УДК 551.243.8:550.83 (476/477)
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.94.07>

М. Баньковський, канд. геол. наук,
E-mail: mishbank@gmail.com;
А. Гейхман, канд фіз.-мат. наук,
E-mail: anatolgeykhman@gmail.com;
І. Потапчук, канд геол.-мінерал. наук;
Інститут геологічних наук НАН України,
вул. О. Гончара, 55-Б, Київ-54, 01601, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ХВИЛЬОВОГО МЕТОДУ ПРОДОВЖЕННЯ ПОТЕНЦІАЛЬНИХ ПОЛІВ У НИЖНІЙ ПІВПРОСТІР ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ГЛИБИННОЇ БУДОВИ ЗЕМЛІ І ПОШУКУ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

(Представлено членом редакційної колегії д-ром фіз.-мат. наук І.М. Корчагіним)

Розглядається методика дослідження глибинної будови Землі й пошуку родовищ корисних копалин, у першу чергу нафти і газу, на основі хвильового (голографічного) перетворення даних гравітаційного, магнітного та геотермічного полів у просторову 3-D модель цих полів у комплексі з геологічними та сейсмічними дослідженнями. Наведено фізичні принципи, на яких базується теорія методу та описано методику і програмний комплекс, що реалізує метод. Наведено приклади застосування голографічного методу для вивчення глибинної будови Землі, трасування розривних порушень і пошуку корисних копалин. Показано перспективи застосування даного підходу.

Практична значимість роботи в тому, що запропонована методика за бажанням може бути успішно використана як для вивчення глибинної будови Землі, так і для пошуків різноманітних родовищ корисних копалин.

Ключові слова: геофізична голографія, граві- та магніторозвідка, аномалії гравітаційного, магнітного та геотермічного полів, комплексна інтерпретація геолого-геофізичних матеріалів.

Вступ. Хвильовий підхід, започаткований роботами Клаербоута і Тимошина в сейсморозвідці, знайшов також своє наукове і практичне застосування під час геологорозвідувальних робіт, що поклало початок розвитку голографічного напрямку в обробці та інтерпретації сейсмічних полів.

Ідея Клаербоута (Клаербоут, 1989) про використання хвильового рівняння для вирішення задач сейсморозвідки спершу не сприймалася науковою спільнотою. Ю. Тимошин, якому належить переклад роботи Клаербоута, запропонував ще в 1960 р. новий метод імпульсної сейсмічної голографії на основі дифракційного перетворення сейсмічних записів у зображення геологічного середовища. Його ідея також була настільки новаторською, що взагалі не сприймалася більшістю геофізиків протягом тривалого часу. Під керівництвом і за активної участі Ю.В. Тимошина його учнями проводилися дослідження з питань розширення математичної моделі хвильового процесу в сейсмічній голографії з урахування анізотропії, частотної дисперсії й поглинання, була розроблена теорія створення сейсмічних зображень складнопобудованих сейсмічних середовищ, проводилися дослідження в напрямі сейсмічної томографії. Розроблено принципів алгоритми нового – дифракційного або хвильового її варіанта.

Як відомо, найбільш поширеними є методи просторової сейсморозвідки, один з яких здійснюється за рахунок кореляційної ув'язки спостережуваного поля пружних хвиль з глибинами горизонтами земних надр і задовольняє вимогам голографічного перетворення, і другий, який у своїй основі побудований на використанні хвильового продовження поля пружних хвиль за рівняннями Клаербоута (Клаербоут, 1989). Обидва способи вимагали збудження пружних коливань вибуховими або невибуховими сейсмічними джерелами, розташованими на сейсмічних профілях (або в проміжку між ними), із переміщенням їх із кроком, який враховує каналність станцій, кратність перекриття та відстань між приймачами і цим забезпечує підвищення продуктивності праці та розширення можливостей досліджень. Недоліком означених способів є висока вартість польових робіт, яка пов'язана з необхідністю буріння свердловин для розташування вибухових

речовин під зоною малих швидкостей (ЗМС) або використання невибухових джерел (вібрисейсів або сейсмомодін), відстрілювання мережі розвідувальних профілів (3-D) з відповідним значним нанесенням шкоди екологічному стану природи та сільському господарству. Сейсмічні дослідження вимагають знання швидкостей у районі робіт, характеризуються великим обсягом матеріалів обробки та інтерпретації сейсмограм. На їхній основі проводилося виявлення і трасування тектонічних розломів, зон тріщинуватості та різноманітних структур земної кори і подальший комплексний прогноз можливої наявності родовищ корисних копалин на глибині. Тривалий час основні обсяги пошуково-розвідувальних робіт випадали на сейсморозвідку, тоді як допомога інших геофізичних методів залишалася незначною.

Не виключено, що роботи Ю.В. Тимошина в лабораторії імпульсної сейсмічної голографії (КГВ УкрНДГРІ) надали ідею для застосування хвильового підходу до потенціальних полів Я.Б. Сігалову. Адже, ще в 50–70-ті рр. теорія аналітичного продовження потенціальних полів та її практичне використання для розв'язання геофізичних задач розроблялися багатьма вченими – Лаврентьевим, Івановим, Тихоновим, Страховим, Барановим (Баранов, та ін., 1980). У ці ж роки визначилася роль аналітичного продовження як засобу виявлення і локалізації об'єктів, що збуджують нормальні геофізичні поля під час геологічного картування, пошуків і розвідки різних родовищ корисних копалин. З великої кількості робіт, у яких пропонуються різноманітні наближені прийоми для розв'язання таких задач, виділяються роботи М.А. Алексідзе та П.Н. Вабишевича, у яких використовуються різні методи продовження поля. Тим не менше суттєвий прогрес гальмувався проблемами регуляризації при продовженні потенціальних полів через маси геологічних об'єктів.

Найбільш близьким за технічною суттю до способу, що нами застосовується, є спосіб гравітаційної або магнітної голографічної візуалізації векторних або тензорних даних, в якому отримують зображення земних надр на основі міграційних перетворень потенціальних полів як особливої форми продовження в нижній півпростір, коли для візуалізації джерел полів у нижньому

півпросторі використовують уявні дзеркальні відображення у верхньому півпросторі від істинних джерел нижнього півпростору з подальшою міграцією (продовженням) полів у верхній півпростір, що є фактично, на думку його автора М. Жданова, тотожним продовженню полів за рівнянням Лапласа у верхній півпростір для реальних джерел. За цими даними будують розрізи та отримують просторову модель геологічного середовища. Недоліком такого підходу є те, що спосіб не забезпечує задовільної деталізації будови геологічного середовища, оскільки використання рівняння Лапласа, на нашу думку, дозволяє візуалізувати лише окремі сингулярні точки, які становлять окремі фрагменти реальних геологічних структур.

Автори даної роботи свої дослідження базують на методі геофізичної голографії, основу якого закладено Я.Б. Сігаловим та М.І. Андрашко в роботі (*Сігалов и Андрашко, 1989*). Перша програма для 2-D варіанта алгоритму була розроблена і випробувана експериментально Л.М. Вольдман з використанням обчислювальних машин серії ЕС. Подальший розвиток обчислювальних алгоритмів і розробка програмного комплексу для персональних комп'ютерів була здійснена канд. фіз.-мат. наук А. Гейхманом. Основи геологічної інтерпретації отриманих результатів були запропоновані М. Баньковським. В останній час методика використовувалась в Інституті геологічних наук НАН України в під керівництвом канд. геол.-мінерал. наук І.С. Потапчука, який, на превеликий жаль, відійшов у вічність.

В основу нашого підходу було покладено завдання створення способу розрахунку аномалій гравітаційного, магнітного та інших полів у нижньому півпросторі, обумовлених зонами розушільнень та ущільнень гірських порід у глибинних геологічних структурах надр Землі, зображення яких має бути максимально імовірно близьким до реальної будови геологічного середовища та його моделей, отриманих іншими методами.

Хвильовий аналог для продовження потенціальних полів у верхній або нижній півпросторі реалізовано та вдосконалено А.М. Гейхманом у вигляді пакету програм у тривимірному (3-D) варіанті.

Математичною моделлю, що породжує ітераційний процес, взята диференціальна задача, яка описує продовження хвильового поля:

$$2 \sum_i \omega_{x_i} \frac{\partial^2 U}{\partial t \partial x_i} + \Delta \omega \frac{\partial U}{\partial t} = \Delta U + f \text{ в } D \quad (1)$$

$$UX_1, X_2, X_3, 0, t = g_{TP}(X_1, X_2), 0 \leq X_i \leq a_i;$$

$$U(X_1, X_2, X_3, t = t^*) = 0, t \leq t^*.$$

Для простоти викладу розглядається двовимірний варіант. При заданні g_{TP} на складному рельєфі вводиться заміна змінних

$$Y = Y = \frac{z_0 - x_3}{z_0 - \xi(x_1)};$$

тут $x_3 = \xi(x_1)$ – функція, що описує рельєф, $z_0 = \text{const}$.

Тоді початкове рівняння (1) при $\omega_{x_1} = \omega_{x_2} = 0$ набуває вигляду

$$\frac{2\omega_{x_3}}{\xi(x_1) - z_0} \frac{\partial^2 U}{\partial t \partial y} + \Delta \omega \frac{\partial U}{\partial t} \equiv \frac{1}{[\xi_1(x) - z_0]^2} \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}. \quad (2)$$

Деталі теорії викладено в роботі (*Сігалов и Андрашко, 1989*). Наведені формули є суттю кінцево-різницевої апроксимації моделі геофізичної голографії. Основна

суть методу полягає в тому, що некоректна задача аналітичного продовження в нижній півпростір заданих даних на поверхні (або на двох рівнях) потенціальних полів здійснюється не за допомогою еліптичного диференціального рівняння, а за допомогою ітераційного процесу, побудованого на основі використання трансформанти хвильового рівняння (1), причому доводиться, що в смузі аналітичності таке рішення сходиться до точного розв'язку рівняння Пуассона. Тут змінна фіктивного часу використовується для ітераційного розв'язання задачі Діріхле. За латеральними змінними використовується розкладання в спектр за допомогою перетворення Фур'є. Для продовження в нижній півпростір використовують кінцево-різницевого оператора, усталеність якого доведена за допомогою математичного апарату Самарського. Таким чином, для розв'язання задачі задіяно потужні математичні апарати: ітераційний, спектральний, кінцево-різницевого. Подальша смугова фільтрація дозволяє налаштовуватися як на визначені розміри об'єктів, так і на різноманітні глибини.

Отже, поставлене завдання вирішується так: здійснюється розрахунок продовження даних потенціальних полів у верхній півпростір із точок спостереження за рівнянням Лапласа в гармоніках Фур'є в частотному діапазоні на мережі профілів тільки на один або декілька рівнів угору. Після чого здійснюють продовження кожної гармоніки Фур'є потенціальних полів у нижній півпростір з кожних попередніх двох рівнів за рівнянням Пуассона в частотній області на один рівень униз за допомогою фокусувальної міграції аномальних полів з використанням модифікованого 15-градусного хвильового рівняння Клаербоута. Далі проводять подальшу керовану міграцію чергових двох попередніх рівнів міграційних полів для отримання наступного нижнього рівня аж до потрібної глибини дослідження за умови зрізання високочастотних гармонік за значного перевищення ними першопочаткових величин потенціального поля у спектрі спостережених аномалій. Розраховують системи зрізів і взаємоперпендикулярних вертикальних розрізів на субширотних, субмеридіональних і довільного напрямку профілях, виконують смугові фільтрації у змінних прямокутних вікнах з кожного профілю, будують розрізи потенціальних полів з нанесенням на них даних сейсмічних та інших геолого-геофізичних методів. Після чого виділяють на отриманих розрізах зони ущільнення та розушільнення геологічних структур і тектонічні порушення, будують глибинні карти гіпсометрії підземних геологічних структур для одного або декількох горизонтів та інтерпретують результати проведених досліджень за всім комплексом геолого-геофізичних даних.

Для реалізації методики в попередні роки складено пакет дослідницьких програм, за яким проводять обробку геолого-геофізичних матеріалів у діалоговому режимі. Склад програмного пакета для обробки площових спостережень такий: 1. Програма конвертер із формату системи SURFER у формат системи обробки; 2. Інтерполяційна програма на ділянках вихідної матриці, де не було спостережень; 3. Програма згладжування вихідних даних; 4. Програма обчислення регуляризованої матриці похідних; 5. Програма побудови другого прошарку над першим; 6. Програма двократного просторового швидкого перетворення Фур'є для вихідних прошарків; 7. Програма продовження поля в нижній або верхній півпростір; 8. Блок програм аналізу, перетворення, візуалізації, фільтрації, характеристик спектра поля; 9. Програма оберненого перетворення Фур'є для тривимірної продовженої матриці; 10. Блок програм, що дозволяють виділити вертикальні розрізи в різноманітних

напрямок (слом профілі, горизонтальні зрізи та ін.); 11. Блок програм двовимірної фільтрації отриманих результатів; 12. Програма тривимірної й псевдотривимірної фільтрації продовженого поля; 13. Блок програм фільтрації по осі Z; 14. Програма конвертер двовимірних матриць у формат системи SURFER.

Продовжені в нижній півпростір і перетворені в розрізи потенціальних полів дані варто трактувати як деякі формальні операції, що дозволяють локалізувати імовірне місце розташування джерел, знак джерел і в багатьох випадках їхню форму і приблизний розмір. Гравітаційні ефекти від окремих структур можна уявити у вигляді хвиль різної амплітуди і довжини, виділити хвилі, характерні для даної структури, і тим самим виявити відповідну структуру. Припускається, що протяжні, віддалені структури викликають хвилі великої довжини і, як правило, малої амплітуди. Близькі малі структури, навпаки, дають короткі хвилі великої амплітуди і з великими градієнтами аномалій. Оскільки точність гравіметричної зйомки обмежена, інформації про глибинні й малоінтенсивні об'єкти може і не бути. Тому на розрізах на великій глибині можуть бути виявлені лише великі за розмірами і контрастні об'єкти. Такі об'єкти будуть пов'язані з більш низькими просторовими частотами (хвильовими числами). Як правило, гравітаційне аномальне поле розділяють на дві складові, викликані близькими локальними і далекими протяжними структурами. Як відомо, усі методи виділення аномальних полів засновані або на прямому усередненні, або на використанні більш високих похідних потенціалу. При усередненні аномалій зникають дрібні деталі й виступають явно значні (регіональні) риси будови поля і відповідно густинної неоднорідності. Очевидно, якщо з аномалій сили тяжіння в кожній конкретній точці детальної карти відняти аномалію, усереднену за деякою площею, то в залишкових аномаліях буде чіткіше виявлятися характер локальних неоднорідностей.

Раніше як синонім до терміна "методика геофізичної голографії" автори використовували абревіатуру МКЕКФ (методика квазіекстремумів квадратичного функціоналу) за аналогією з розвиненим В.М. Березкіним методом квазіособих точок. Однак термін "квазіекстремум" не повністю відображає сутність підходу, і сьогодні автори цей термін у своїх роботах не використовують.

Беремо також до уваги, що нині слід вважати експериментально доведеним фактом, що поширення гравітаційної енергії має хвильову природу. Будемо припускати також, що гравітаційна хвиля, в усякому разі в літосфері та у верхніх шарах мантії, розповсюджується з постійною або майже постійною швидкістю. Пояснимо ідею методу таким чином.

Щоб було більш зрозуміло схему розповсюдження хвиль, уявімо однорідне постійної щільності кінцевих розмірів двовимірне (для простоти) середовище (напівплощину), на поверхні якого розташовані гравіметри, де кожен гравіметр породжує одну "гравітрасу". У геологічному середовищі на певних глибинах у визначений момент одночасно включаються дискретні надлишкові маси. Сигнал від найближчої до поверхні маси буде прийнятий гравіметрами першим. Його інтенсивність буде максимальною, а діаметр півкола, прийнятого гравіметрами від перших надходжень сигналу (тобто маємо аналог сейсмічного годографа), – мінімальний. Для наступного за глибиною джерела інтенсивність буде трохи нижче, а діаметр півкола більше. Продовжуючи цей процес, ми отримаємо набір рознесених за часом перших надходжень імпульсних сигналів від гравітаційних джерел. Швидкість поширення

гравітаційних хвиль принципово не важлива, оскільки вона буде однозначно пов'язана із часом надходжень цих хвиль і зміна швидкості призведе тільки до трансформаційних змін величини часового дискрета, тому ми можемо припустити, що гравітаційні хвилі поширюються з постійною швидкістю (або принаймні з майже постійною) у будь-якому середовищі, яке існує в корі й верхній мантії. Якщо ця швидкість вважається константою, то її величина неістотно й її можна прийняти будь-якою або навіть одиничною. Якщо на отримані гравіметричні "годографи" ми навісимо сигнал, то отримаємо повний аналог сейсмограми або часового розрізу з одноразовим накопиченням. Цього достатньо, оскільки припускається, що гравітаційні хвилі не відбиваються і не породжують кратних хвиль, тобто "гравіграма" складається тільки з прямих хвиль від гравітаційних джерел і містить менше шуму, ніж сейсмограма. Єдина суттєва відмінність такої "гравіграми" від сейсмограми полягає в тому, що на сейсмограмах ми фіксуємо подвійні часи надходжень хвиль, а на "гравіграмі" – одинарні. Далі, для побудови зображення використовується 15-градусне різняння Клербоута, реалізоване за кінцево-різницевою або спектрально-різницевою схемою. Ці схеми є умовно коректні, що доведено методами, розвиненими математиком Самарським. Досвід використання комплексу програм, складених за цим алгоритмом, показує, що крок продовження оптимально брати рівним половині кроку спостереження, і оптимальна глибина продовження має бути близько 60 точок глибини продовження. Тобто для зйомки 1 : 200 000 оптимальна глибина продовження – 60 км, для зйомки 1 : 100 000 – 30 км, 1 : 50 000 – 15 км, 1 : 20 000 – 6 км, 1 : 10 000 – 3 км.

Залишається питання, як практично з однієї кривої отримати в кожній точці спостереження цілу трасу. Найпростіший спосіб – розкласти криву на суму півкіл різної інтенсивності й різного радіуса. Однак за великої кількості джерел таке розкладання стає неоднозначним і нестійким, тобто некоректним за Адамаром. У реальності ж використовуються алгоритми, які будують тимчасову трасу пошарово в процесі продовження.

Отримані глибинні гравітаційні розрізи зіставляють із сейсмічними глибинними розрізами, якщо такі присутні, у вигляді накладок. На розрізах виділяють гравітаційні комплекси за знаком і конфігурацією аномалій і корелюють їх за розрахунковими профілями. У кожному комплексі через центри високоградієнтних зон проводять лінії, яким присвоюють назви горизонтів. Тектонічні порушення виділяють за сукупністю різноманітних ознак: за зсувом центрів аномалій у кожному комплексі, за появою інтенсивних аномалій, що обривають межі простежування. Стратиграфічна належність гравітаційних комплексів і горизонтів визначається на основі їхнього зіставлення з даними буріння (геофізичних досліджень свердловин (ГДС)) і з використанням даних усіх інших геолого-геофізичних методів. Ув'язку глибин стратиграфічних комплексів здійснюють за системою замкнених полігонів, утворених регулярно мережею розрахункових профілів. Значення глибин горизонтів на ув'язаних полігонах виносять на схему розташування профілів, де проводять ізогіпси і будують структурні карти рельєфу виділеного горизонту. Як правило, результати сейсмічних досліджень описують відбивну спроможність середовища, яка залежить не тільки від густини, але й від деформаційних характеристик і пружності (коефіцієнтів Ляме і Пуассона). Лінія зміни значень коефіцієнтів пружності за незмінної густини виділяється на сейсмічному розрізі у вигляді сейсмічної межі. На гравітаційних розрізах цей факт

може не виявлятися. Можлива також ситуація, коли збільшення або зменшення густини з глибиною відбувається поступово (рівномірно). У цьому випадку сейсмічні відбиття можуть і не існувати. Проте центри ущільнень і розуцільнень можна одержати за допомогою методики КЕКФ.

Під час побудови сейсмічних розрізів у глибинному масштабі, як відомо, істотне значення має точність визначення сейсмічних швидкостей. Використання ж не цілком точних швидкостей призводить до істотного викривлення просторового положення сейсмічних горизонтів і навіть до їхнього руйнування. Під час побудови гравітаційних розрізів швидкості не використовуються, хоча на результат продовження можуть впливати інші керуючі параметри системи обробки. Свої перешкоди існують і для методу геофізичної голографії. Ці завади, як показали тестові експерименти, спотворюють гравітаційні розрізи. Вони можуть призводити до викривлення форми аномалій, їхніх розмірів, рельєфу, інтенсивності і навіть, в окремих випадках, породжувати фіктивні помилкові аномалії, не обумовлені геологією середовища, хоча такі псевдоаномалії можуть, звичайно, бути і значно слабкішими за реальні. На сейсмічних розрізах, побудованих за допомогою методу спільної глибинної точки (СГТ), важко однозначно виділити малоамплітудні розломи, насуви й інші диз'юнктивні порушення. Гравітаційні розрізи несуть інформацію про такі об'єкти. Сейсмічні ж розрізи в основному несуть інформацію про просторове розташування відбивних горизонтів. Інформація про речовинний склад геологічних середовищ, отримана сейсмічними методами, не завжди достовірна. За відсутності достатньої кількості опорних свердловин у разі інтерпретації сейсмічних розрізів існує небезпека переходу з одного горизонту на інший. У деяких випадках (наявність соляних штоків, регіональних розломів, інтрузій, рифів і т. ін.) на сейсмічних розрізах можна спостерігати явища втрати кореляції опорного горизонту, тобто припинення простеження сейсмічних відбиттів на окремих ділянках розрізу. Іноді ці об'єкти можуть мати пошукове значення. На гравігеологічних розрізах такі об'єкти можуть проявлятися за своїми густинними властивостями, за якими можна спрогнозувати природу об'єкта (напр., інтенсивне розуцільнення може виявитися соляним штоком).

Недоліками більшості сейсмічних методів є також те, що вони мають обмеження на кути нахилу відбивних горизонтів, а для методу КЕКФ такого роду обмежень на кути нахилу поверхні гравітаційних джерел не існує. Крім того, найбільш сприятливою моделлю середовища для сейсмічних моделей відбитих хвиль є тонкошарувате та горизонтально-шарувате середовище з постійними фізичними властивостями в середині кожного шару. Одержати ж інформацію потенціальними методами за такої моделі середовища традиційно теоретично неможливо. Проте спільна інтерпретація всіх даних сейсмічних методів і методу КЕКФ з урахуванням даних буріння (ГДС) дає інформацію про геологічну будову середовища і фізичні властивості гірських порід, і таким чином створює основу для проведення геологічних реконструкцій. У багатьох випадках виділені об'єкти обома методами близькі за своїм положенням у просторі, за формою і за розмірами. Потрібно також мати на увазі, що необхідна довжина профіля (база профіля) для продовження потенціальних полів у нижній півпростір в разі застосування МЕКФ має бути більшою від глибини дослідження приблизно у п'ять разів.

Беручи до уваги, що фразу авторів програмного комплексу СИГМА 3D: "Можно предположить, что достаточно мощные толщи пород проявляются в аномальных полях множествами особых точек функций, их описывающих, причем эти множества имеют фрактальную структуру и допускают локализацию главных особенностей даже при больших глубинах залегания", можна доповнити припущенням, що ансамблі атомів та молекул геологічних об'єктів існують не в порожньому математичному просторі, а перебувають у фізичному середовищі пружного вакууму та взаємодіють з ним, а ми лише реєструємо цей інтегральний ефект у часі, і тому так важливо знайти такі моделі функціональних залежностей між параметрами математичного моделювання, які були б максимально наближеними до реально діючих моделей фізичних явищ, щоб не спотворювати зображення підземних структур.

Запропонований спосіб побудови голографічних зображень джерел гравітаційного поля у надрах Землі (Гейхман та Баньковський, 2018) пройшов апробацію на територіях Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) та її Північного борту, Рівнинного Криму, Західного Причорномор'я, Східного Казахстану, Західної Туркменії, Українських Карпат, а також на акваторіях Чорного та Азовського морів. Проведені дослідження дозволили зробити висновок, що застосування методу КЕКФ надає практичну можливість активного комплексування результатів інтерпретації даних гравіметричної зйомки з опорою на дані глибокого буріння (керн) та геофізичні дослідження свердловин (ГДС) з іншими геолого-геофізичними методами на рівні модельного зіставлення та доповнення, що дозволяє картувати в просторовому варіанті ущільнені та розуцільнені геологічні об'єкти як імовірні структури осадового чохла і кристалічного фундаменту, візуалізувати різновікові глибинні розломи і на цій підставі виділяти прогностичні об'єкти. Метод КЭКФ може застосовуватись незалежно від генезису родовищ корисних копалин. Основна умова застосування методу: контрастність фізичних властивостей геологічних об'єктів і висока точність вхідних даних.

Так, наприклад, проведений аналіз розрізів міграцій геофізичних полів за даними методу КЕКФ на території Карпат (рис. 1, 2) у межах матриці даних масштабу 1 : 200 000 (198 км x 198 км = 39 204 км²) за системою субмеридіональних і субширотних профілів із кроком 2 км показав, що в глибинному плані простежуються поверхні Мохоровичича та кристалічного фундаменту, розбиті на блоки різної глибини. Третій рівень – це рельєф поверхні Карпатського автохтону. У регіональному плані на підставі комплексної інтерпретації отриманих матеріалів за даними методу КЕКФ встановлено значну розширеність земної кори до глибини 70 км і присутність у розрізі значної кількості зон розуцільнень, частина з яких не протирічить даним сейсмокаротажу та швидкісним розрізам земної кори за даними ГСЗ в Україні та за кордоном (рис. 1, 2). Аналіз розрізів потенціальних полів свідчить про наявність на глибині структури, розташування якої якісно збігається із зоною відсутності "гранітного" шару та зоною геосинклінального трюгу за схемою глибинної будови літосфери рифтової структури за В. Б. Соллогубом і А. В. Чекуновим (Соллогуб и др., 1987). У процесі зіставлення глибинних розрізів потенціальних полів з даними сейсморозвідки (ГСЗ, КМЗХ і МСГТ) підтверджується можлива наявність ранньо-протерозойського трюга у верхній мантії, з яким можна ототожнити закартовану методом КЕКФ зону Тейссейре – Торнквіста на глибині 65–72 км на території робіт. Скидові порушення кристалічного фундаменту

практично контролюються зоною Тессейре – Торнквіста. Дослідженнями вздовж фрагмента гетраверса II в Українських Карпатах методом КЕКФ встановлено розріз

земної кори в блоках із шести-семимежевим розшаруванням кори до поверхні поділу Мохоровичича.

Рис. 1. Гравітаційний розріз з фрагменту геотраверса II за даними методу геофізичної голографії у зіставленні з даними ГСЗ

Рис. 2. Зіставлення швидкісного розрізу земної кори і верхньої мантії за даними до критичних відбитих хвиль у районі м. Карцаг (Угорщина) з даними методу геофізичної голографії за профілем 108 пк 10

Зіставлення цих даних орієнтовно і приведено для загального уявлення про складність глибинної будови. Необхідно врахувати також, що, як правило, сейсмічні швидкості в разі інтерпретації усереднюються і тоді швидкісна модель спрощується.

Аналіз проведених робіт у Карпатському регіоні показує, що не зважаючи на недосконалість методу і дрібномасштабність зйомок (а це впливає на результативність матеріалів, отриманих у результаті застосування геофізичної голографії з різними полями – гравітаційним, магнітним, температурним і теплопотоківим), глибинні розрізи в основному не суперечать результатам ГСЗ, за винятком того факту, що "контакт" між Східно- та Західноєвропейською платформами за даними ГСЗ є нахиленою, а за даними геофізичної голографії – субвертикальною зоною, що могло б свідчити про умовний поділ платформ.

Іншим прикладом застосування методики геофізичної голографії є Овруцький геодинамічний вузол, який

є епіцентром Волинської кільцевої структури (ВКС) овально-кільцевої форми із субширотною віссю до 300 км і субмеридіональною – також до 300 км. На думку Ю.П. Оровецкого, генетичною основою ВКС є Волинський мантійний діапир. ВКС представлений Овруцькою групою негативних структур (Овруцький палеорифт, Білокорівська і Вільчанська палеозападини). Центральну частину ВКС становить Коростенський плутон, що є складним магматичним комплексом і має субізометричну в плані форму загальною площею понад 12000 км². За методикою геофізичної голографії для підготовлених матриць даних гравіметричної та аеромагнітної (масштаб 1 : 200 000) зйомок, а також наявних даних з теплового потоку території Коростенського плутону та прилеглої Білорусі отримано голографічні розрізи відповідних полів у зіставленні з матеріалами глибинного сейсмічного зондування (Ільченко, 2002). На гравітаційному розрізі (рис. 3) простежується кореляція сейсмічних горизонтів з умовними горизонтами

градієнтних зон ущільнених і розущільнених порід як для верхньої частини розрізу, так і для верхньої мантиї – границі Мохоровичича, а також задовільна збіжність сейсмічних даних під час трасування хвилеводу знижених швидкостей із зонами розущільнення (негативних аномалій продовженого гравітаційного поля) та субвертикальних порушень як можливих зон флюїдомасоперенесення та магматичних розплавів. На інших отриманих розрізах виділяються у просторовому варіанті різноглибинні комплекси контрастних за фізичними властивостями гірських порід (ущільнені та розущільнені, намагнічені та розмагнічені, зменшеного або збільшеного теплового потоку), що дає можливість картувати їх як умовні горизонти або контактні поверхні геологічних структур у кристалічному фундаменті, трасувати різновікові глибинні тектонічні порушення як

можливі канали для міграції магматичних розплавів, рудних, флюїдних і вуглеводневих розчинів і на цій підставі локалізувати імовірні палеовулканічні споруди і прогнозувати різноманітні родовища корисних копалин, виділяти нафтогазоперспективні та флюїдопровідні зони. Необхідно врахувати також, що найбільша активність флюїдодинамічних процесів пов'язана з флюїдопровідними структурами в літосфері Землі, які формуються у вузлах перетину різномановних глибинних розломів – геодинамічних вузлах, а з огляду геосолітонної концепції дегазації водню і утворення родовищ вуглеводнів – яка тісно пов'язана з фізичними процесами і явищами дегазації Землі взагалі. Зазначене є теоретичною передумовою перспектив нафтогазогенерації Овруцького геодинамічного вузла.

Рис. 3. Гравітаційний розріз по фрагменту геотраверса Євробридж-97 за даними методу геофізичної голографії у зіставленні з даними ГСЗ (масштаб зйомки 1 : 200 000)

Згідно з думкою С.П. Іпатенка, утворення тріщинуватості у твердих, первинно непористих породах на великих глибинах передбачається новою тектонічною концепцією – тектонікою глобального рифтогенезу (ТГР), основою на припущенні про розширення Землі як космічного тіла. ТГР передбачає, що розширення Землі приводить до одностороннього перетворення океанічної кори в континентальну шляхом утворення склепіннеподібних блоків, розділених западинами океанів, внутрішніх і крайових морів, континентальних рифтів і глибоководних жолобів. У западинах багаторазово повторюється геосінклінальний процес і спочатку формується простоконтинентальна, а потім більш зріла континентальна кора. У ТГР формування склепіннеподібних структур є провідним геологічним процесом. Під склепіннянами накопичуються більш легкі гранітیزовані породи та флюїди. Вони нестійкі і розпадаються на частини по розломах, тріщинах і тріщинних зонах, які розходяться в глибину в бік мантиї. Так, на його думку, утворюються вертикальні й субвертикальні шарові й міжшарові тріщинні зони на великих глибинах у метаморфічних, магматичних та інших первинно непрониких породах.

Таким чином, як зазначають окремі дослідники, відсутність чітких уявлень про природу резервуарів у кристалічному фундаменті, їхню морфологію, особливості

розвитку та локалізації колекторів площею і в розрізі, а також відомі обмеження сейсмічних методів під час пошуків вуглеводнів у кристалічному фундаменті актуалізують необхідність розробки і впровадження нових альтернативних геофізичних методів пошуку резервуарів у кристалічних породах. Як зазначив акад. В.Б. Порфір'єв: "Нет достаточно обоснованных способов и методических решений для поисков в магматических породах геофизическими методами физических полей, которые отражали бы реальные зоны или участки развития трещиноватости (пустотности), благоприятные для аккумуляции углеводородов".

Для демонстрації можливостей і працездатності технології геофізичної голографії на предмет виявлення глибинних структур у кристалічному фундаменті нами взято родовище Білий Тигр (Whitetiger або Бак Хо) на шельфі Південно-В'єтнамського моря, яке приурочено до горстоподібного батоліту, що складається із трьох блоків – Північного, Центрального та Південного. На рис. 4 ми даємо розрізи за профілем II, отримані за дво-хвилинними даними (Bonvalot et al., 2012; Maus et al., 2007) з використанням квадратних матриць аномалій Фая гравітаційного поля та магнітного поля на висоті 5 км і даних батиметрії на майданчику розміром

9,9 км x 9,9 км. Незважаючи на дрібномасштабність геофізичних полів, накладені контури геологічного розрізу непогано вписуються в деталі продовжених полів

аж до траєкторій свердловин (пунктири), що підкоряються тектонічним порушенням.

Рис. 4. Розрізи вертикальних похідних аномалій Фая (ліворуч) та магнітного поля з висоти 5 км (праворуч) з використанням двохвилинних даних по родовищу Білий Тигр у гранітах (В'єтнам)

Висновки

1. Створено систему обробки та інтерпретації гравітаційного та інших потенціальних полів за даними методу геофізичної голографії, яка включає комплекс комп'ютерних програм і методику аналізу отриманих результатів, що дозволяє побудувати найбільш вірогідну модель глибинної будови геологічного середовища за доступним комплексом геолого-геофізичних даних;

2. Пропонований спосіб побудови голографічних зображень джерел гравітаційного поля в надрах Землі застосовувався для виконання договірних і науково-дослідних робіт у державних геологічних підприємствах "Укргеофізика" (КГРЕ), "Геопрогноз", "Геоінформ", УкрДГРІ під час регіональних і середньомасштабних досліджень глибинної будови територій нафтогазоносних басейнів у процесі пошуків родовищ нафти і газу, а також в Інституті геологічних наук НАН України, адаптованого для роботи в умовах Українського щита;

3. Техніко-економічний ефект під час пошуків різноманітних родовищ корисних копалин, у тому числі нафти і газу для будь-якого регіону Землі та Світового океану, за умови виконання сучасних експресних гравіметричних наземних, аеро- або наявних супутникових зйомок може бути реалізованим за рахунок зменшення трудомістких затрат на буріння порожніх свердловин і скорочення витрат на сейсмозрозвідку на етапах пошуків, розвідки та експлуатації родовищ корисних копалин і загалом дозволить знизити собівартість геологорозвідувальних робіт.

Список використаних джерел

- Баранов, В. (1980). Потенциальные поля и их трансформации в прикладной геофизике. Москва : Недра.
- Гейхман, А. М., Баньковский, М. В. (2018). Спосіб побудови голографічних зображень джерел гравітаційного поля в надрах Землі. *Патент на корисну модель № 12547*. Власник Інститут геологічних наук НАН України, Київ, 1-10.
- Ильченко, Т. В. (2002). Результат исследований методом ГСЗ геотрансекта EUROBRIDGE-97. *Геофиз. журнал*, 3, 36–50.
- Клаербоут, Д. Ф. (1989). Сейсмическое изображение недр. Москва : Недра.
- Сигалов, Я. Б., Андрашко, М. И. (1985). К решению задач аналитического продолжения потенциальных полей. Деп. в УкрНИИИТИ 27.03.85, № 623 УК-85д., Киев, 1–32.
- Соллогуб, В. Б., Чекунов, А. В., Литвиненко, И. В., Калужная, Л. Т. (1987). Литосфера центральной и восточной Европы: Геотраверсы I, II, V. Киев : Наукова думка.
- Bonvalot, S., Balmino, G., Brais, A. (2012). WGM2012_Bouger_ponc_2min.
- Maus, S., Sazonova, T., Hemant, K., Fairhead, J. D., Ravat, D. (2007). WDMAM_NGDC_V1.1.

References

- Baranov, V. (1980). Potencialnye polya i ih transformacii v prikladnoi geofizike. Moskva : Nyedra. [in Russian]
- Bonvalot, S., Balmino, G., Brais, A. (2012). WGM2012_Bouger_ponc_2min.
- Geikhan, A.M., Bankovskiy, M.V. (2018). Sposib pobudovy golografichnyh zobrazen dzherel gravitaciynogo polya v nadrah Zemli. *Patent na korysnu model № 12547*. Vlasnyk Instytut geologichnyh nauk NAN Ukrainy, Kyiv, 1–10. [in Ukrainian]
- Ilchenko, T.V. (2002). Rezultat issledovaniy myetodom GSZ geotransekta EUROBRIDGE-97. *Geophys. Journal*, 3, 36–50.
- Maus, S., Sazonova, T., Hemant, K., Fairhead, J. D., Ravat, D. (2007). WDMAM_NGDC_V1.1.
- Sollogub, V.B., Chekunov, A.V., Litinenko, I.V., Kaluzhnaya, L.T. (1987). Litosphera centralnoi i vostochnoi Evropy: Geotraversy I, II, V. Kiev : Naukova dumka, 30–38. [in Russian]

Надійшла до редколегії 14.06.21

M. Bankovskyi, PhD (Geol.),
E-mail: mishbank@gmail.com;
A. Geikhman, PhD (Phys.-Math.),
E-mail: anatoigeykhman@gmail.com;
I. Potapchuk, PhD (Geol.-Min.),
Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine,
55, b, O. Honchara Str., Kyiv, 01601, Ukraine

APPLICATION OF THE WAVE METHOD CONTINUATION OF POTENTIAL FIELDS IN THE LOWER HALF AREA TO STUDY THE DEEP STRUCTURE OF THE EARTH AND SEARCH FOR MINERAL DEPOSITS

The paper considers a methodology for studying the deep structure of the Earth and searching for mineral deposits, primarily oil and gas, based on wave (holographic) transformation of the data of gravitational, magnetic and geothermal fields into a spatial 3D model of these fields in combination with geological and seismic studies. The paper presents the physical principles on which the theory of the method is based and describes the methodology and software package that implements the method. The examples of the application of the holographic method for studying the deep structure of the Earth, tracing faults and searching for minerals the prospects for applying this approach are shown.

The practical significance of the work lies in the fact that the proposed method, if desired, can be successfully used both for studying the deep structure of the Earth and for searching for various mineral deposits.

Keywords: geophysical holography, gravity and magnetic prospecting, anomalies of gravitational, magnetic and geothermal fields, complex interpretation of geological and geophysical materials.

М. Баньковский, канд. геол. наук,
E-mail: mishbank@gmail.com;
А. Гейхман, канд. физ.-мат. наук,
E-mail: anatoigeykhman@gmail.com;
И. Потапчук, канд. геол.-минерал. наук;
Институт геологических наук НАН Украины, ул. О. Гончара, 55-б, г. Киев 54, 01601, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛНОВОГО МЕТОДА ПРОДОЛЖЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ В НИЖНЕЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВО ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ЗЕМЛИ И ПОИСКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Рассматривается методика исследования глубинного строения Земли и поиска месторождений полезных ископаемых, в первую очередь нефти и газа, на основе волнового (голографического) преобразования данных гравитационного, магнитного и геотермического полей в пространственную 3-D модель этих полей в комплексе с геологическими и сейсмическими исследованиями. Приведены физические принципы, на которых базируется теория метода, и описаны методика и программный комплекс, реализующий метод. Приведены примеры применения голографического метода для изучения глубинного строения Земли, трассировки разрывных нарушений и поиска полезных ископаемых. Показаны перспективы применения данного подхода.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенная методика при желании может быть успешно использована как для изучения глубинного строения Земли, так и для поисков различных месторождений полезных ископаемых.

Ключевые слова: геофизическая голография, грави- и магниторазведка, аномалии гравитационного, магнитного и геотермического полей, комплексная интерпретация геолого-геофизических материалов.