



Стаття та будь-який пов'язаний з нею опублікований матеріал поширюється за ліцензією Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0).
The article and any related published material are licensed under the Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0).

УДК 550.8:553.7

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.112.03>

Роман ПЕТРОКУШИН, асп.

ORCID ID: 0000-0001-7639-8279

e-mail: petrokushin@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Дмитро БЕЗРОДНИЙ, доц.

ORCID ID: 0000-0001-7463-7133

e-mail: dmytrobezrodnyi@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ КРИСТАЛІЧНОГО ФУНДАМЕНТУ ПЕРЕДКАРПАТСЬКОГО ПРОГИНУ ЗА ДАНИМИ ПОТЕНЦІАЛЬНИХ ПОЛІВ ЯК ОСНОВА ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗОН ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ПОТЕНЦІАЛУ

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

Вступ. Представлено методологію та результати її застосування для визначення впливу структурного підняття кристалічного фундаменту та глибинних розломів, що його порушують, на перспективи пошуку родовищ геотермальних ресурсів у межах Передкарпатського прогину України. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю вивчення геотермальних ресурсів Передкарпатського прогину як одного з ключових джерел відновлюваної енергії. Особливу увагу приділено інтеграції сучасних методів інтерпретації даних гравітаційної та магнітної зйомки з даними теплового потоку.

Методи. Для моделювання глибинної будови застосовано комплексний підхід, що включає вирішення прямої задачі гравірозвідки та магніторозвідки в поєднанні зі спектральним аналізом та трансформацією Фур'є. Методологія включає інтегрування результатів інтерпретації потенціальних полів з даними теплового потоку та даними вимірювання температури з глибоких свердловин. Такий підхід дає змогу комплексно визначати структуру глибоких горизонтів і виділяти розломи, що порушують кристалічний фундамент з подальшою їх ув'язкою з даними теплового потоку. Аналіз даних проведено на основі результатів гравітаційної та магнітної зйомок масштабу 1:200 000 в межах Передкарпатського прогину.

Результати. Виділено зони підняття кристалічного фундаменту і його порушення глибинними розломами, які відповідають аномаліям максимумів теплового потоку. Виділені зони можуть слугувати шляхами міграції геотермальних вод з глибоких нагрітих зон до порід-колекторів, що підвищує їхню перспективність для геологорозвідувальних робіт. Порівняльний аналіз отриманих результатів з існуючими даними буріння та теплового потоку підтвердив точність методу.

Висновки. Запропонована методика є ефективним методом вивчення та розчленування глибинної геологічної будови земної кори з погляду геотермальних пошуків при їх інтеграції з даними теплового потоку. Її застосування дає змогу уточнювати структурно-тектонічну будову регіонів, виділяти нові розломи та зони підняття кристалічного фундаменту, що є важливими для пошуків геотермальних ресурсів. Методологія має значний потенціал при дослідженнях складних геологічних об'єктів, таких як Передкарпатський прогин, і може суттєво підвищити ефективність геологорозвідувальних робіт.

Ключові слова: Передкарпатський прогин, гравітаційні аномалії, магнітні аномалії, тепловий потік, спектральний аналіз, геотермальні пошуки.

Вступ

Геотермальний потенціал України є однією з ключових тем розвитку енергонезалежності країни. Вивчення джерел геотермальної енергії та розуміння перспективних зон є ключовим для формування плану розвитку пошуків геотермальних ресурсів. Передкарпатський прогин є важливим геологічним регіоном, що характеризується складною тектонічною будовою та значним потенціалом для геотермальної розвідки. Вивчення глибинної структури фундаменту, виявлення аномалій у будові фундаменту на основі вирішення прямої задачі потенціальних полів 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 характеру фундаменту з великою зоною проникнення (понад 10 км). Методи спектрального аналізу та прямої задачі на основі даних потенціальних полів дають змогу отримати детальну інформацію про геологічну

структуру, що може бути використано для подальших геотермальних досліджень.

Актуальність дослідження. Необхідність диверсифікації джерел енергії, а також перехід на альтернативні джерела енергії є одним із завдань майбутнього розвитку енергетичного сектору Європи та України зокрема. Актуальність нашого дослідження полягає в інтерпретації даних потенціальних полів з погляду геотермальної енергетики та використання даних теплового потоку для оптимізації геологічної розвідки в Передкарпатському прогині. За відсутності сейсмічних даних та дослідження свердловин, гравітаційна та магнітна зйомки дають найкраще розуміння глибинної структури регіону. Інтеграція результатів інтерпретації потенціальних полів із глибоким бурінням та даними теплового потоку дає змогу зробити критичний аналіз геотермального потенціалу з метою подальших пошуків.

Метою дослідження є застосування методів прямої задачі та спектрального аналізу даних потенціальних полів у Передкарпатському прогині та їх інтеграція з даними теплового потоку з метою виявлення джерела геотермальної енергії.

© Петрокушин Роман, Безродний Дмитро, 2026

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останні дослідження підкреслюють значний вплив кристалічного фундаменту на потенціал геотермальної енергії в гірських прогинах. Моделювання на основі даних потенціальних полів зазвичай використовують для визначення глибинних структур фундаменту, які, у свою чергу, контролюють тепловий потік та розподіл геотермальних ресурсів. Вирішення прямих задач гравірозвідки та магніторозвідки дає змогу виявляти контрасти густини та магнітної сприйнятливості підземних шарів і вивчати поведінку рельєфу фундаменту. Крім того, магнітні дослідження сприяють виявленню розмагнічених зон і структурних порушень (такі як розломи або тріщини), пов'язані з підвищеним тепловим потоком. Ці підходи є загальноприйнятими геофізичними методами, оскільки інші дані (сейсмічні/електромагнітні) не дозволяють отримати глибинну структуру фундаменту (Atef et al., 2016; Majorowicz, & Grasby, 2021).

Оскільки Передкарпатський прогин не є вулканічно активним регіоном, а Східноєвропейська платформа є стабільною та консолідованою платформою, обґрунтування джерела геотермальної енергії може бути поясненим формуванням відділеного корового матеріалу, який підіймається вгору та акумулюється в підшві платформі при субдукції. Саме підняття заглибленого матеріалу в передгірському прогині слугує надходженням розігрітих мас до поверхні. А наявність відкритих глибинних розломів формує канали для конвекції геотермальних флюїдів (Huangfu et al., 2016).

Зіставлення даних теплового потоку з моделюванням даних потенціальних полів дає змогу комплексно проаналізувати потенціал геотермальних ресурсів. Попередні дослідження було проведено вздовж профілів PANCAKE та RomUkrSeis, що показало переваги комплексного підходу до аналізу глибинної структури, які були зорієнтовані на розкриття нафтогазового потенціалу структур. Зокрема використано підходи в роботі із застосуванням комплексного аналізу даних аномалії магнітного, гравітаційного та теплового полів (Кутас и др., 1996; Орлюк та ін., 2022; Starostenko et al., 2013, 2020, 2022; Шеремета и др., 2011).

У подібних роботах розглянуто результати комплексного вирішення прямої задачі даних потенціальних полів і їх інтеграцію з даними теплового потоку з метою пошуку родовищ вуглеводнів.

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 (рис. 1). 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).



Рис. 1. Ділянка досліджень на карті Європи з виділенням Передкарпатського прогину в межах України (блакитний полігон) та розташуванням профілю дослідження роботи (червона лінія)

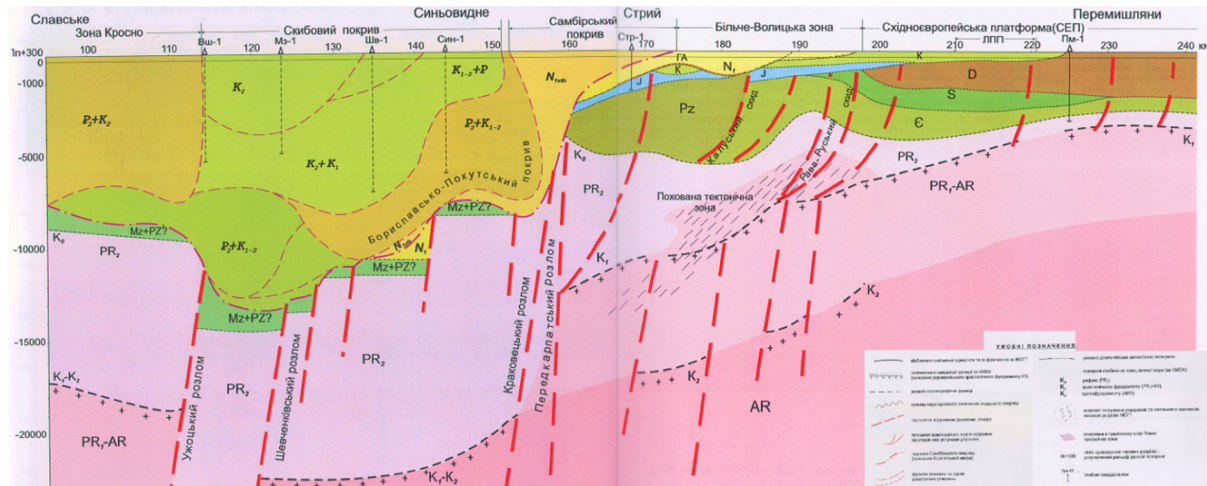
Кристалічний фундамент під Передкарпатським прогином характеризується значною неоднорідністю за глибиною, складом і тектонічною структурою. Сейсмічні, гравіметричні та магнітні дослідження показують, що фундамент складається переважно з докембрійських метаморфічних та гранітоїдних комплексів, вік яких коливається від архею до протерозою. Поверхня фундаменту загалом поглиблюється з північного сходу (на глибинах 2–4 км) на південний захід під Передовим прогином та

Карпатським насувом, досягаючи глибин 10–15 км і більше в найглибших частинах басейну.

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..., 1998).

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

Глибинна будова прогину також відображає багатофазний 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).



Вибір методу інтерполяції даних для побудови карти гравітаційного поля.

У зв'язку з роздільною здатністю точок зйомки (з відстанню 1 км×1 км), було вибрано метод збіжної інтерполяції (Convergent interpolation) (рис. 5, 6). Це метод

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

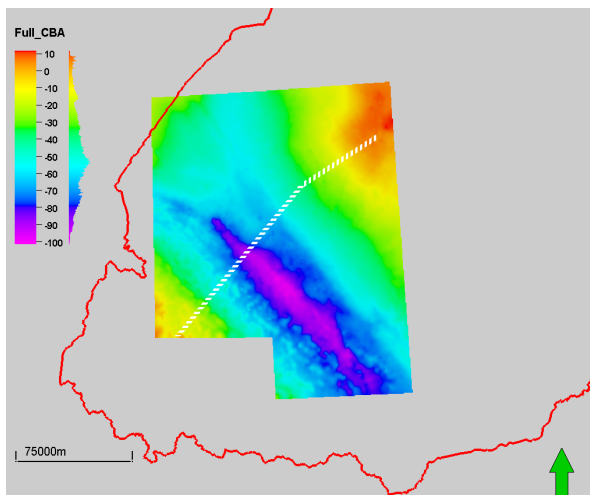


Рис. 5. Інтерпольована карта аномального гравітаційного поля в редукції Буге методом збіжної інтерполяції

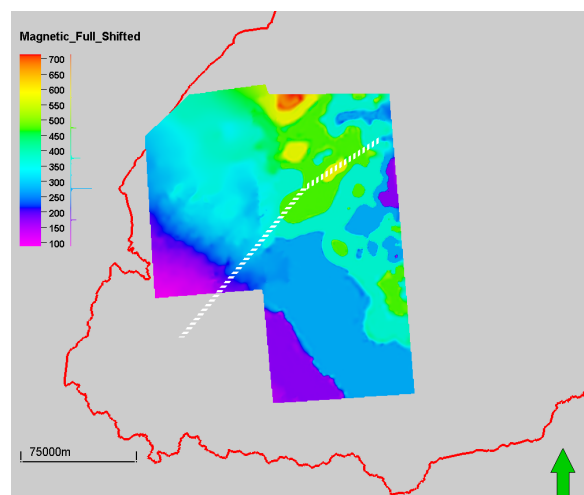


Рис. 6. Інтерпольована карта аномального магнітного поля методом збіжної інтерполяції

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

Трансформація Фур'є та спектральний аналіз для виділення корисного сигналу. Ці операції в роботі застосовуються для виділення корисного сигналу з даних гравітаційної та магнітної зйомок території Передкарпатського прогину (рис. 7). Ці методи дають змогу виявити переважні частотні компоненти, усунути небажані шуми та вилучити найглибшу зону моделювання, яка відповідає кристалічному фундаменту.

Завантаження та аналіз даних попередніх досліджень. Оскільки дані зйомки потенціальних полів не покривають повний спектр глибин, а також для коректного моделювання глибинної будови (понад 30 км), було застосовано дані з ПЗ Geosoft, які відповідають очікуваній позиції поверхні Мохо. (рис. 8в). Також було завантажено та зіставлено дані буріння та сейсмічної інтерпретації кристалічного фундаменту на основі попередніх досліджень (Заяць, & Яриш, 1978). Дані показали, що спектральний аналіз гравітаційної зйомки коректно відображає протерозойський кристалічний фундамент (рис. 8а та 8б).

Вирішення прямої задачі на основі гравітаційних та магнітних даних у 2D. Зіставлення моделі з вимірними даними гравітаційної та магнітної зйомок дають змогу виявити структуру глибинного кристалічного фундаменту, а також змодельовати вплив характеру поверхні Мохо на фізичні властивості (рис. 9).

Інтерпретація даних та виділення лінеamentів. Фінальним кроком роботи є порівняння результатів моделювання прямої задачі гравірозвідки та магніторозвідки з даними теплового потоку. На цьому етапі проводилося зіставлення глибинної будови, наявності розломів і підвищених значень теплового потоку (рис. 9).

Результати

У ході дослідження було успішно застосовано сучасні методи моделювання даних потенціальних полів для розуміння глибинної структури Передкарпатського прогину.

Результатом роботи є модель глибинної будови кристалічного фундаменту Передкарпатського прогину вздовж профілю дослідження, на основі комплексного аналізу. Також виявлено зв'язок між тепловим потоком та змодельованою структурою (на основі вирішення прямої задачі потенціальних полів). Встановлено зв'язок між підвищеними значеннями теплового потоку, які співпадають з структурним підняттям кристалічного фундаменту та наявністю глибоких розломів, які порушують протерозойський фундамент. Результати інтерпретації гравітаційного поля дали змогу визначити глибинну структуру фундаменту, його поведінку та густинні аномалії, а дані магнітної зйомки – наявність глибинних розломів. Виявлена глибинна структура характеризується сідловиною, із заглибленням крил структури в зоні Передкарпатського прогину, а також локальним підняттям кристалічного фундаменту, який порушений глибинними розломами в центрі профілю дослідження.

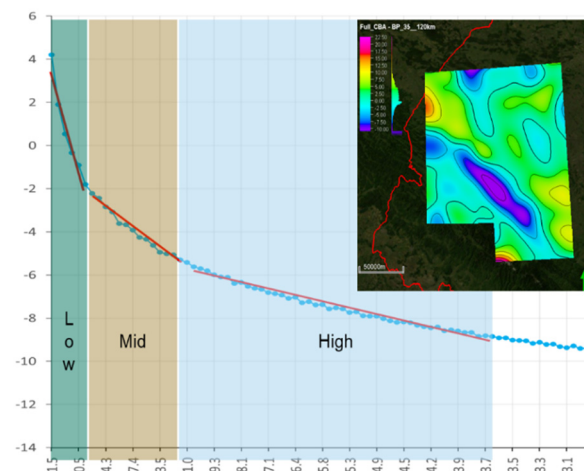


Рис. 7. Спектральний аналіз частотного спектра гравітаційної зйомки Передкарпатського прогину з виділенням частот (низька, середня, висока), а також вилучення частот низького спектра (35–120 км довжини хвилі) з даних гравітаційного поля

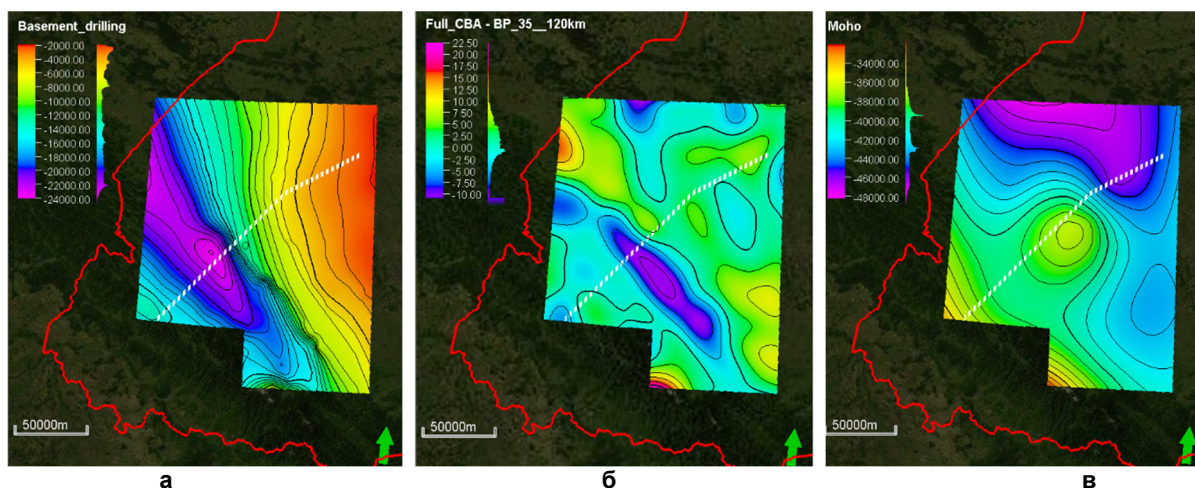


Рис. 8. Карти дослідження глибинної структури Передкарпатського прогину:

- а – схема будови поверхні дорифейського кристалічного фундаменту західних областей (Заяць, & Яриш, 1978);
 б – карта спектрального аналізу даних аномального гравітаційного поля в редакції Буге;
 в – карта будови поверхні Мохо згідно з відкритими даними Geosoft.
 Біла лінія – розріз дослідження для 2-вимірної моделі прямої задачі

За результатами досліджень отримано нове розуміння залежності геотермальної перспективності не лише з характером структури кристалічного фундаменту, але і з протяжністю глибинних розломів, які простягаються до фундаменту. Варто відзначити магнітні аномалії, що підтверджують наявність розломів, проте відсутність високих значень теплового потоку вказує на те, що для перспективних пошуків геотермальних ресурсів необхідна не лише наявність розломів, а саме протяжність, яка розкриває глибокий кристалічний фундамент (червоні розломи на рис. 10).

За попередніми дослідженнями зазначеного регіону (Кутас та ін., 1996; Орлюк та ін., 2022; Starostenko et al., 2020; Шеремета та ін., 2011) було отримано 2-вимірну модель по профілю RomUkreis на основі гравітаційних і

магнітних даних, виведено дані теплового потоку та їхній зв'язок з аномаліями даних потенціальних полів. Також підтверджено наявність глибоких розломів, що розкривають кристалічний фундамент і їх тяжіння до високих значень теплового потоку як перспективних зон міграції вуглеводнів.

Автори статті виконали порівняльний аналіз з результатами вказаних вище, що дозволило показати систематичність підходу 2-вимірного моделювання даних потенціальних полів та інтеграції даних теплового потоку. Авторам даної роботи вдалось також виявити зв'язок між даними високих значень теплового потоку до підняття кристалічного фундаменту і розломів, що його розкривають (рис. 9, 10).

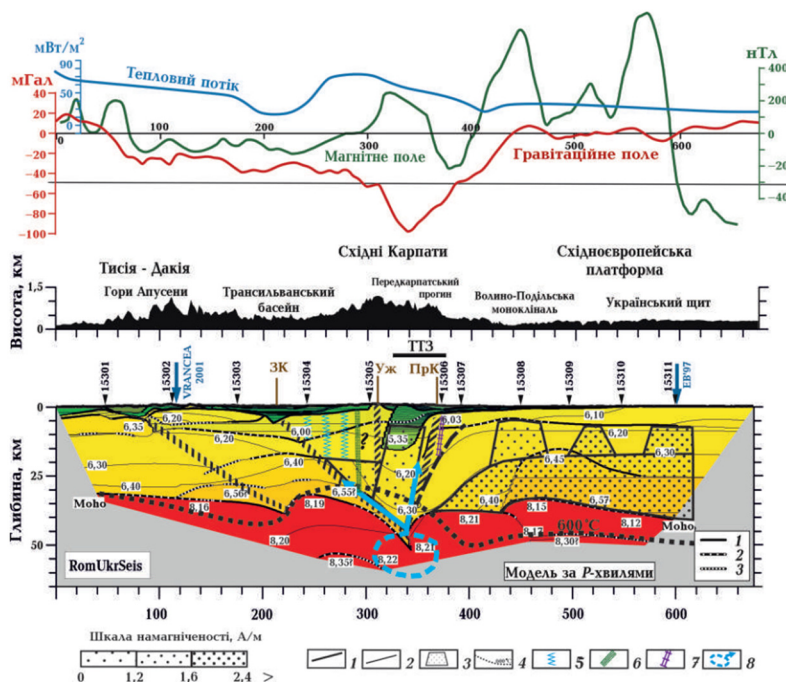


Рис. 9. Магнітна модель земної кори вздовж профілю RomUkreis (Орлюк та ін., 2022):

- 1 – межа відбиття або рефракції за Р-хвилями; 2 – ізолінії швидкості, км/с (білі прямокутники); 3 – магнітні джерела;
 4 – ізотерма Кюрі; 5 – флюїдно-магматичні канали; 6 – прогнозована межа мезо-неопротерозойської та палеозойської кори;
 7 – прогнозована межа архей(?)–палеопротерозойської та мезо-неопротерозойської кори;
 8 – потенційне джерело вуглеводнів та шляхи його надходження в земну кору

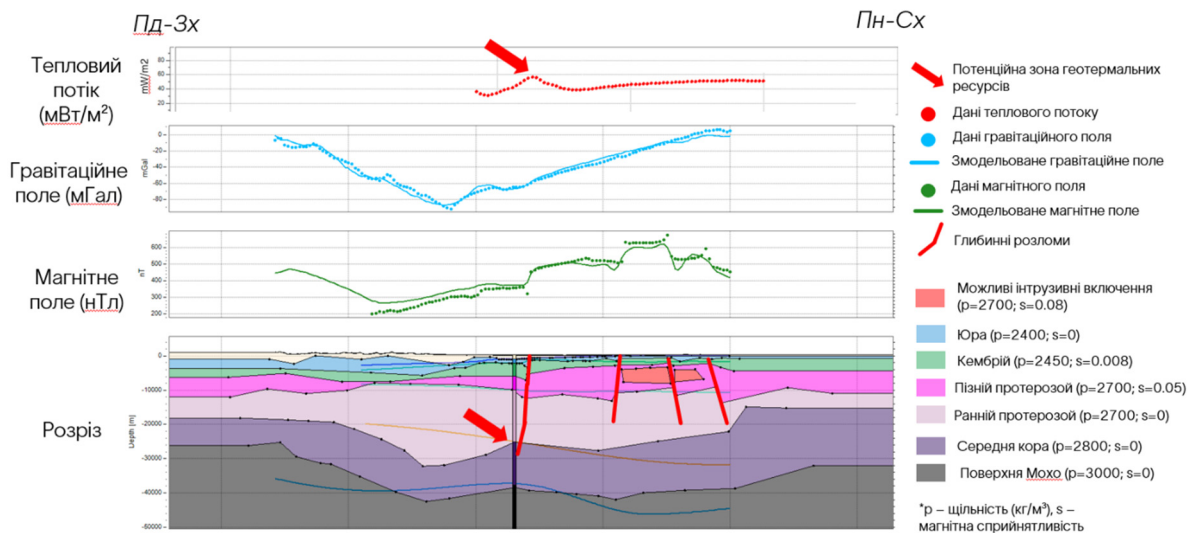


Рис. 10. Двовимірну модель на основі даних потенціальних полів, а також дані теплового потоку вздовж профілю (Кутас та ін., 1996, 2018; Атлас..., 1998). Орієнтацію профілю зображено на рис. 8

Якщо порівнювати з попередніми результатами, то отримано краще розуміння зв'язку аномалій теплового потоку з глибинною структурою кристалічного фундаменту та тектоніки Передкарпатського прогину, які свідчать про підвищену перспективність геотермального потенціалу території. Вирішення прямих задач гравірозвідки та магніторозвідки дало змогу виділити перспективні елементи геотермальної системи з підтвердженням даними теплового потоку: підняття кристалічного фундаменту та розкриття його глибинними розломами, які можуть слугувати зоною міграції геотермальних флюїдів (рис. 10). Такі результати є невід'ємною частиною більш ґрунтового аналізу геотермального потенціалу Передкарпатського прогину, оскільки дають змогу краще зрозуміти просторове розташування структурних елементів. Було виявлено локальні аномалії глибинної структури кристалічного фундаменту (на основі спектрального аналізу), завдяки чому створено карту наближення до фундаменту, а завдяки 2-вимірному моделюванню – змодельовано кристалічний фундамент та розломи, які його порушують у розрізі, що є основою для розрахунку геотермального потенціалу Передкарпатського прогину. Підтвердження локації глибинних розломів та структурних підняттях фундаменту на основі теплового потоку та буріння свердловин з високим показником температури дають змогу зробити висновки про зв'язок із зонами підвищеної імовірності геотермального потенціалу (рис. 11).

Дискусія і висновки

Представлена робота сфокусована на ідентифікації перспективних зон геотермальних пошуків з акцентом на пошуки структурних підняттях кристалічного фундаменту та наявності глибинних розломів, що порушують цей фундамент. На території Передкарпатського прогину цей підхід також дає змогу розширити вивчення тектонічної історії, локалізації розломів для подальших робіт: вуглеводневих пошуків (як шляхів міграції вуглеводнів), мінералізації вод, пошуку критичних мінералів.

Отже, в роботі вперше застосовано інтеграцію методів спектрального аналізу та трансформації Фур'є з методом прямої задачі потенціальних полів для поліпшення точності визначення геологічних структур і їхнього зв'язку з даними теплового потоку на території Передкарпатського прогину. На відміну від попередніх досліджень, ця робота демонструє можливість виявлення глибинних структур і тектонічних порушень, які тяжіють до підвищених значень

аномалій теплового потоку. Крім того, дослідження пропонує новий підхід до використання прямої задачі граві- та магніторозвідки, що полягає в інтеграції їх з даними теплового потоку, що, у свою чергу, може бути використано для оптимізації геотермальної та мінеральної розвідки у складних геологічних умовах.

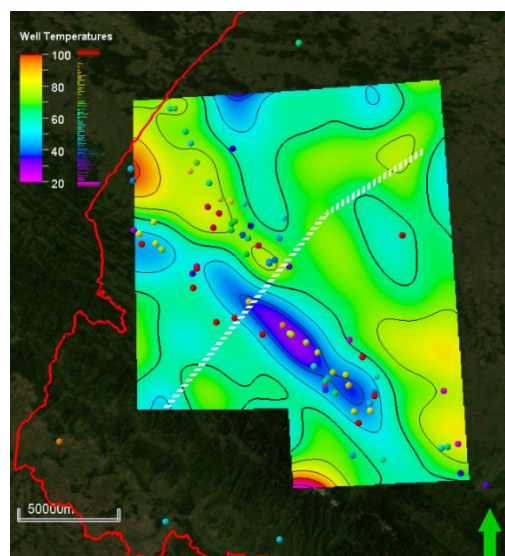


Рис. 11. Зіставлення результатів спектрального аналізу даних гравітаційної аномалії в редукованій Буге низького спектра, що відповідає кристалічному фундаменту, а також дані вимірювання температури зі свердловин (кольорові точки) на фоні топографічної карти Передкарпатського прогину

Зіставлення отриманих даних з існуючими даними теплового потоку та даними температури в глибоких свердловинах підтвердило точність методів щодо застосування їх до розкриття геотермального потенціалу Передкарпатського прогину.

Перспективами застосування цього 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 та підняття кристалічного фундаменту відіграють ключову роль.

Внесок авторів: Роман Петрокушин – концептуалізація, методологія, програмне забезпечення, валідація даних, написання (оригінальна чернетка); Дмитро Безродний – формальний аналіз, написання (перегляд і редагування).

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 (Т. 4–5: Західний нафтогазоносний регіон). (1998). УНГА.
- Заяць, Х. Б. (2013). *Глибинна будова надр Західного регіону України на основі сейсмічних досліджень і напрямки пошукових робіт на нафту і газ*. Центр Європи.
- 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., Красовський, С. С., Орлюк, М. І., & Пашкевич, І. К. (1996). Модель глибинного строення і тектонічного розвитку літосфери заходу України. *Геофізический журнал*, 18(6), 18–29.
- Кутас, Р. І., Орлюк, М. І., Пашкевич, І. К., Бурахович, Т. К., Макаренко, І. Б., & Бугаєнко, І. В. (2018). Глибинное строение территории Украины по современным геофизическим данным. Общие сведения. В В. И. Старостенко & О. Б. Гинтов (Ред.), *Очерки геодинамики Украины* (с. 17–24). ВІ ЕН ЕНІ.
- Кутас, Р. І. (2021). Глибинна дегазація і нафтогазоносність Східних (Українських) Карпат: геодинамічний і геотермічний аспекти. *Геофізический журнал*, 43(6).
- Нечаева, Т. С., Шимків, Л. М., Єнтін, В. А., Дроздецький, В. В., Нікіташ, Л. П., & Дробак, С. М. (2002). *Схема гравітаційного поля України* (М-6 1:200000). ПДРПГ "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. *Геофізический журнал*, 44(5), 77–105.
- Шеремета, П. М., Слоніцкая, С. Г., Трегубенко, В. І., Ладженський, Ю. М., Назаревич, А. В., Назаревич, Л. Є., Хавензон, І. В., & Левкович, Ю. М. (2011). О коллизии Западно-Европейской микроплиты и Восточно-Европейской плиты в западном регионе Украины по новым данным региональных геофизических исследований и перспективах нефтегазоносности. *Геодинаміка*, 2(11), 341–343.
- Atef, H., Abd El Gawad, A., Abdel Zaher, M., & Farag, K. (2016). The contribution of gravity method in geothermal exploration of southern part of the Gulf of Suez–Sinai region, Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2016.02.005>
- Geosoft Oasis Montaj. (2022). <https://www.seequent.com/>
- Huangfu, P., Wang, Y., Fan, W. et al. (2017). Dynamics of unstable continental subduction: Insights from numerical modeling. *Sci. China Earth Sci.*, 60, 218–234. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-5014-6>
- Majorowicz, J., & Grasby, S. E. (2021). Deep Geothermal Heating Potential for the Communities of the Western Canadian Sedimentary Basin. *Energies*, 14(3), 706. <https://doi.org/10.3390/en14030706>
- Starostenko, V., Janik, T., Kolomyets, K., Czuba, W., Środa, P., Grad, M., Kováč, I., Stephenson, R., Lysynchuk, D., Thybo, H., Artemieva, I. M., Omelchenko, V., Gintov, O., Kutas, R., Gryn, D., Guterch, A., Hegedűs, E., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., & Tolkunov, A. (2013). Seismic velocity model of the crust and upper mantle along profile PANCAKE across the Carpathians between the Pannonian Basin and the East European Craton. *Tectonophysics*, 608, 1049–1072. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.07.008>
- Starostenko, V., Janik, T., Mocanu, V., Stephenson, R., Yegorova, T., Amashukeli, T., Czuba, W., Środa, P., Murovskaya, A., Kolomyets, K., Lysynchuk, D., Okoň, J., Dragut, A., Omelchenko, V., Legostaeva, O., Gryn, D., Mechie, J., & Tolkunov, A. (2020). RomUkrSeis: Seismic model of the crust and upper mantle across the Eastern Carpathians – From the Apuseni Mountains to the Ukrainian Shield. *Tectonophysics*, 794, 228620. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228620>
- Starostenko, V. I., Murovskaya, A. V., Yegorova, T. P., Gintov, O. B., & Amashukeli, T. A. (2022). The relationship of the oil-and-gas fields of the Forecarpathian region with the regional faults system and deep structure. *Геофізический журнал*, 44(1), 111–123. <https://doi.org/10.24028/gzh.v44i1.253713>
- References**
- Atef, H., Abd El Gawad, A., Abdel Zaher, M., & Farag, K. (2016). The contribution of gravity method in geothermal exploration of southern part of the Gulf of Suez–Sinai region, Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2016.02.005>
- Atlas of Oil and Gas Fields of Ukraine (Vols. 4–5: Western Oil- and Gas-Bearing Region). (1998). Ukrainian Oil and Gas Academy (UNGA).
- Geosoft Oasis Montaj. (2022). <https://www.seequent.com/>
- Huangfu, P., Wang, Y., Fan, W. et al. (2017). Dynamics of unstable continental subduction: Insights from numerical modeling. *Sci. China Earth Sci.*, 60, 218–234. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-5014-6>
- Krupskiy, Yu. Z. (2001). *Geodynamic conditions of formation and hydrocarbon potential of the Carpathian and Volyn–Podillia regions of Ukraine*. UkrDGRІ [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 resources of Ukraine* (Book II). Nika-Center [in Ukrainian].
- Kutas, R. I. (2021). Deep degassing and hydrocarbon potential of the Eastern (Ukrainian) Carpathians: Geodynamic and geothermal aspects. *Geophysical Journal*, 43(6) [in Ukrainian].
- Kutas, R. I., Krasovsky, S. S., Orliuk, M. I., & Pashkevich, I. K. (1996). Model of the deep structure and tectonic evolution of the lithosphere of western Ukraine. *Geophysical Journal*, 18(6), 18–29 [in Russian].
- Kutas, R. I., Orliuk, M. I., Pashkevich, I. K., Burakhovych, T. K., Makarenko, I. B., & Bugaenko, I. V. (2018). Deep structure of the territory of Ukraine based on modern geophysical data: General overview. In V. I. Starostenko & O. B. Gintov (Eds.), *Essays on the geodynamics of Ukraine* (pp. 17–24). BIN ENEI [in Russian].
- Majorowicz, J., & Grasby, S. E. (2021). Deep Geothermal Heating Potential for the Communities of the Western Canadian Sedimentary Basin. *Energies*, 14(3), 706. <https://doi.org/10.3390/en14030706>
- Nechaeva, T. S., Shymkiv, L. M., Yentin, V. A., Drozdetskiy, V. V., Nikitash, L. P., & Drobakh, S. M. (2002). *Gravity field map of Ukraine* (Scale 1:200,000). State Geological Enterprise "Pivnichgeolohiya" [in Ukrainian].
- Orliuk, M. I., Bakarchieva, M. I., & Marchenko, A. V. (2022). Magnetic characteristics and tectonic structure of the Earth's crust of the Carpathian oil- and gas-bearing province as part of integrated hydrocarbon criteria. *Geophysical Journal*, 44(5), 77–105 [in Ukrainian].
- Sheremeta, P. M., Slonitskaya, S. G., Tregubenko, V. I., Ladyzhenskii, Yu. M., Nazarevych, A. V., Nazarevych, L. Ye., Khavenzon, I. V., & Levkovych, Yu. M. (2011). Collision of the West European microplate and the East European Plate in western Ukraine based on new regional geophysical data and implications for hydrocarbon potential. *Geodynamics*, 2(11), 341–343 [in Russian].
- Starostenko, V., Janik, T., Kolomyets, K., Czuba, W., Środa, P., Grad, M., Kováč, I., Stephenson, R., Lysynchuk, D., Thybo, H., Artemieva, I. M., Omelchenko, V., Gintov, O., Kutas, R., Gryn, D., Guterch, A., Hegedűs, E., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., & Tolkunov, A. (2013). Seismic velocity model of the crust and upper mantle along profile PANCAKE across the Carpathians between the Pannonian Basin and the East European Craton. *Tectonophysics*, 608, 1049–1072. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.07.008>
- Starostenko, V., Janik, T., Mocanu, V., Stephenson, R., Yegorova, T., Amashukeli, T., Czuba, W., Środa, P., Murovskaya, A., Kolomyets, K., Lysynchuk, D., Okoň, J., Dragut, A., Omelchenko, V., Legostaeva, O., Gryn, D., Mechie, J., & Tolkunov, A. (2020). RomUkrSeis: Seismic model of the crust and upper mantle across the Eastern Carpathians – From the Apuseni Mountains to the Ukrainian Shield. *Tectonophysics*, 794, 228620. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228620>
- Starostenko, V. I., Murovskaya, A. V., Yegorova, T. P., Gintov, O. B., & Amashukeli, T. A. (2022). The relationship of the oil-and-gas fields of the Forecarpathian region with the regional faults system and deep structure. *Геофізический журнал*, 44(1), 111–123. <https://doi.org/10.24028/gzh.v44i1.253713>
- Zaiats, Kh. B. (2013). *Deep structure of the subsurface of Western Ukraine based on seismic studies and directions of oil and gas exploration*. Center of Europe [in Ukrainian].
- Zaiats, Kh., & Yarysh, M. (1978). *Structural map of the surface of the Precambrian crystalline basement of the western regions with major faults*. Lviv Branch of UkrDGRІ [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 17.10.25
Прорецензовано / Revised: 25.12.25
Схвалено до друку / Accepted: 18.02.26
Опубліковано / Published: 27.02.26

Roman PETROKUSHYN, PhD Student
ORCID ID: 0000-0001-7639-8279
e-mail: petrokushin@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Dmytro BEZRODNYI, Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0001-7463-7133
e-mail: dmytrobezrodnyi@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

MODELING OF THE DEEP CRYSTALLINE STRUCTURE OF THE PRECARPATHIAN FOREDEEP BASED ON POTENTIAL FIELD DATA AS A BASIS FOR PREDICTING GEOTHERMAL POTENTIAL ZONES

B a c k g r o u n d . *The paper presents a methodology and the results of its application to assess the influence of structural uplift of the crystalline basement and deep faults disrupting it on the prospects for exploration of geothermal resource deposits within the Precarpathian Foredeep of Ukraine. The relevance of the study is justified by the need to investigate the geothermal resources of the Precarpathian Foredeep as one of the key sources of renewable energy. Separate influence is dedicated towards the integration of modern methods for interpreting gravity and magnetic survey data with heat-flow data.*

M e t h o d s . *To model the deep structure, an integrated approach was applied, including the solution of forward modeling using gravity and magnetic data, combined with spectral analysis and Fourier transformation. The methodology involves integrating the results of potential field interpretation with heat-flow data and temperature measurements from deep boreholes. This approach allows for comprehensive determination of the structure of deep horizons and identification of faults disrupting the crystalline basement, followed by their correlation with heat-flow data. The data analysis was based on gravity and magnetic surveys at a scale of 1:200,000 within the Precarpathian Foredeep.*

R e s u l t s . *Application of the methodology made it possible to identify zones of crystalline basement uplift and its disruption by deep faults, which correspond to anomalies of maximum heat-flow values. The identified zones may serve as pathways for the migration of geothermal fluids from deep heated areas to reservoir rocks, thereby increasing their prospectivity for geological exploration. Comparative analysis of the obtained results with existing drilling and heat-flow data confirmed the accuracy of the method.*

C o n c l u s i o n s . *The proposed methodology is an effective approach for studying the deep geological structure of the Earth's crust in the context of geothermal exploration when integrated with heat-flow data. Its application makes it possible to refine the structural and tectonic framework of regions, identify new faults and zones of crystalline basement uplift, which are important for geothermal resource exploration. The methodology has significant potential for investigations of complex geological objects such as the Precarpathian Foredeep and can substantially enhance the efficiency of geological exploration activities.*

K e y w o r d s : *Precarpathian Foredeep, gravity anomalies, magnetic anomalies, heat flow, spectral analysis, 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.