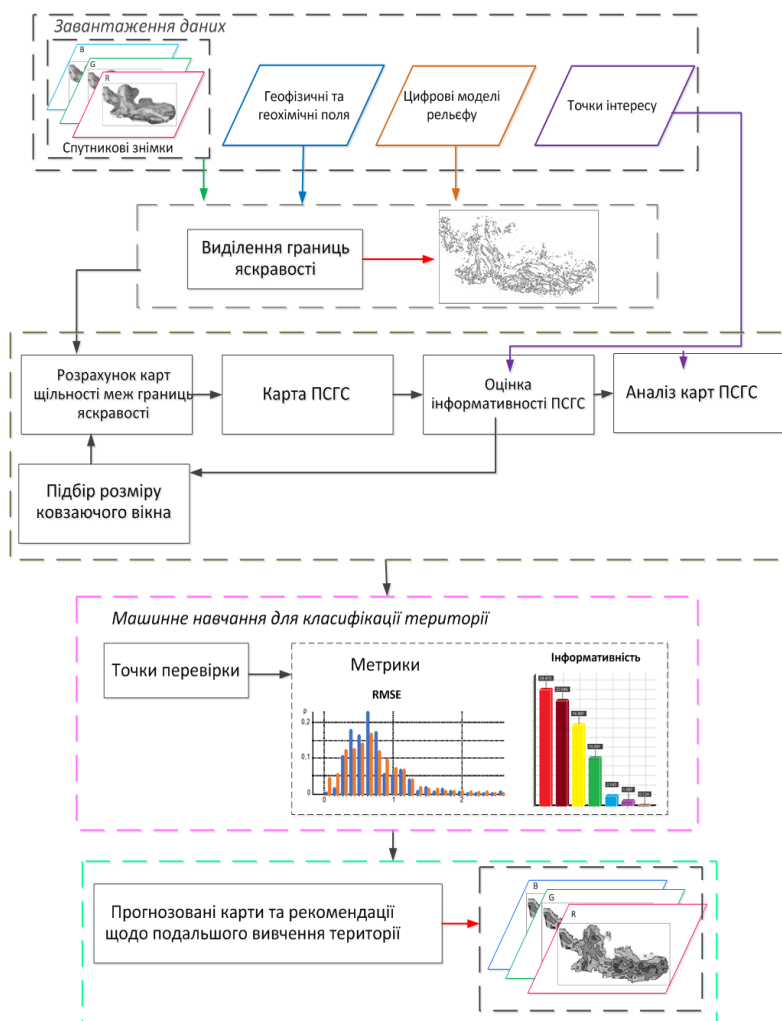


Рисунок 1 – Структурна схема методології

На даний момент найбільш популярними методами виділення контрастних границь є різні маскові алгоритми і, в першу чергу, так званий оптимальний детектор Кенні [11].

Результатом роботи детектора Кенні є бінарна карта, де одиниці відповідають наявності границь, а нулі - їх відсутності. Підрахунок розміру границь усередині поля зводиться до простого знаходження кількості пікселів із одиничними значеннями. Показник геологічної складності, розрахований таким чином, відображає не тільки загальну кількість утворень в межах вікна, але й форму їх границь (рисунок 2). Проблема полягає в тому, що геологічні границі можуть по-різному відображатися в певних фізичних полях і ландшафтах, у тому числі не відображатися взагалі. Тому для впевненого визначення границь необхідно використовувати максимально широкий діапазон вихідних даних, будуючи границі

яскравості на окремих зображеннях і об'єднуючи отримані бінарні карти за допомогою операції бінарної піксельної диз'юнкції:

$$C = A \text{ OR } B, \tag{1}$$

де A і B дві бінарні карти; C підсумкова карта, отримана внаслідок об'єднання A і B .

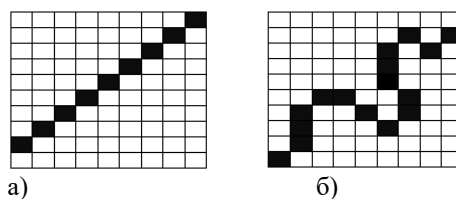


Рисунок 2 – Границі простих (а) і складних (б) фігур у бінарному зображенні (довжина – 9 і 16 пікселів відповідно)

Це дозволяє мінімізувати похибку та підвищити достовірність визначення ПСГБ.

Важливим параметром є розмір вікна, де підсумовується загальна довжина границь. Як свідчить досвід авторів, найбільш раціональним способом знаходження оптимального розміру вікна є розрахунок карти ПСГБ при різних вікнах і вибір того з них, при якому відомі об'єкти

розшукуваного типу потрапляють до найбільш вузького діапазону значень карти ПСГБ.

Нижче наведені результати обчислювальних експериментів з розрахунку показника складності геологічної будови та оцінки їх прогностичних можливостей на кількох реальних родовищах золота та нафти і газу.

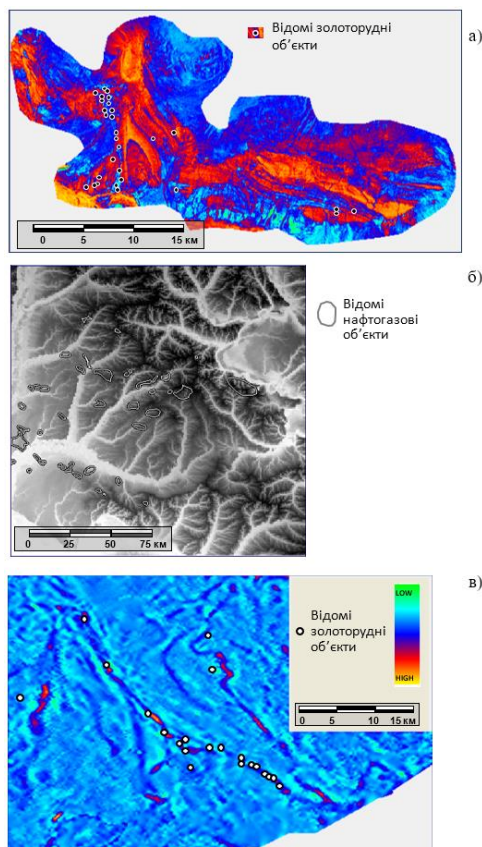


Рисунок 3 – а) Landsat-8 супутниковий знімок (ділянка 1); б) дані SRTM (ділянка 2); в) растрова карта гравітаційного поля V_z (ділянка 3)

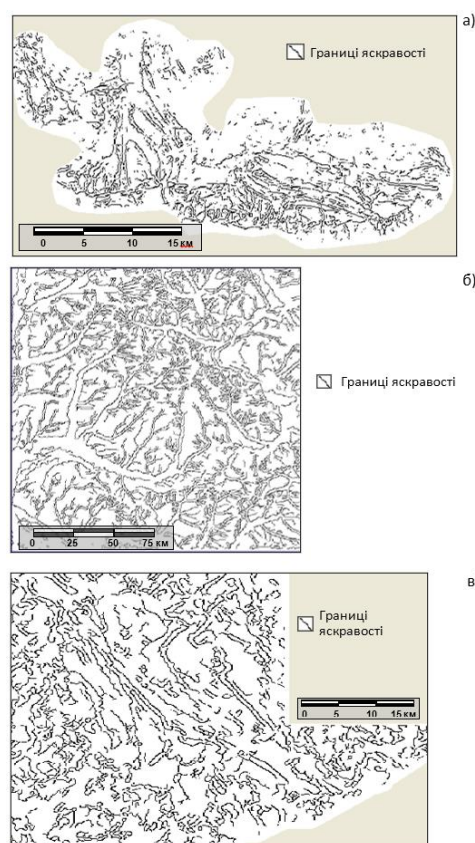


Рисунок 4 – Отримані бінарні карти границь яскравостей для а) ділянка 1; б) ділянка 2; в) ділянка 3

Результати експериментальних досліджень

Ділянка 1. Площа становить близько 800 км² і розташована в межах Туранської плити (Узбекистан). На площі виявлено кілька рудопроявів і окремих точок з підвищеним вмістом золота, які використовувалися як опорні об'єкти (еталонні об'єкти).

Вихідними даними є результати спостережень 6 геофізичних полів масштабу 1:50000 (вертикальна похідна гравітаційного поля V_z , дві похідні магнітних полів ΔT і ΔZ , поле γ -променів, два природних електричних поля), а також синтезований супутниковий знімок Landsat (канали 2, 3, 4) з роздільною здатністю 30 м.

Ділянка 2. Має розміри 130x137 км, площа близько 17000 км² і розташовується у центральній частині нафтогазоносної Дніпровсько-Донецької западини. На території ділянки відомо кілька десятків родовищ, переважно газоконденсатних. Місцевість рівнинна, з розвинутою гідрографічною мережею. Вихідні дані представлені магнітною та гравіметричною зйомкою по мережі 500x500 м та радарним космічним знімком, отриманим в результаті місії SRTM [12].

Ділянка 3. Район розташований у межах Приазовського блоку Українського кристалічного щита. На території району розташовані золотоносна Сорокинська гранітно-зеленокам'яна споруда та перспективна Берестовецька споруда. Всередині Сорокинської структури виявлено

декілька золоторудних тіл. Вони служили еталонними об'єктами в експериментах. Вхідні дані представлені магнітними та гравітаційними знімками масштабу 1:50000 (частково 1:10000 та 1:25000) та радіолокаційними зображеннями SRTM. Приклади вихідних карт показані на рисунку 3.

Для кожної ділянки за допомогою детектора Кенні були побудовані бінарні карти, що відображають контрастні границі яскравості доступних растрових карт потенційних полів (гридів) і космічних зображень (рисунок 4) Далі бінарні карти для певної області були об'єднані піксельною диз'юнкцією, і на основі отриманих даних був побудований набір растрових карт ПСГБ, що представляють довжину границь всередині ковзних вікон різних розмірів клітинок ґриду (рисунок 5).

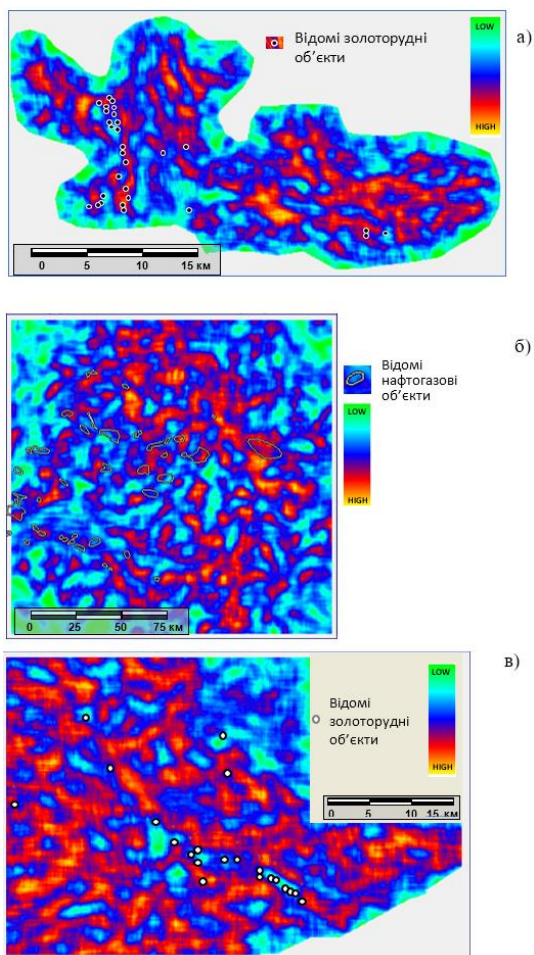


Рисунок 5 – Отримані карти ПСГБ для а) ділянка 1; б) ділянка 2; в) ділянка 3

Для оцінки інформативності показника геологічної складності як ознаки, яка може бути корисною для пошуку нових родовищ, проаналізовано ступінь збігу гістограм розподілу значень карти показника геологічної складності, складених а) для всієї площі та б) для еталонних

точок, тобто пікселів, розташованих над відомими родовищами. Чим менший ступінь перекриття гістограм, тим легше відокремити перспективні точки, схожі на еталонні, від решти території, та нижче помилка класифікації за значеннями карт.

Для оцінки ступеня перекриття гістограми була використана середньоквадратична помилка Root Mean Square Error (RMSE), розрахована як [13]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2}{N}}, \quad (2)$$

N – кількість інтервалів гістограми; i є змінною;

$i=1...N$; x_i є значенням i -го стовпця першої гістограми;

\hat{x}_i значення i -го стовпця другої гістограми.

Значення N для зразка було розраховано за формулою Стерджеса [14]:

$$N = 1 + 3.322 \cdot \log(n), \quad (3)$$

де n кількість значень у вибірці.

Розраховане значення також було використано для вибірки, складеної з еталонних точок, щоб зробити обидва зразки порівнянними. Крім того, для підвищення достовірності розраховано ще один показник подібності гістограм – зсув їх модальних значень, вимірний у кількості інтервалів (гістограмних стовпчиків). Як зазначалось вище, на результати суттєво впливає розмір ковзного вікна. Тому всі обрахунки виконувались зі застосуванням декількох розмірів вікон, після чого обирався той, що забезпечує найкращі значення RMSE та зсув мод гістограм.

На рисунку 6 наведено гістограми карт ПСГБ для ділянки 1, побудованих для всієї ділянки та окремо для еталонних точок. Для при розміру вікна 15x15 пікселів (таблиця 1). Досягнуте одно з найкращих значень RMSE та найкраще значення зсуву мод. Відповідну карту ПСГБ наведено на рисунку 5а. Еталонні точки характеризуються підвищеними значеннями ПСГБ порівняно з територією загалом, що дозволяє використовувати отриману карту при прогнозі нових золоторудних об'єктів як додаткову пошукову ознаку.

Таблиця 1 – Показники збігу гістограм значень карт ПСГБ для ділянки 1

Розмір ковзного вікна, комірок	RMSE	Різниця мод, інтервалів
5x5	0.0228	0
11x11	0.0375	1
15x15	0.0427	2
21x21	0.0398	0

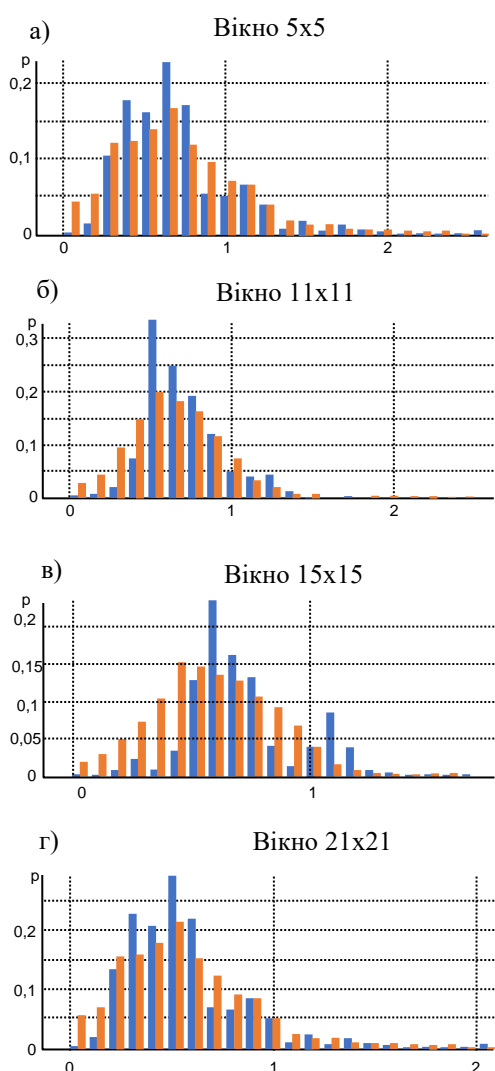


Рисунок 6 – Гістограми, побудовані за значеннями показника геологічної складності на всій території (помаранчеві стовпчики) та в опорних точках (сині стовпчики) ділянки 1 при різних розмірах ковзного вікна

Аналогічні дослідження були проведені для ділянок 2 та 3. На рисунку 7 наведені гістограми, побудовані при різних розмірах ковзного вікна за значеннями ПСГБ на всій території та окремо в еталонних точках ділянки 2. Найменше перекриття гістограм ПСГБ, побудованих для всієї ділянки та для еталонних точок, досягається при розмірі вікна 45x45 пікселів, а відстань - при вікні 15x15 (таблиця 2). При подальших дослідженнях доцільно використовувати карти, побудовані з використанням обох значень.

Для гістограм, побудованих за значеннями ПСГБ ділянки 3, найменший збіг досягається при вікні розміром 17x17 пікселів (рисунок 8, таблиця 3).

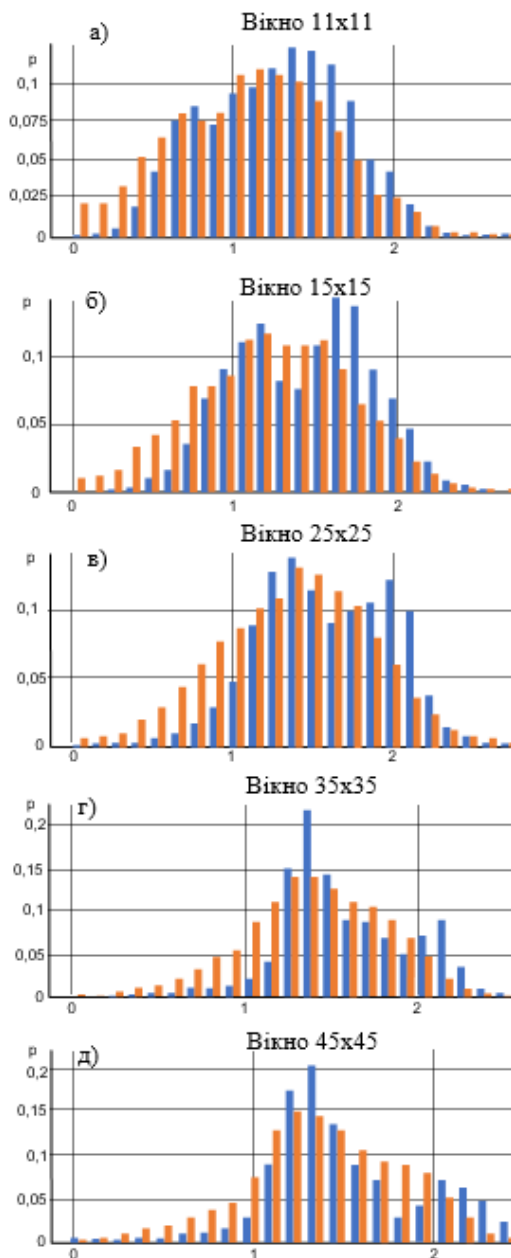


Рисунок 7 – Гістограми, побудовані за значеннями показника геологічної складності на всій території (помаранчеві стовпчики) та в опорних точках (сині стовпчики) ділянки 2 при різних розмірах ковзного вікна

Таблиця 2 – Показники збігу гістограм значень карт ПСГБ для ділянки 2

Розмір ковзного вікна, комірок	RMSE	Різниця мод, інтервалів
11x11	0.0178	2
15x15	0.0249	4
25x25	0.0241	0
35x35	0.0308	1
45x45	0.0492	1

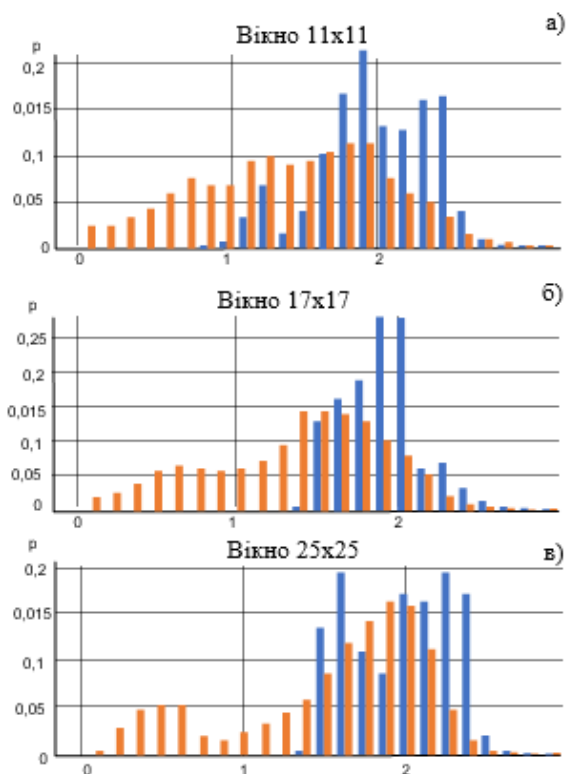


Рисунок 8 – Гістограми, побудовані за значеннями показника геологічної складності на всій території (помаранчеві стовпчики) та в опорних точках (сині стовпчики) ділянки 3 при різних розмірах ковзного вікна

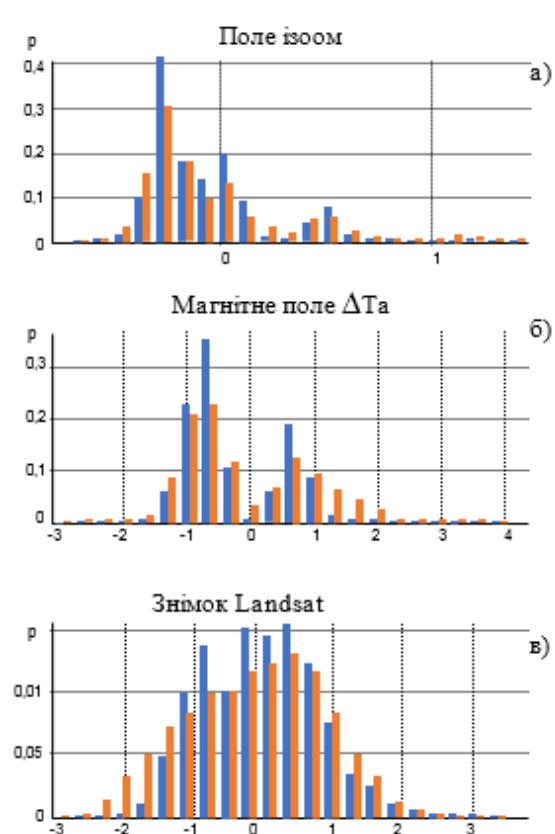


Рисунок 9 – Гістограми, побудовані за значеннями вихідних наборів даних на всій території та в еталонних точках ділянки 1

Таблиця 3 – Показники збігу гістограм значень карт ПСГБ для ділянки 3

Розмір ковзного вікна, комірок	RMSE	Різниця мод, інтервалів
11x11	0.04788	0
17x17	0.0513	4
25x25	0.0442	3

Обговорення та дискусія

Виникає очевидне питання: чи карти ПСГБ є більш інформативними, ніж оригінальні вхідні дані, з яких вони були побудовані? Для відповіді на це питання додатково були побудовані гістограми значень деяких вихідних наборів даних. На рисунку 9 наведено гістограми поля електричного опору порід, магнітного поля ΔT_a і зображення LandSat-8 для ділянки 1.

Неважко помітити, що гістограми, побудовані для всієї області та окремо для еталонних об'єктів, загалом повторюють одна одну, що свідчить про їх низьку індивідуальну інформативність з точки зору виявлення нових перспективних геологічних об'єктів (таблиця 4).

Таблиця 4 – Показники збігу гістограм значень вихідних наборів даних для ділянки 1

Набір даних	RMSE	Різниця мод, інтервалів
Поле електричного опору порід (ізоом)	0.0212	0
Магнітне поле ΔT_a	0.0226	0
Знімок Landsat	0.0357	0

Для ділянок 2 і 3 були розраховані гістограми за значеннями окремих вихідних наборів даних – фізичних полів, космознімку, цифрових моделей рельєфу. Як і у випадку ділянки 1, гістограми, побудовані для значень по всій території та у ділянках над еталонними об'єктами, мають більший збіг порівняно з ПСГБ, і, отже, малоефективні з погляду прогнозування.

Таким чином, у ході проведених робіт для кожної ділянки було визначено оптимальні розміри ковзного вікна, в якому проводиться розрахунок ПСГБ по карті границь яскравості зображення. Отримані карти ПСГБ наведено на рисунку 5.

Вони демонструють приуроченість відомих рудних і, меншою мірою, нафтогазових об'єктів до зон підвищених значень ПСГБ, що дозволяє розглядати показник складності як пошукову ознаку, більш інформативну порівняно з вихідними даними – полями, цифровими моделями рельєфу та космоснімками.

Як показує дане дослідження, значно ефективніше використовувати карти ПСГБ разом із іншими вихідними даними та результатами їх обробки у процедурах багатовимірної керованої класифікації. Самі собою карти ПСГБ не слід розглядати у якості остаточних, прогнозних, оскільки площа перекриття гістограм, наведених на рисунку 6-8 досягає в деяких випадках 40-50%, що хоч і менше значень, одержуваних за вихідними геозображеннями, але все одно недостатньо для впевненого прогнозування. Необхідно залучення всього обсягу доступних даних та апарату машинного навчання.

У зв'язку з цим була проведена оцінка інформативності отриманих карток ПСГБ, з точки зору їхньої здатності забезпечувати найкраще відділення точок інтересу від інших у багатовимірному просторі наборів даних (поряд з вихідними фізичними полями, супутниковими знімками, ЦМР, результатами їх різних перетворень тощо). Для оцінки інформативності (потенційної корисності) окремих наборів даних використовувалися критерії, засновані на дистанціях Кендала [15] та Бхаттачарія [16].

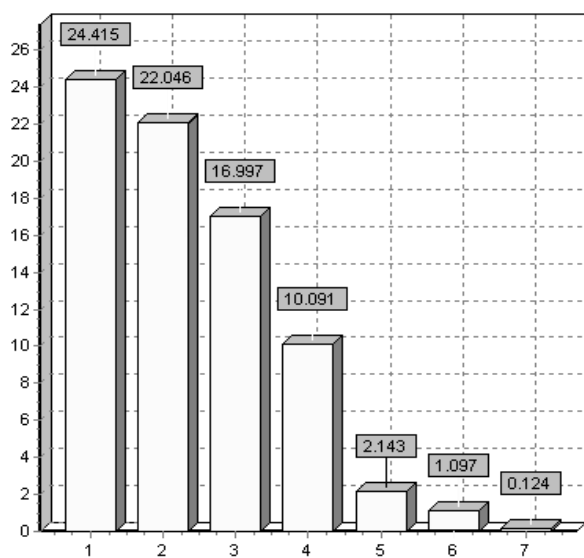


Рисунок 10 – Інформативність (по Бхаттачарія) наборів даних для ділянки 1, де:

1 – карта ПСГБ (вікно 15x15); 2 – карта ПСГБ (вікно 11x11); 3 – карта ПСГБ (вікно 5x5); 4 – карта ПСГБ (вікно 21x21); 5 – карта магнітного поля dTa; 6 – карта поля електричного опору порід; 7 – синтезований космічний знімок Landsat

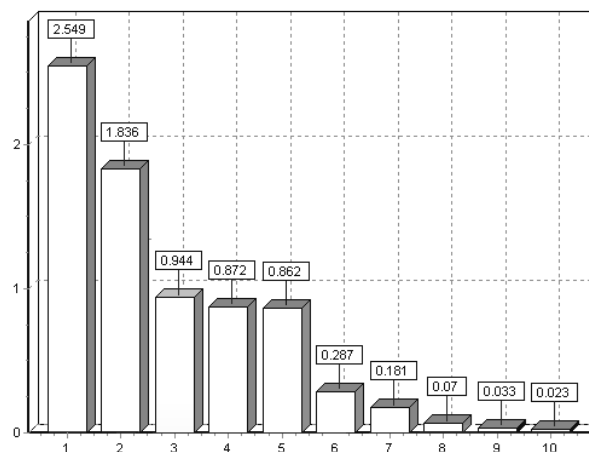


Рисунок 11 – Інформативність (по Бхаттачарія) наборів даних для ділянки 2, де:

1 – карта ПСГБ (вікно 25x25); 2 – карта ПСГБ (вікно 21x21); 3 – карта ПСГБ (вікно 35x35); 4 – гравітаційне поле V_z ; 5 – карта ПСГБ (вікно 45x45); 6 – карта магнітного поля dTa; 7 – радарний знімок SRTM; 8 – карта ПСГБ (вікно 11x11); 9 – карта ПСГБ (вікно 15x15); 10 – карта ПСГБ (вікно 5x5)

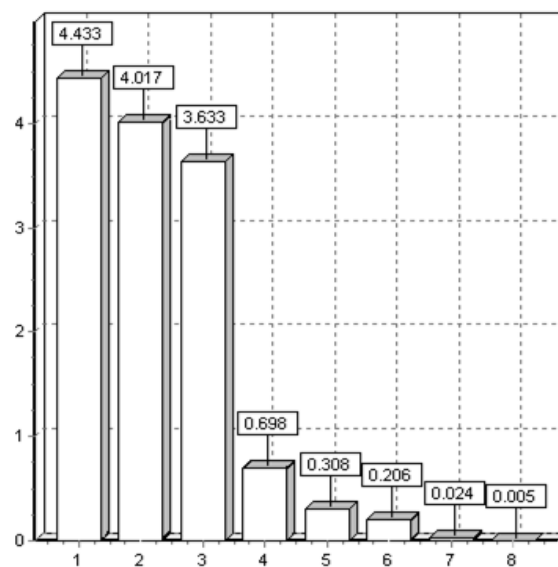


Рисунок 12 – Інформативність (по Кендаллу) наборів даних для ділянки 3, де:

1 – карта ПСГБ (вікно 17x17); 2 – карта ПСГБ (вікно 25x25); 3 – карта магнітного поля dTa; 4 – карта ПСГБ (вікно 11x11); 5 – карта ПСГБ (вікно 5x5); 6 – радарний знімок SRTM; 7 – гравітаційне поле V_z ; 8 – карта ПСГБ (вікно 35x35)

Як випливає з рисунку 10-12, отримані карти ПСГБ зазвичай значно перевищують за інформативністю вихідні карти і знімки.

Крім того, виконувалася і сама класифікація (розбиття осередків території на перспективний та неперспективний класи). Таке відділення здійснюється шляхом побудови роздільної гіперплощини в багатовимірному просторі ознак, що мінімізує ймовірність помилки класифікації (ЙПК).

В результаті введення у вихідний набір даних карт ПСГБ дозволило знизити ЙПК для ділянки 1 – на 3,18%, для ділянки 2 – на 11,8%, для ділянки 3 – на 5,6%. Оскільки у практиці використання машинного навчання на вирішення прогностичних геологічних завдань ЙПК у межах 20-30% вважається прийнятним, таке його зниження є значним результатом.

Висновки

Отримані карти ПСГБ, наведені на рисунку 3, демонструють приуроченість відомих рудних і, меншою мірою, нафтогазоносних об'єктів до зон більш високих значень ПСГБ, що дозволяє розглядати карти показника складності як більш інформативні для пошуку геологічних об'єктів у порівнянні з вхідними даними ДЗЗ – фізичними

полями, цифровими моделями рельєфу та супутниковими зображеннями.

Досвід показує, що набагато ефективніше використовувати карти ПСГБ в поєднанні з іншими необробленими даними та результатами їх обробки в процедурах багатовимірної контрольованої класифікації. Самі карти ПСГБ не слід розглядати як остаточні прогностичні карти, оскільки область перекриття гістограм, показаних на рис. 4-5 у деяких випадках досягає 40-50%, хоча ці значення менші, ніж значення, отримані з вихідних наборів даних. Отже, необхідно використовувати всі доступні дані та інструменти машинного навчання. У цілому отримані результати свідчать про перспективність підходу до розрахунку карт ПСГБ на основі аналізу контрастних границь геопросторових даних. Більшою мірою це стосується рудних родовищ і меншою – нафти і газу.

Карты ПСГБ можна використовувати самостійно для визначення перспективних ділянок; однак набагато ефективніше використовувати їх в операціях керованої класифікації в багатовимірному просторі, сформованому з вихідних наборів даних і їх трансформантів.

Список літератури

1. Kashtan V.J., Hnatushenko V.V., Shedlovska Y.I. Processing technology of multispectral remote sensing images. 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF). 2017. doi:10.1109/ysf.2017.8126647.
2. Scale-space effect and scale hybridization in image intelligent recognition of geological discontinuities on rock slopes / Mingyang W., Wang E., Liu X., Wang C. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2023, doi:10.1016/j.jrmge.2023.08.015.
3. Structural geometry of orogenic gold deposits: Implications for exploration of world-class and giant deposits / Groves D.I., Santosh M., Goldfarb R.J., Zhang L. Geoscience Frontiers. 2018. Vol.9. Issue 4. P. 1163-1177, doi:10.1016/j.gsf.2018.01.006.
4. Fractal and Multifractal Characteristics of Lineaments in the Qianhe Graben and Its Tectonic Significance Using Remote Sensing Images / Liu Z., Han L., Du C., Cao H., Guo J., Wang H. Remote Sensing. Vol. 13(4), 2021. P. 587, doi:10.3390/rs13040587.
5. Marghany M. Structural geology of mineral, oil and gas explorations. Advanced Algorithms for Mineral and Hydrocarbon Exploration Using Synthetic Aperture Radar. 2022. P. 31-79, doi:10.1016/B978-0-12-821796-2.00003-3.
6. Augustin J., Gaboury D. Multi-stage and multi-sourced fluid and gold in the formation of orogenic gold deposits in the world-class Mana district of Burkina Faso – Revealed by LA-ICP-MS analysis of pyrites and arsenopyrites. Ore Geology Reviews. 2019. Vol. 104. P. 495-521, doi:10.1016/j.oregeorev.2018.11.011.
7. Anıl Tözün K., Özyavaş A. Automatic detection of geological lineaments in central Turkey based on test image analysis using satellite data. Advances in Space Research. 2022. Vol. 69. Issue 9. P. 3283-3300, doi:10.1016/j.asr.2022.02.026.
8. Viveen W., Baby P., Hurtado-Enríquez C. Assessing the accuracy of combined DEM-based lineament mapping and the normalised SL-index as a tool for active fault mapping. Tectonophysics. 2021. Vol. 813 doi:10.1016/j.tecto.2021.228942.
9. Busygin B.S., Nikulin S.L., Korobko O.V. Concentration of contrast borders of different-scale satellite images and their interconnection with geological objects. 16th International Conference Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects. 2017. doi:10.3997/2214-4609.201701871.
10. Hnatushenko V., Kashtan V. Automated pansharpening information technology of satellite images. Radio Electronics, Computer Science, Control. 2021. № 2. P.123-132, doi:10.15588/1607-3274-2021-2-13.

11. Mohammadpour M., Bahroudi A., Abedi M. Automatic Lineament Extraction Method in Mineral Exploration Using CANNY Algorithm and Hough Transform. *Geotectonics*. 2020. Vol. 54. Issue 3. P. 366-382, doi:10.1134/S0016852120030085.
12. Mudd S.M. Chapter 4 - Topographic data from satellites. / P. Tarolli, S. M. Mudd. *Developments in Earth Surface Processes*, Elsevier. 2020. Vol. 23. P. 91-128, doi:10.1016/B978-0-444-64177-9.00004-7.
13. Zheng Q., Zeng L., Karniadakis G. Physics-informed semantic inpainting: Application to geostatistical modeling. *Journal of Computational Physics*. Vol. 419. 2019.
14. Constructing an Algorithm for Selecting the Number of Histogram Bins in Statistical Hypothesis Testing for Normal Distribution of Sample Data / Zlateva I., Nikolov N., Alexandrova M., Raykov V. *International Journal of Engineering Research & Science (IJOER)*. November 2018. Vol. 4, Issue 11. doi:10.5281/zenodo.1745060 fatcat:u2nlpalccnadvcqc3m3ffdjgl4.
15. Kumar R., Vassilvitskii S. Generalized distances between rankings. WWW '10: Proceedings of the 19th international conference on World wide web, 2010, P. 571–580, <https://doi.org/10.1145/1772690.1772749>
16. Euisun Ch., Chulhee L. Feature extraction based on the Bhattacharyya distance. *Pattern Recognition*. August 2003. Vol. 36. Issue 8. P.1703-1709, doi: 10.1016/S0031-3203(03)00035-9

References

1. Kashtan, V.J., Hnatushenko, V.V., Shedlovska, Y.I (2017), "Processing technology of multispectral remote sensing images." *IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, doi:10.1109/ysf.2017.8126647.
2. Mingyang, W., Wang, E., Liu, X., Wang, C. (2023), "Scale-space effect and scale hybridization in image intelligent recognition of geological discontinuities on rock slopes", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, doi:10.1016/j.jrmge.2023.08.015.
3. Groves, D.I., Santosh, M., Goldfarb, R.J., Zhang, L. (2018), "Structural geometry of orogenic gold deposits: Implications for exploration of world-class and giant deposits", *Geoscience Frontiers*, vol. 9, issue 4, pp. 1163-1177, doi:10.1016/j.gsf.2018.01.006.
4. Liu, Z., Han, L., Du, C., Cao, H., Guo, J., Wang, H. (2021), "Fractal and Multifractal Characteristics of Lineaments in the Qianhe Graben and Its Tectonic Significance Using Remote Sensing Images", *Remote Sensing*, vol. 13(4), p. 587, doi:10.3390/rs13040587.
5. Marghany, M. (2022), "Structural geology of mineral, oil and gas explorations", *Advanced Algorithms for Mineral and Hydrocarbon Exploration Using Synthetic Aperture Radar*, pp. 31-79, doi:10.1016/B978-0-12-821796-2.00003-3.
6. Augustin, J., Gaboury, D. (2019), "Multi-stage and multi-sourced fluid and gold in the formation of orogenic gold deposits in the world-class Mana district of Burkina Faso – Revealed by LA-ICP-MS analysis of pyrites and arsenopyrites," *Ore Geology Reviews*, vol. 104, pp. 495-521, doi:10.1016/j.oregeorev.2018.11.011.
7. Anıl Tözün, K., Özyavaş, A. (2022), "Automatic detection of geological lineaments in central Turkey based on test image analysis using satellite data," *Advances in Space Research*, vol. 69, issue 9, pp. 3283-3300, doi:10.1016/j.asr.2022.02.026.
8. Viveen, W., Baby, P., Hurtado-Enríquez, C. (2021), "Assessing the accuracy of combined DEM-based lineament mapping and the normalised SL-index as a tool for active fault mapping", *Tectonophysics*, vol. 813, doi:10.1016/j.tecto.2021.228942.
9. Busygin, B.S., Nikulin, S.L., Korobko, O.V. (2017), "Concentration of contrast borders of different-scale satellite images and their interconnection with geological objects", *16th International Conference Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects*, doi:10.3997/2214-4609.201701871.
10. Hnatushenko, V., Kashtan, V. (2021), "Automated pansharpening information technology of satellite images", *Radio Electronics, Computer Science, Control*. № 2, pp.123-132, doi:10.15588/1607-3274-2021-2-13.
11. Mohammadpour, M., Bahroudi, A., Abedi, M. (2020), "Automatic Lineament Extraction Method in Mineral Exploration Using CANNY Algorithm and Hough Transform", *Geotectonics*, vol. 54, issue 3, pp. 366-382, doi:10.1134/S0016852120030085.
12. Mudd, S.M. (2020), "Chapter 4 – Topographic data from satellites", *Developments in Earth Surface Processes*, Elsevier, vol. 23, pp. 91-128, doi:10.1016/B978-0-444-64177-9.00004-7.
13. Zheng, Q., Zeng, L., Karniadakis, G. (2019), "Physics-informed semantic inpainting: Application to geostatistical modeling", *Journal of Computational Physics*. vol. 419.
14. Zlateva, I., Nikolov, N., Alexandrova, M., Raykov, V. (2018), "Constructing an Algorithm for Selecting the Number of Histogram Bins in Statistical Hypothesis Testing for Normal Distribution of Sample Data", *International Journal of Engineering Research & Science (IJOER)*, vol. 4, issue-11, doi:10.5281/zenodo.1745060 fatcat:u2nlpalccnadvcqc3m3ffdjgl4.
15. Kumar, R., Vassilvitskii, S. (2010), "Generalized distances between rankings", *WWW '10: Proceedings of the 19th international conference on World wide web*, pp. 571–580, <https://doi.org/10.1145/1772690.1772749>

16. Euisun, Ch., Chulhee, L. (2003), "Feature extraction based on the Bhattacharyya distance", *Pattern Recognition*, vol. 36, issue 8, pp. 1703-1709, doi: 10.1016/S0031-3203(03)00035-9

Надійшла до редакції 9.03.2024

S. NIKULIN, V. KASHTAN, V. HNATUSHENKO, O. KOROBKO

Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

nikulin.s.l@nmu.one, kashtan.v.yu@nmu.one, hnatushenko.V.V@nmu.one, korobko.o.v@nmu.one

ESTIMATION OF THE INFORMATIVITY OF THE CONTRAST BRIGHTNESS BOUNDARIES OF REMOTE SENSING DATA FOR GEOLOGICAL TASKS SOLVING

The article is devoted to the detection and analysis of contrasting boundaries of brightness, tone, or color of satellite images, including geoimages, digital terrain models, and raster maps of physical fields. Often, such boundaries correspond to landscape elements, which, in turn, reflect the geological structure. It makes it possible to use the listed satellite images to solve various geological problems, including the search for mineral deposits.

This article proposes a method for calculating a special indicator of the complexity of the geological structure (ICGS) by identifying and processing contrasting boundaries using algorithms. It is believed that the complexity of the geological structure increases the probability of the formation of deposits, so ICGS can be used as an additional search feature.

An approach to the construction of maps of the complexity of the geological structure is described, which includes two stages: computerized selection of contrast borders of the geoimage, and calculation of their density within a sliding window of a fixed size.

The informativeness (potential usefulness) of the obtained maps was thoroughly investigated from the point of view of their effectiveness in solving the task of searching for interesting geological objects. Criteria based on parameters of histograms of map values distribution, as well as Kendall and Bhattacharya distances, known from the theory of image disambiguation, were used to assess informativeness. The issue of choosing the size of the sliding window, which significantly affects the results, was also considered.

The conducted research included the construction and analysis of maps of the complexity of three real areas containing mineral deposits (both ore and oil & gas). Known deposits were used as objects of interest.

According to the results, it was established that PSGB maps are more informative compared to the data on the basis of which they were calculated, that is, satellite images and raster maps of gravity and magnetic fields.

Thus, the proposed indicator of the complexity of the geological structure can be effectively used when searching for specific geological objects.

Keywords: *satellite images, geophysical fields, contrast brightness boundaries, complexity of geological structure, geological objects search feature*