

УДК 550.3:550.8

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.111.03>

Роман ПЕТРОКУШИН¹, асп.
ORCID ID: 0000-0001-7639-8279
e-mail: petrokushin@gmail.com

Дмитро БЕЗРОДНИЙ¹, доц.
ORCID ID: 0000-0001-7463-7133
e-mail: dmytrobezrodnyi@knu.ua

Джузеппе БАНКАЛА², ст. геофізик
ORCID ID: 0000-0003-1843-1610
e-mail: GBancala@slb.com

Лучіана ДЕ ЛУКА², пров. геофізик
ORCID ID: 0000-0001-7717-1893
e-mail: LLuca@slb.com

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
²СЛБ (Schlumberger), Сан-Донато-Міланезе, Італія

ВИЯВЛЕННЯ ГРАНИЦЬ ГЕОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ МЕТОДОМ АНАЛІЗУ ВІДНОШЕННЯ ПОХІДНИХ ГРАВІТАЦІЙНОГО ПОЛЯ НА ПРИКЛАДІ ПЕРЕДКАРПАТСЬКОГО ПРОГИНУ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф., чл.-кор. НАН України Михайлом ОРЛЮКОМ)

Вступ. Представлено методологію та результати її застосування для визначення границь об'єктів на основі аналізу гравітаційних (маються на увазі аномалії Буге $\Delta g_{\text{Буге}}$) даних. Основну увагу приділено виділенню вертикальних границь різномасштабних структур, які можуть ідентифікуватися як геологічні лінеamenti, такі як розломи та зони підвищеної тріщинуватості, що мають важливе значення для розуміння структурно-тектонічної будови та оцінки геотермального потенціалу території. Передкарпатський прогин обрано як об'єкт дослідження через його складну тектонічну будову та перспективність у пошуках геотермальних і вуглеводневих ресурсів.

Методи. Для аналізу геологічних структур використано метод нахилу похідної гравітаційного поля (Tilt Derivative) у поєднанні зі спектральним аналізом та трансформацією Фур'є. Методологія включає кілька етапів: обчислення градієнта гравітаційного поля, згладжування, інгібування немаксимальних значень та порозування контурів. Такий підхід дає змогу з високою точністю визначати межі геологічних об'єктів і виділяти розриви функції гравітаційного потенціалу. Аналіз даних проведено на основі результатів гравітаційної зйомки в межах Передкарпатського прогину.

Результати. Застосування методики дало змогу виділити лінеamenti регіонального та локального типів, які відповідають розломам і зонам підвищеної тріщинуватості. Виділені зони можуть слугувати шляхами міграції геотермальних вод із глибоких нагрітих зон до порід-колекторів, що підвищує їхню перспективність для геологорозвідувальних робіт. Порівняльний аналіз отриманих результатів з існуючими геологічними картами підтвердив високу точність методу. Крім того, виявлено додаткові структури, які раніше не були помічені, що свідчить про ефективність застосованої методології.

Висновки. Запропонована методика є ефективним експрес-методом виділення розломно-блокових структур на основі гравіметричних даних. Її застосування дає змогу уточнювати структурно-тектонічну будову регіонів, виділяти нові розломи та зони підвищеної тріщинуватості, що важливо для пошуків геотермальних і вуглеводневих ресурсів. Методологія має широкий потенціал для використання в дослідженнях складних геологічних об'єктів, таких як Передкарпатський прогин, і може суттєво підвищити ефективність геологорозвідувальних робіт.

Ключові слова: Передкарпатський прогин, метод визначення границь об'єктів, гравітаційні аномалії, спектральний аналіз, геотермальні пошуки.

Вступ

Передкарпатський прогин є важливим геологічним регіоном, що характеризується складною тектонічною будовою і значним потенціалом для геотермальної розвідки. Визначення розломів і зон підвищеної тріщинуватості є ключовим аспектом для розуміння перспективності басейну та локації зон підвищеної імовірності геотермального потенціалу. Наявні дослідження зон підвищеної тріщинуватості та аналізу розломів є обмеженими до зони інтересу нафтогазової геології. Проте для аналізу тектоніки в геотермальній розвідці необхідне розуміння глибини та протяжності розломів. Методи визначення границь об'єктів на основі даних гравітаційної зйомки дають змогу отримати детальну інформацію про геологічну структуру, що може бути використано для подальших геотермальних досліджень.

Актуальність дослідження. Останні дослідження демонструють зростаючу необхідність в ефективних методах інтерпретації даних потенціальних полів для

виявлення геологічних розломів. За відсутності сейсмічних даних і дослідження свердловин методи гравітаційної зйомки дають найкраще розуміння тектоніки регіону. Сучасні методи, такі як Tilt Derivative (нахил похідної гравітаційного поля, далі – TDR), дають змогу отримати більш точну інформацію про глибину та орієнтацію розломів, що критично важливо для геотермальних пошуків. Актуальність цього дослідження полягає в можливості поліпшення методів інтерпретації даних потенціальних полів та використання їх для оптимізації геологічної розвідки в Передкарпатському прогині.

Метою цього дослідження є розробка і застосування методів визначення границь об'єктів для інтерпретації порушень різної глибини в Передкарпатському прогині на основі даних гравітаційної зйомки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання методу визначення границь об'єктів є доволі популярним способом ідентифікації розривів функції, які інтерпретуються як наявність тріщин або розломів

на основі геофізичних даних. Цей метод має ключову роль у визначенні тектонічних порушень на основі сейсмічних даних.

Перші застосування методу визначення границь об'єктів були вкрай простим і ефективним методом, який давав хороші результати, що підкреслювали існуючі розриви у сейсмічному об'ємі (Luo et al., 1996). Функціонал перших методів визначення границь об'єктів мав за основу операцію просторового диференціювання першого порядку, у якій дані згорталися із простим дво- або триточковим фільтром. Сучасні ж методи визначення границь об'єктів (Koson et al., 2014; Silva et al., 2005) дають змогу виявити не лише регіональні розломи, а і тріщинуватість та наявність геологічних тіл, у зв'язку із застосуванням трансформації Фур'є та спектрального аналізу потенціальних полів.

Застосування методу визначення границь об'єктів в інтерпретації результатів геофізичних вимірювань потенціальних полів дає змогу виявляти інформацію, яка не очевидна в оригінальних даних і відіграє важливу роль у різних масштабах тектонічної інтерпретації, таких як мінеральна або нафтовидобувна розвідка (Yan et al., 2015), ідентифікація розломів (Ghosh, 2019), визначення меж різних тектонічних утворень або геологічних тіл (Guy et al., 2014).

Структурно-тектонічні умови об'єкта дослідження. Передкарпатський прогин є частиною Карпатської нафтогазоносною провінції, яка характеризується складною багатоярусною структурою земної кори. Прогин розташований між Східноєвропейською платформою та складчастими зонами Карпат і утворює передовий край орогену. У його межах виділяють три основні тектонічні зони: Більче-Волицьку (Зовнішню), Самбірську та Бориславсько-Покутську (Внутрішню). Ці зони відрізняються за складом осадових товщ, тектонічною будовою та історією формування (Кутас, 2021).

Прогин перетинають численні розломи поздовжнього і поперечного простягання, які відіграють ключову роль у формуванні структурно-тектонічних пасток як для нафти та газу, так і потенційних геотермальних родовищ. Поздовжні розломи зумовлені насувними процесами, тоді як поперечні розломи поділяють прогин на блоки з різними умовами дислокації (Атлас родовищ..., 1998). Ці зони підвищеної тріщинуватості є важливими каналами для міграції флюїдів та формування покладів вуглеводнів і геотермальних ресурсів.

Незважаючи на те, що Передкарпатський прогин не є насамперед басейном геотермального потенціалу, його перспективи були описані в попередніх роботах (Куровець та ін., 2014) та підтверджені новими даними буріння свердловин, які відкривали поклади з температурами 120–150 градусів в межах Більче-Волицької зони на глибинах до 3 км.

Глибинна будова прогину також відображає багатозафазний розвиток регіону. Докембрійський фундамент поступово занурюється під Складчасті Карпати, а мезозойські та кайнозойські осадові комплекси характеризуються значною товщиною, яка досягає 10 км у центральній частині прогину (Крупський, 2001). У таких умовах використання сучасних методів, зокрема TDR, є важливим інструментом для деталізації структурно-тектонічної будови регіону та виділення перспективних зон для геологорозвідувальних робіт.

Методи

В цій роботі показано застосування методу TDR, який є методом дослідження кута нахилу похідних гравітаційного поля для визначення границь об'єктів на території Передкарпатського прогину.

Для ідентифікації розломів різних типів, а також виділення зон тріщинуватостей застосовують різні типи методів визначень границь об'єктів. Для прикладу, в сейсмічній інтерпретації використовуються Гаусівські функції, фільтр Канні, оператор центрованої різниці. Кожен з них має своє застосування та обмеження.

При інтерпретації гравітаційних аномалій проведено застосування методу кута нахилу похідних гравітаційного поля. Основою функції є порівняння між вертикальною та горизонтальною похідними функції гравітаційного поля. Метод фільтру дає змогу зробити ідентифікацію розривів функції (що, у свою чергу, може вказувати на наявність тріщин або ж розломів) (Akın et al., 2011; Stewart, & Miller, 2018). Метод широко використовується як експрес метод оцінки гравітаційної аномалії та показав своє застосування у світовій практиці (Cooper, & Cowan, 2006; Mogahed et al., 2017; Salem et al., 2008). Математично цю операцію можна описати як

$$TDR = \tan^{-1} \frac{\frac{\partial g}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2}}, \quad (1)$$

де $g(x, y, z)$ – дані гравітаційного поля; $\frac{\partial g}{\partial z}$ – вертикальна похідна гравітаційного поля; $\frac{\partial g}{\partial x}$ і $\frac{\partial g}{\partial y}$ – повний горизонтальний градієнт гравітаційного поля.

Проте у зв'язку зі складною геологією Передкарпатського прогину, а також фокусуванні робіт у межах колекторів порід басейну (глибина від 3 до 6 км), зазначений метод застосовували на ймовірно розрахованих середніх глибинах. Після трансформації Фур'є та спектрального аналізу вибрано вікно довжини хвилі 11–35 км.

Запропонований авторами алгоритм проведення дослідження при застосуванні методів визначення границь об'єктів полягає в таких кроках:

1. Завантаження даних зйомки.
2. Вибір методу інтерполяції даних для побудови поверхні.
3. Використання супутникових знімків для визначення топографії.
4. Трансформація Фур'є та спектральний аналіз для виділення корисного сигналу.
5. Розрахунок параметрів визначення границь об'єктів методом TDR.
6. Інтерпретація даних та виділення розломів/зон підвищеної тріщинуватості.

Завантаження даних зйомки. Для виконання даної операції було використано програмне забезпечення (ПЗ) Petrel, що дає змогу проводити базову обробку та інтерпретацію потенціальних полів. Дані, що були використані, являють собою збір листів масштабу 1:200 000 гравітаційної зйомки, розташованих у межах Передкарпатського прогину (рис. 1).

Вибір методу інтерполяції даних для побудови карти гравітаційного поля. У зв'язку з роздільною здатністю точок зйомки (з відстанню 1 км×1 км) вибрано метод збіжної інтерполяції (Convergent interpolation) (рис. 2).

Цей метод інтерполяції, який забезпечує збіжність до точних значень функції при збільшенні кількості точок даних або вузлів інтерполяції з кроком дискретизації, що відповідає кроку зйомки.

Використання супутникових знімків для визначення топографії. Для правильних розрахунків та інтерпретації даних потенціальних полів обов'язкове врахування топографії. Дані були отримані з відкритих джерел (ASTER NASA) з роздільною здатністю 30 м та завантажені в ПЗ Petrel.

Трансформація Фур'є та спектральний аналіз для виділення корисного сигналу. У цій статті трансформація Фур'є та спектральний аналіз застосовуються для виділення корисного сигналу з даних гравітаційної зйомки Передкарпатського прогину (рис. 3). Ці методи дають змогу виявити домінуючі частотні компоненти, усунути небажані шуми та поліпшити точність визначення геологічних лінеamentів, таких як розломи та тріщинуватість.

Розрахунок параметрів визначення границь об'єктів методом TDR. Розрахунок параметрів визначення границь об'єктів методом TDR застосовується для точного виявлення геологічних розломів у даних гравітаційної зйомки Передкарпатського прогину (рис. 4). Цей метод обчислює відношення вертикальної похідної до

горизонтальної. Завдяки цьому вдається виділити розломи та тріщини, які можуть бути неочевидними в початкових даних, і таким чином отримати детальну картину геологічної структури регіону.

Інтерпретація даних та виділення лінеamentів. Фінальним кроком роботи є виділення лінеamentів для подальшого вивчення розломно-блокової тектоніки та прогнозування зон тріщинуватості, а також протяжності та орієнтації розломів. Результати цього етапу інтерпретації даних гравіметрії після проведеного спектрального аналізу з вилученням сигналу в довжині хвилі 11–35 км представлено на рис. 4а (червоний колір – адміністративний кордон України).

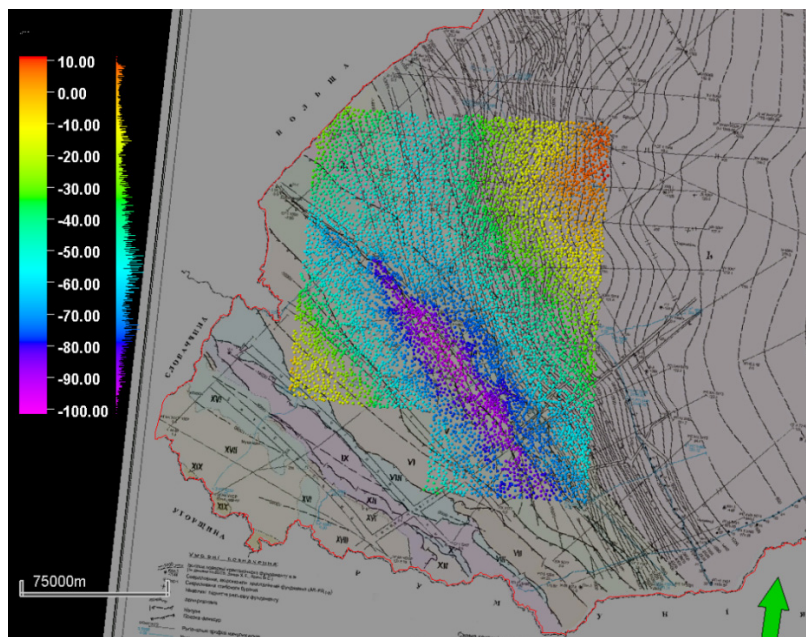


Рис. 1. Карта аномального гравітаційного поля в редукції Буге (Нечасва та ін., 2002) та схема будови поверхні дорифейського кристалічного фундаменту західних областей з основними розломами (Заяць, & Яриш, 1978)

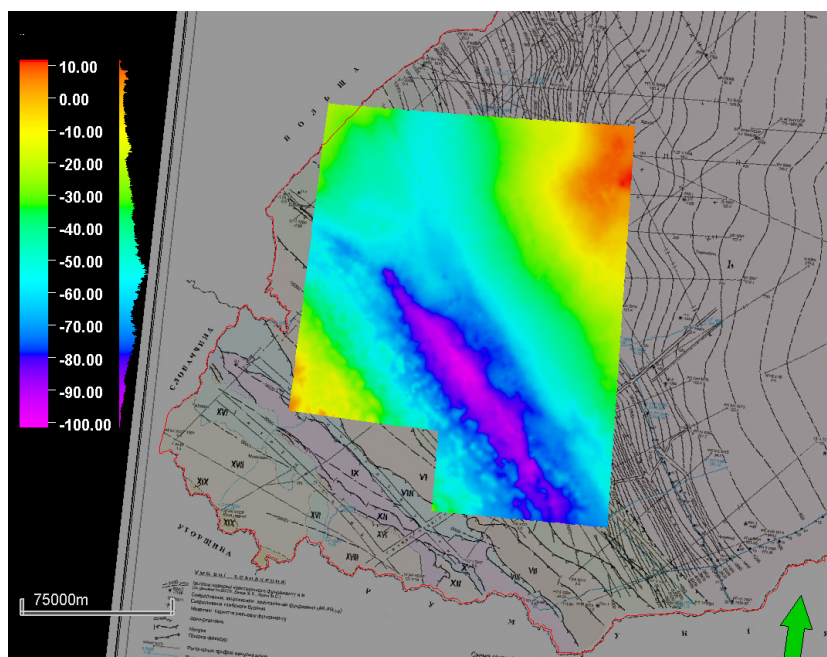


Рис. 2. Інтерпольована карта аномального гравітаційного поля в редукції Буге методом збіжної інтерполяції та схема будови поверхні дорифейського кристалічного фундаменту західних областей з основними розломами (Заяць, & Яриш, 1978)

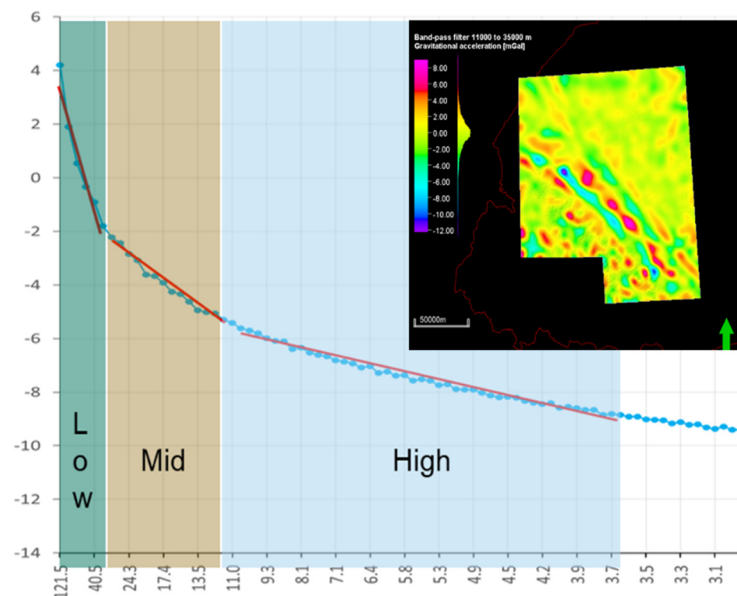


Рис. 3. Спектральний аналіз частотного спектру гравітаційної зйомки Передкарпатського прогину з виділенням частот (низька, середня, висока), а також вилучення частот середнього спектра (11–35 км довжини хвилі) з даних гравітаційного поля

Результати

У ході дослідження успішно застосовано сучасні методи визначення границь об'єктів, зокрема метод TDR до результатів гравітаційної зйомки Передкарпатського прогину. Авторам вдалося виділити як регіональні, так і локальні розломи та тріщинуваті зони. Ці геологічні розломи, які є ідентифікаторами порушень геологічного середовища (наявність зон тріщин або ж розлому), можуть відігравати важливу роль у міграції геотермальних вод та виявленні зон підвищеної тріщинуватості.

За результатом проведеної роботи отримано нову інтерпретацію протяжності та орієнтації розломів, які

протягаються на ймовірно розрахованих середніх глибинах порід-колекторів Передкарпатського прогину (3–6 км). За попередніми дослідженнями цього регіону (Гурський та ін., 2007) було отримано розу діаграм розломів. Автори провели порівняльний аналіз з результатами досліджень даної роботи, який показав орієнтацію на протяжність уже відомих розломів. Також матеріали інтерпретації за методом TDR дали змогу виділити додаткові розломи, які не були виявлені в попередніх дослідженнях (рис. 4, 5).

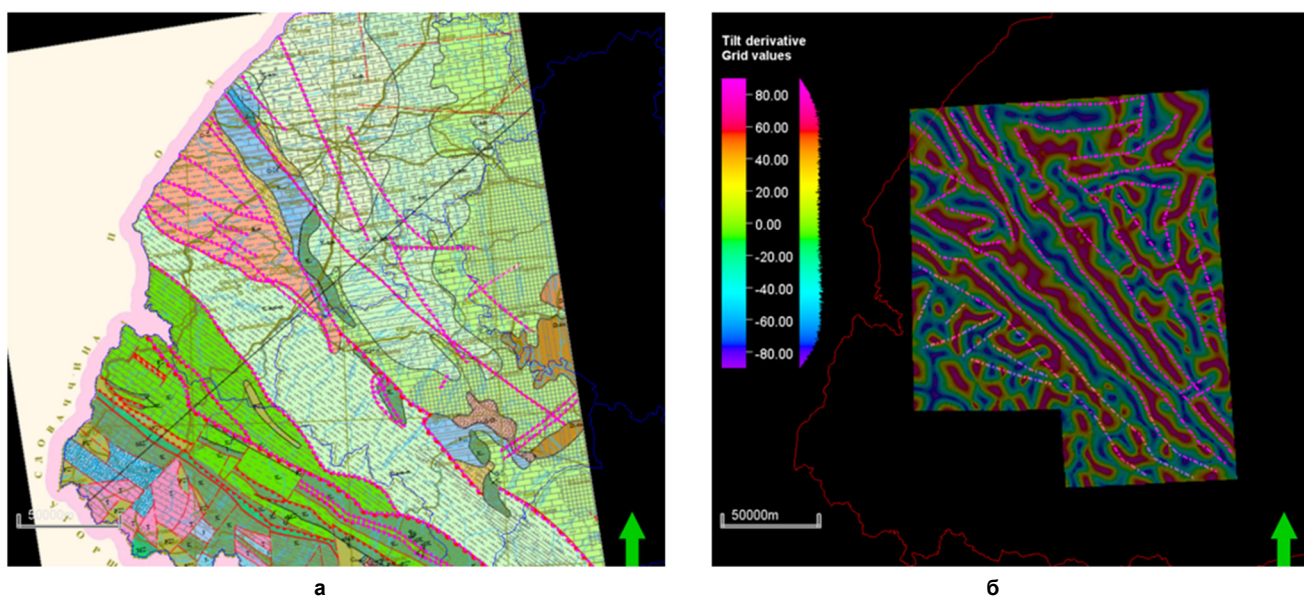


Рис. 4. Порівняльна характеристика об'єкта досліджень:

а – геологічна карта доміоценових відкладів Передкарпатського прогину (Гурський та ін., 2007);
б – приклад результатів виділення лінеamentів, що показують границі тектонічних структур різного масштабу

Порівняно з попередніми результатами отримано краще розуміння глибини та орієнтації розломів Передкарпатського прогину. Метод TDR дав змогу виділити

розломи, які не були ідентифіковані раніше, а також ті розломи, які можуть слугувати зоною міграції геотермальних флюїдів, що підтверджується даними буріння та

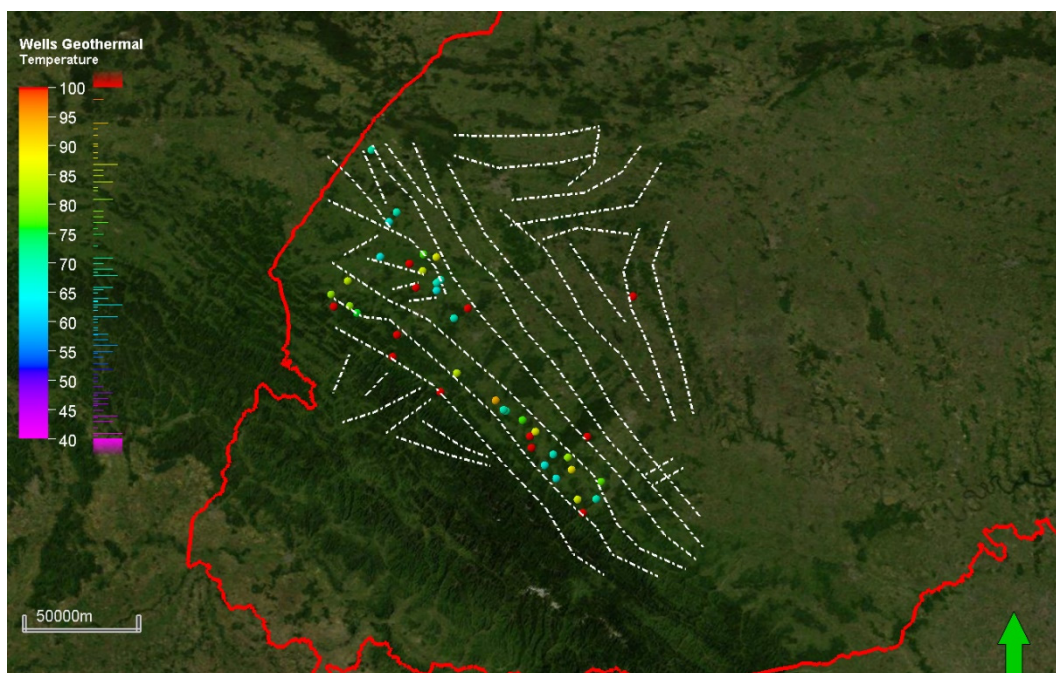


Рис. 7. Результати виділення лінеаментів (білі полігони), які проявляються на зміні полярності поля методом TDR, а також дані вимірювання температури зі свердловин (кольорові точки) на фоні топографічної карти Передкарпатського прогину

Дискусія і висновки

Робота сфокусована на ідентифікації розривів функції методом TDR з метою виділення лінеаментів, що можуть бути інтерпретовані як регіональні та локальні розриви. На території Передкарпатського прогину зазначений підхід також дає змогу розширити вивчення тектонічної історії, локалізації розломів та тріщинуватих зон для подальших робіт: геотермальних пошуків, мінералізації вод, пошуку критичних мінералів.

Таким чином, в цій роботі вперше застосовано інтеграцію методів спектрального аналізу та трансформації Фур'є з методом TDR для поліпшення точності визначення геологічних структур на основі даних гравітаційної зйомки. На відміну від попередніх досліджень, ця робота демонструє можливість виявлення додаткових розломів, які не були виділені раніше. Крім того, дослідження пропонує новий підхід до варіювання глибини порушень, що може бути використано для оптимізації геотермальної та мінеральної розвідки в складних геологічних умовах.

Зіставлення отриманих даних з існуючими геологічними картами підтвердило високу точність методів, а також виявило додаткові структури, які не були помічені у попередніх дослідженнях.

Перспективами застосування даного методу на території Передкарпатського прогину є деталізація тектоніки регіону, яка може бути застосована для виявлення вуглеводневих покладів, геотермальних пошуків, мінеральної розвідки чи пошуку критичних мінералів, де глибинні розломи відіграють ключову роль.

Джерела фінансування. Це дослідження не отримало жодного гранту від фінансової установи в державному, комерційному або некомерційному секторах.

Список використаних джерел

- Атлас родовищ нафти і газу України. В шести томах. Т. 4, 5. (1998). *Західний нафтогазоносний регіон*. УНГА.
Гурський, Д. С., Колосовська, В. А., Калінін, В. І., та ін. (2007). *Геологічна карта докайнозойських відкладів України м-б: 1:1000000*. Геологічна служба України.

Заяць, Х., & Яриш, М. (1978). *Схема будови поверхні дорифейського кристалічного фундаменту західних областей з основними розломами*. ЛВ УкрДГРІ.

Крупський, Ю. З. (2001). *Геодинамічні умови формування і нафтогазоносності Карпатського та Волино-Подільського регіонів України*. УкрДГРІ.

Куровець, І. М., Сеньковський, І. М., Михайлов, В. А., Дригант, Д. М., Крупський, Ю. З., Гладун, В. В., Чепіль, П. М., Гулій, В. М., Куровець, С. С., Шлапінський, В. С., Шлапінський, Ю. В., Колтун, Ю. В., Чепіль, В. П., & Бодлак, В. П. (2014). *Нетрадиційні джерела вуглеводнів України* (Кн. II). Ніка-Центр.

Кутас, Р. І. (2021). Глибинна дегазація і нафтогазоносність Східних (Українських) Карпат: геодинамічний і геотермічний аспекти. *Геофізический журнал*, 43(6).

Мончак, Л., & Анікеев, С. (2017). Відображення тектонічної будови західного регіону України у гравімагнітних полях. *Геодинаміка*, 2(23).

Нечаєва, Т. С., Шимків, Л. М., Єнтін, В. А., Дроздецький, В. В., Нікіташ, Л. П., & Дробак, С. М. (2002). *Схема гравітаційного поля України. М-б. 1:200000*. ПДРГП "Північгеологія".

Орлюк, М. І., Бакаржієва, М. І., & Марченко, А. В. (2022). Магнітна характеристика і тектонічна будова земної кори Карпатської нафтогазоносної області як складова частина комплексних критеріїв вуглеводнів. *Геофізичний журнал*, 44(5), 77–105.

Akın, U., Şerifoğlu, B., & Duru, M. (2011). The use of tilt angle in gravity and magnetic methods. *Mineral Res. Expl. Bull.*, 143, 1–12.

Cooper, G. R. J., & Cowan, D. R. (2006). Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Computers & Geosciences*, 32(10), 1585–1591.

Ghosh, G. K. (2019). Interpretation of gravity anomaly to delineate thrust fault's locations at the northeastern part of India and its adjacent areas using source edge detection technique, tilt derivative and Cos(theta) analysis. *Acta Geophysica*, 67, 1277–1295.

Guy, A., Schulmann, K., Munschy, M., Miehe, J., Edel, J., Lexa, O., & Fairhead, D. (2014). Geophysical constraints for terrane boundaries in southern Mongolia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119, 7966–7991.

Stewart, I. C. F., & Miller, D. T. (2018). Directional tilt derivatives to enhance structural trends in aeromagnetic grids. *Journal of Applied Geophysics*, 159, 514–523.

Koson, J., Sriboon, P., Suteerasak, T., & Charoenruk, T. (2014). Seismic attributes and seismic geomorphology. *Engineering Journal*, 6(1), 1–9.

Luo, Y., Higgs, W. G., & Kowalik, W. S. (1996). Edge detection and stratigraphic analysis using 3D seismic data. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*.

Mogahed, M. M., Abd El-Aziz, M. M., & El-Gohary, A. M. (2017). Application of tilt derivative to gravity and magnetic data in the delineation of structural features. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 6(2), 350–360.

Salem, A., Williams, S., Fairhead, J. D., Ravat, D., & Smith, R. (2008). Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivatives. *Geophysics*, 73(1), L1–L10.

Silva, C., Marcolino, C., & Lima, F. (2005). Automatic Fault Extraction Using Ant Tracking Algorithm in the Marlim South Field, Campos Basin. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*.

Yan, J. Y., Lv, Q. T., Chen, M. C., et al. (2015). Identification and extraction of geological structure information based on multi-scale edge detection of gravity and magnetic fields: An example of the Tongling ore concentration area. *Chinese Journal of Geophysics*, 58, 4450–4464.

References

Akın, U., Şerifoğlu, B., & Duru, M. (2011). The use of tilt angle in gravity and magnetic methods. *Mineral Res. Expl. Bull.*, 143, 1–12.

Atlas of Oil and Gas Fields of Ukraine. In six volumes. Vol. 4, 5. (1998). *Western Oil and Gas-Bearing Region*. UNGA [in Ukrainian].

Cooper, G. R. J., & Cowan, D. R. (2006). Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Computers & Geosciences*, 32(10), 1585–1591.

Ghosh, G. K. (2019). Interpretation of gravity anomaly to delineate thrust faults locations at the northeastern part of India and its adjacent areas using source edge detection technique, tilt derivative and Cos(theta) analysis. *Acta Geophysica*, 67, 1277–1295.

Guy, A., Schulmann, K., Munschy, M., Mieke, J., Edel, J., Lexa, O., & Fairhead, D. (2014). Geophysical constraints for terrane boundaries in southern Mongolia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119, 7966–7991.

Hurskyi, D. S., Kolosovska, V. A., Kalinin, V. I., et al. (2007). *Geological map of pre-Cenozoic deposits of Ukraine (Scale 1:1,000,000)*. Geological Survey of Ukraine [in Ukrainian].

Koson, J., Sriboon, P., Suteerasak, T., & Charoenruk, T. (2014). Seismic attributes and seismic geomorphology. *Engineering Journal*, 6(1), 1–9.

Krupskiy, Yu. Z. (2001). *Geodynamic conditions of formation and hydrocarbon potential of the Carpathian and Volyn-Podillia regions of Ukraine*. UkrDGRI [in Ukrainian].

Kurovets, I. M., Senkovskiy, I. M., Mykhailov, V. A., Dryhant, D. M., Krupskiy, Yu. Z., Hladun, V. V., Chepil, P. M., Hulii, V. M., Kurovets, S. S., Shlapinskiy, V. S., Shlapinskiy, Yu. V., Koltun, Yu. V., Chepil, V. P., & Bodlak, V. P. (2014). *Unconventional hydrocarbon sources of Ukraine (Book II)*. Nika-Center [in Ukrainian].

Kutas, R. I. (2021). Deep degassing and oil and gas potential of the Eastern (Ukrainian) Carpathians: Geodynamic and geothermal aspects. *Geophysical Journal*, 43(6) [in Ukrainian].

Luo, Y., Higgs, W. G., & Kowalik, W. S. (1996). Edge detection and stratigraphic analysis using 3D seismic data. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*.

Mogahed, M. M., Abd El-Aziz, M. M., & El-Gohary, A. M. (2017). Application of tilt derivative to gravity and magnetic data in the delineation of structural features. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 6(2), 350–360.

Monchak, L., & Anikieiev, S. (2017). Reflection of the tectonic structure of the western region of Ukraine in gravimagnetic fields. *Geodynamics*, 2(23) [in Ukrainian].

Nechaieva, T. S., Shymkiv, L. M., Yentyn, V. A., Drozdetskyi, V. V., Nikitash, L. P., & Drobakh, S. M. (2002). *Scheme of the gravitational field of Ukraine (Scale 1:200,000)*. PDRGP "Pivnichheolohiia" [in Ukrainian].

Orliuk, M. I., Bakarzhieva, M. I., & Marchenko, A. V. (2022). Magnetic characteristics and tectonic structure of the Earth's crust of the Carpathian oil and gas region as a component of complex hydrocarbon criteria. *Geophysical Journal*, 44(5), 77–105 [in Ukrainian].

Salem, A., Williams, S., Fairhead, J. D., Ravat, D., & Smith, R. (2008). Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivatives. *Geophysics*, 73(1), L1–L10.

Silva, C., Marcolino, C., & Lima, F. (2005). Automatic Fault Extraction Using Ant Tracking Algorithm in the Marlim South Field, Campos Basin. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*.

Stewart, I. C. F., & Miller, D. T. (2018). Directional tilt derivatives to enhance structural trends in aeromagnetic grids. *Journal of Applied Geophysics*, 159, 514–523.

Yan, J. Y., Lv, Q. T., Chen, M. C., et al. (2015). Identification and extraction of geological structure information based on multi-scale edge detection of gravity and magnetic fields: An example of the Tongling ore concentration area. *Chinese Journal of Geophysics*, 58, 4450–4464.

Zaiats, Kh., & Yarysh, M. (1978). *Scheme of the structure surface of the pre-Riphean crystalline basement of the western regions with major faults*. LV UkrDGRI [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 13.08.25

Прорецензовано / Revised: 01.10.25

Схвалено до друку / Accepted: 16.12.25

Roman PETROKUSHYN¹, PhD Student

ORCID ID: 0000-0001-7639-8279

e-mail: petrokushin@gmail.com

Dmytro BEZRODNYI¹, Assoc. Prof.

ORCID ID: 0000-0001-7463-7133

e-mail: dmytrobezrodnyi@knu.ua

Giuseppe BANCALA², Senior Geoscientist

ORCID ID: 0000-0003-1843-1610

e-mail: GBancala@slb.com

Luciana DE LUCA², Staff Geophysicist

ORCID ID: 0000-0001-7717-1893

e-mail: LLuca@slb.com

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

²SLB (Schlumberger Italiana SpA) Via dell'Unione Europea, 4 20097 San Donato Milanese (MI) Italia

DETECTION OF GEOLOGICAL OBJECT BOUNDARIES USING THE GRAVITY TILT DERIVATIVE METHOD: A CASE STUDY OF THE CARPATHIAN FOREDEEP

Background. The article presents a methodology and the results of its application for delineating object boundaries based on gravity data analysis. The primary focus is on identifying geological lineaments, such as faults and zones of increased fracturing, which are crucial for understanding the structural and tectonic framework and assessing the geothermal potential of the area. The Carpathian Foredeep was chosen as the study area due to its complex tectonic structure and its potential for geothermal and hydrocarbon resource exploration.

Methods. To analyze geological structures, the tilt derivative method of the gravity field (Tilt Derivative) was employed in combination with spectral analysis and Fourier transformation. The methodology includes several steps: calculating the gradient of the gravity field, smoothing, non-maximum suppression, and contour thresholding. This approach ensures high accuracy in determining the boundaries of geological objects and identifying discontinuities in the gravity potential function. The data analysis was conducted using gravity survey results within the Carpathian Foredeep.

Results. The application of the methodology allowed for the identification of regional and local lineaments corresponding to faults and zones of increased fracturing. These zones may serve as migration pathways for geothermal waters from deep heated areas to reservoir rocks, enhancing their prospectivity for exploration. A comparative analysis of the obtained results with existing geological maps confirmed the high accuracy of the methods. Additionally, new structures were identified that had not been previously recognized, highlighting the effectiveness of the proposed methodology.

Conclusions. The proposed methodology is an effective tool for the detailed delineation of fault and tectonic structures based on gravity data. Its application enables the refinement of the structural and tectonic framework of regions, the identification of new faults and zones of increased fracturing, which are critical for exploring geothermal and hydrocarbon resources. The methodology has broad potential for use in studies of complex geological objects, such as the Carpathian Foredeep, and can significantly improve the efficiency of geological exploration activities.

Keywords: Ukrainian Carpathian Foredeep, Edge Detection, gravity anomalies, spectral analysis, Tilt Derivative, geothermal exploration.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.