

Технології інтерпретації геофізичних даних при дослідженні та розвідці нафтогазових родовищ

*Т. А. Міхєєва, О. П. Лапіна, Т. М. Кишман-Лаванова,
Т. І. Причепій, 2022*

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Надійшла 16 серпня 2022 р.

У статті наведено результати наукових досліджень зі створення комп'ютерної технології інтерпретації даних геофізичних полів при розвідці нафтогазових родовищ України. Розроблено теоретичні, інформаційні, технологічні і методичні основи для підвищення ефективності геологорозвідувальних робіт у результаті поглибленого вилучення інформації з геолого-геофізичних даних на підставі їх комплексної інтерпретації у межах нових математичних моделей. Тривимірне гравітаційне та магнітометричне моделювання може бути спрямоване на виявлення зон розуцілення і на трасування тектонічних порушень у консолідованій корі, без яких неможливе існування каналів транспортування вуглеводнів. Описано практичне застосування прикладів кількісної інтерпретації даних трикомпонентного магнітного знімання, що істотно сприяє виявленню і локалізації покладів вуглеводнів. Розвинуто і розширено програмний комплекс інтерпретації магнітотелуричних даних на підставі використання граничних умов імпедансного типу. Методика призначена для візуалізації даних МТЗ на етапі якісної інтерпретації паралельно з методом тензора імпедансу і векторів Візе. Безумовною перевагою такого підходу є незалежність від умови плоскої падаючої хвилі і використання всіх шести компонент електромагнітного поля (зокрема Z-компоненти електричної складової МТ-поля). Комплексування статистичних і детерміністичних методів при інверсії геофізичних даних дає можливість підвищити достовірність одержуваних геологічних результатів. Актуальність і важливість результатів, наведених у статті, визначається концептуальною новизною методів і засобів для прогнозування нових перспективних ділянок, а також переоцінювання запасів відомих родовищ.

Ключові слова: гравітаційне поле, магнітне поле, електромагнітне поле, аналітична апроксимація, якісна і кількісна інтерпретація, обернена задача, нафтогазові родовища, уявний вектор, скалярний імпеданс.

Вступ. Прогнозування та пошуки глибокозалягаючих нафтогазоносних структур за неузгодженої будови різних поверхів осадової товщі здійснюються геофізичними методами. Провідним методом для виконання цього завдання є сейсмозвідка. Тривалий час несейсмічні методи (гравірозвідка, магніторозвідка, електророзвідка) були мало задіяні при розв'язанні задач нафтогазової геології. Сучасні вимірювальні комплекси, системи супутникової навігації, з одного боку, і програмні комплекси для обробки та інтерпретації результатів польових вимірювань — з іншого, знімають ці обмеження, що дає змогу викорис-

товувати згадані методи для побудови та аналізу складних тривимірних геологічних моделей в комплексі із сейсмозвідкою. В останні роки несейсмічні методи все частіше застосовують для оцінювання перспектив нафтогазоносності. Встановлено, що відносно невеликі додаткові витрати під час проведення досліджень комплексом геофізичних методів дають змогу істотно зменшити геологічні ризики нафтогазових проєктів і підвищити результативність геологорозвідувальних робіт.

Світовий досвід показує, що більшість антиклінальних структур, рифів та інших пасток цілком впевнено фіксуються сучас-

ною гравіроздаючою за допомогою знімачів масштабів 1 : 25 000 і 1 : 50 000. За даними гравітаційного і магнітного полів можна отримати інформацію про поверхню кристалічного фундаменту і потужність осадової товщі і тим самим прогнозувати загальні перспективи нафтогазоносності досліджуваних територій. У результаті вивчення блокової будови фундаменту виявляють нафтогазоперспективні пастки в нижніх горизонтах осадової товщі, а також структури і поклади, що знаходяться у відкладах, які залягають вище. Трасування успадкованих диз'юнктивних порушень в осадовій товщі дає змогу робити висновки щодо шляхів міграції вуглеводнів і оцінювати перспективу нафтогазоносності над окремими блоками.

Про виявлення зв'язку нафтогазових родовищ з глибинними розломами в межах нафтогазоносних областей та провінцій викладено у публікаціях І.І. Чебаненка, В.А. Краюшкіна, В.К. Гавриша, В.П. Клочка, О.Ю. Лукіна, І.А. Майдановича, А.Я. Радзівілла та ін. Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України є провідною організацією щодо картування глибинних розломів, розробки моделей структурно-генетичного зв'язку нафтогазоносності кори з її глибинною геофізичною неоднорідністю, механізму такого зв'язку та ін. [Орлюк, Пашкевич, 2011; Старостенко и др., 2012, 2014; Тектоника ..., 2015].

Обґрунтування створення комп'ютерної технології. У складних сейсмогеологічних умовах важко визначити динамічні характеристики колекторських властивостей гірських порід і флюїдонасиченість. Альтернативою сейсмічним параметрам є геоелектричні, одержувані за даними методу магнітотелуричних зондувань (МТЗ). Результати МТЗ, отримані на нафтоперспективних площах, можуть бути істотним доповненням до даних сейсмозондування.

Розглянемо узагальнену модель основних покладів нафти і газу різного типу в нафтогазоносних басейнах, які пройшли рифтову стадію розвитку (Дніпровсько-Донецький, Карпатський). Формування пасток тут визначається сукупністю перетинних поздовж-

ніх і поперечних розломів, що утворюють складну систему горстових і моноклінальних блоків, грабенів та інших форм [Дворянин та ін., 1996]. З моноклінальними блоками можуть бути пов'язані тектонічно і стратиграфічно екрановані поклади. Над ними або на їхніх схилах можливі поклади літологічного типу, пов'язані з лінзами пісковиків, а також з рифогенними і карбонатними утвореннями. Ще вище за розрізом над блоками фундаменту розміщуються пастки і, відповідно, поклади антиклінального типу. Значні перспективи має пошук глибинних пасток вуглеводнів, пов'язаних з насувними дислокаціями. Над породами фундаменту дорифтового і в нижній частині рифтового комплексів можлива наявність соленосних відкладів. Із соляними структурами можуть бути пов'язані поклади нафти і газу як антиклінального, так і неантиклінального типу. Вище соленосних відкладів, у верхній частині рифтового і післярифтового комплексів, не пов'язаних з впливом розломно-блокової тектоніки, поширені пастки і поклади антиклінального типу. Становить інтерес питання пошуку покладів неантиклінального типу, підсолевих, а також глибокозалягаючих (більш як 2—3 км) покладів, безпосередньо пов'язаних з особливостями будови фундаменту.

Слід зазначити, що родовища у Львівсько-Волинському басейні і Дніпровсько-Донецькій западині переважно зрілі і перебувають на стадії падіння видобутку. Рівень виснаження сягає 85 %, але потенціал вуглеводнів в Україні досить високий.

Використання сучасних комп'ютерних технологій дає змогу значно збільшити ресурсну базу нафти і газу України. Важливу роль у вирішенні цього завдання відіграють несейсмічні методи вивчення надр і розширення фундаментальних наукових досліджень у сфері інтерпретації геофізичних даних.

Отримання наукових результатів і великий досвід у розробці програмно-алгоритмічного забезпечення методів інтерпретації геофізичних даних дають можливість вирішувати актуальні завдання нафтогазової геології. Комплексування методів інтерпре-

тації гравітаційних і магнітних аномалій ґрунтується на аналітичній апроксимації дискретно заданих значень поля аномальними ефектами систем еквівалентних джерел. Крім традиційного функціонально-аналітичного підходу використовують імовірісно-статистичний підхід, будують високоточні карти геопотенціальних полів, що відображають розподіл геощільнісних (геомагнітних) неоднорідностей. Для інтерпретації магніотелуричних даних застосовують методику візуалізації даних МТЗ на підставі використання граничних умов імпердансного типу.

Теоретичні основи використаних алгоритмів у технології інтерпретації геофізичних даних. Моделювання геологічних тіл і структур на основі розв'язання обернених задач гравірозвідки і магніто-розвідки методом автоматизованого підбору джерел поля. Для розв'язання оберненої задачі магнітометрії та гравіметрії успішно застосовують ітераційний метод автоматизованого підбору. Використовувані апроксимаційні конструкції надають інтерпретатору широкі можливості для моделювання об'єктів складної форми. Реальні геологічні середовища неможливо точно описати у межах ідеалізованих математичних моделей. Для вирішення завдань, пов'язаних з моделюванням покладів та родовищ нафти і газу, важливо застосовувати комп'ютерні технології моделювання, які здатні максимально близько описувати складне геологічне середовище і при цьому характеризуватися високою динамічністю і малою параметричністю. За їх допомогою досить зручно параметризувати збурюючі джерела зі складним розподілом фізичних властивостей, а також реалізувати стратегію підбору з послідовним ускладненням моделі, виконуючи перехід від простих апроксимаційних комірок до складніших.

Як апроксимаційні конструкції використовували різні класи тіл — фундаментальні форми для інтерпретації (однорозв'язний контур, зоряне тіло, тривимірний матеріальний стрижень, контактні поверхні, а також сингулярні комірки), які застосовували як апроксимаційні елементи з метою опису гео-

логічних об'єктів при інтерпретації спостережених аномалій. Запропонована комп'ютерна технологія дає можливість реалізувати спільний підбір параметрів апроксимаційної конструкції за компонентами як гравітаційного поля Δg , так і магнітного $\Delta Z(\Delta T)$ одночасно, а також за кожною з них окремо.

У комп'ютерній технології для параметризації джерел гравітаційних і магнітних аномалій користувач одночасно може задіяти кілька модифікацій елементарних апроксимаційних комірок. Зоряне тіло описується послідовністю параметрів:

$$P1 = \left\{ \sigma, I_x, I_y, I_z; y_1, y_2; x_0, z_0; m_i; R_0, A_1, B_1, \dots, A_N, B_N \right\},$$

де σ — надлишкова щільність; I_x, I_y, I_z — складові вектора інтенсивності намагнічування; y_1, y_2 — координати тіла за простяганням; x_0, z_0 — координати центра тяжіння зіркового тіла; m_i — розмірність радіуса-вектора, що описує контур зіркового тіла (кількість точок на контурі); R_0 — початкове значення радіуса-вектора; A_N, B_N — коефіцієнти членів апроксимаційного ряду; N — кількість членів тригонометричного ряду. В цій технології апроксимації компоненти радіуса-вектора визначаються виразом

$$R(\varphi_i) = R_0 + \sum_{j=1}^N A_j \cos j\varphi_j + B_j \sin j\varphi_j.$$

Для тривимірного моделювання на значних площах застосовують матеріальні стрижні, що визначаються послідовністю параметрів:

$$P = \left\{ m, (c_x, c_y, h)_j; (2t_x, 2t_y, 2t_z)_j; (\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z)_j; (I_x, I_y, I_z)_j \right\},$$

$$j = 1, 2, \dots, m,$$

де m — кількість елементарних тіл, (c_x, c_y, h) — центри тяжіння тіл, $(2t_x, 2t_y, 2t_z)$ — довжини стрижнів; $(\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z)$ — надлишко-

ві щільності тіл; (I_x, I_y, I_z) — складові вектора інтенсивності намагніченості стрижневих мас. Вибір даних модельних класів обґрунтовано у публікаціях [Булах, Шиншин, 2000; Корчагин и др., 2004; Булах, Лапина, 2008; Михеева и др., 2018]. Адаптація технології апроксимації зіркових тіл контурами складної конфігурації значно розширює і функціональні можливості самого програмного комплексу, оскільки дає можливість реалізувати багатокрокові стратегії підбору при моделюванні практичних аномальних об'єктів. Наступні варіанти багатокрокових стратегій автоматизованого підбору можуть бути реалізовані в три етапи. На першому кроці інтерпретаційного процесу виконується автоматизований підбір джерел аномалій шляхом їх апроксимації багатокутними контурами невеликої розмірності (прямокутного або трапецієподібного перерізу). Після оптимізації джерел аномалій на цьому кроці отримані оптимізовані конфігурації апроксимують з використанням розробленої технології опису зіркових тіл. На цьому етапі обчислюють оптимальні значення радіуса-вектора, кількість членів усіченого тригонометричного ряду, початкові значення коефіцієнтів ряду. І нарешті, на останньому, третьому, кроці здійснюється автоматизований підбір оптимальних значень, отриманих у результаті виконаного переходу параметрів, що визначають складні конфігурації аномальних джерел. Модифікована апроксимаційна конструкція надає інтерпретатору широкі можливості при моделюванні об'єктів складної форми. З одного боку, за її допомогою доволі зручно параметризувати джерела зі складним розподілом фізичних властивостей. З іншого боку, вона дає змогу користувачеві легко реалізувати стратегію підбору з подальшим ускладненням моделі, переходячи від використання простих апроксимаційних елементів до складніших.

Удосконалення методів трансформації гравітаційних і магнітних аномалій, що ґрунтуються на аналітичній апроксимації дискретно заданих значень поля аномальними ефектами систем еквівалентних джерел. При інтерпретації аномальних

полів іноді зручніше використовувати значення не самого спостереженого поля, а деяких його трансформант. Для опису чисельно заданих спостережених аномальних полів використовують аналітичні вирази, за якими можна обчислювати похідні вищих порядків та застосовувати їх під час дослідження локальних об'єктів, вивчення щільнісного розрізу, пошуків родовищ нафти та газу, рудних і нерудних корисних копалин. Функції-трансформанти можна використовувати для підсилення одних аномалій та послаблення інших. Локальні аномалії виділяють за допомогою використання другої похідної та похідних вищих порядків аномальних гравітаційного та магнітного полів. При цьому вертикальні похідні забезпечують локалізацію верхньої межі збурюючих об'єктів, а горизонтальні похідні — локалізацію їх бокових меж та контактів. Розроблене програмне забезпечення використовували для інтерпретації практичних даних на ділянках Алуштинсько-Батумської аномальної зони в акваторії Чорного моря, Тургайської нафтогазоносної області Республіки Казахстан [Маркова, Лапина, 2013, 2014; Лапина и др., 2016; Михеева и др., 2018]. На рис. 1 показано карту аномалії сили тяжіння в редукції Буге на ділянці досліджень розміром 40×45 км. У результаті розв'язання тривимірної оберненої задачі гравіметрії отримано результати, на підставі яких побудовано карту ізодинам теоретичного поля (рис. 2).

Детальність і точність розв'язку задач залежить від складності геологічного розрізу. За спостереженими даними високої точності можна обчислити похідні вищих порядків, що дає можливість виключити вплив близько розташованих до земної поверхні щільнісних неоднорідностей.

Вищі похідні гравітаційного та магнітного потенціалу використовують на основі математичної моделі, представленій тривимірними матеріальними стрижнями. З огляду на підібрані параметри моделі визначають

похідні вищих порядків: $\frac{\partial T_z}{\partial z}$, $\frac{\partial^2 T_z}{\partial^2 z}$, $\frac{\partial^3 T_z}{\partial^3 z}$, $\frac{\partial^3 T_z}{\partial x \partial y \partial z}$, $\frac{\partial^2 T_z}{\partial z \partial x}$, $\frac{\partial^3 T_z}{\partial z \partial^2 x}$, $\frac{\partial^2 T_z}{\partial z \partial y}$, $\frac{\partial^3 T_z}{\partial z \partial^2 y}$ та

інші, що дає змогу виявити положення центрів тяжіння аномалієзбурюючих об'єктів, виділити близько розміщені за простяганням об'єкти, а також невеликі та неглибоко залягаючі тіла стосовно більших та глибше розташованих збурюючих мас. На рис. 3 показано карти ізоліній похідних ви-

щих порядків: $\frac{\partial T_z}{\partial z}$, $\frac{\partial^2 T_z}{\partial^2 z}$, $\frac{\partial^3 T_z}{\partial^3 z}$, $\frac{\partial^3 T_z}{\partial z \partial^2 x}$.

Для виділення локальних аномалій використано другу похідну. На графіках вертикальних похідних чітко виділяються верхні межі збурюючих об'єктів, на карті ізоліній

другої похідної $\frac{\partial^2 T_z}{\partial^2 z}$ простежується чітке

розділення аномалій, зумовлених близько розміщеними об'єктами. На побудованих

картах похідних $\frac{\partial^3 T_z}{\partial^3 z}$ і $\frac{\partial^3 T_z}{\partial z \partial^2 x}$ (рис. 3, в, г)

відображені як приповерхневі, так і глибинні джерела. Достатньо чітко зафіксовано межі окремих об'єктів, що залягають глибше. На підставі візуального аналізу набору трансформант трасуються прогнозовані контури аномалієзбурюючих об'єктів у плані, виділяються джерела поля приповерхневого та глибинного походження. Побудова високоточних карт-трансформант геопотенціальних полів, що відображають розподіл геощільнісних (геомагнітних) неоднорідностей у плані і на глибині, забезпечує вирішення завдань структурно-тектонічного і нафтогазогеологічного районування територій.

Комплексування статистичних і детерміністичних методів інверсії геофізичних даних. Крім традиційного функціонально-аналітичного підходу пропонується використовувати ймовірно-статистичний: визначення апостеріорного розподілу щільності ймовірності цільової функції. При комплексуванні статистичних і детерміністичних методів інверсії геофізичних даних можна істотно підвищити достовірність одержуваних геологічних результатів. Базовим модельним класом у такому випадку є контактні поверхні — субгоризонтальні межі

поділу гірських порід з різними петрофізичними характеристиками. Цей модельний клас успішно використовують при апроксимації геологічних меж в осадових басейнах нафтогазоносних областей.

Перспективи нафтогазоносності слід пов'язувати з відносно високоамплітудними перепадами значень сили поля тяжіння, оскільки гравітаційне поле в місцях залягання вуглеводнів характеризується локальними мінімумами. Як відомо, поклади вуглеводнів часто тяжіють до антиклінальних утворень з хорошими колекторськими властивостями. Колектори промислового значення мають шарувату текстуру. Здебільшого родовища вуглеводнів складаються з декількох покладів, що розміщуються один над одним, утворюючи вертикальний стовп пластових порід підвищеної газоносності, сумарний гравітаційний ефект якого в разі коливань пластового тиску може бути доволі великим. Особливістю таких пластових родовищ є лінзоподібні форми, обмеженість зверху та знизу непроникними породами та значна їх довжина. Для моделювання таких складних геологічних середовищ доцільно використовувати клас контактних поверхонь. Добре відомі класичні праці, в яких доведено єдиність розв'язку оберненої задачі в цьому класі для різних постановок [Кобрунов, 1988; Старостенко и др., 1992]. Апроксимаційна конструкція для класу контактних поверхонь, що відповідає вимогам малопараметричності та динамічності, детально описана в статті [Булах, Кишман-Лаванова, 2006].

Обернені задачі гравіметрії зазвичай розглядають у детерміністичній постановці, і алгоритми розв'язання спрямовані передусім на формулювання умов коректної постановки задачі шляхом введення апріорних обмежень та ін., а також підвищення ефективності мінімізації цільової функції і статистичне оцінювання рівня похибок вимірювань поля. При цьому далеко не завжди враховується ймовірнісний характер частини апріорних даних, часто область досліджуваного параметричного простору обмежена властивостями цільової функції, а критерій вибору оптимального розв'язку із мно-

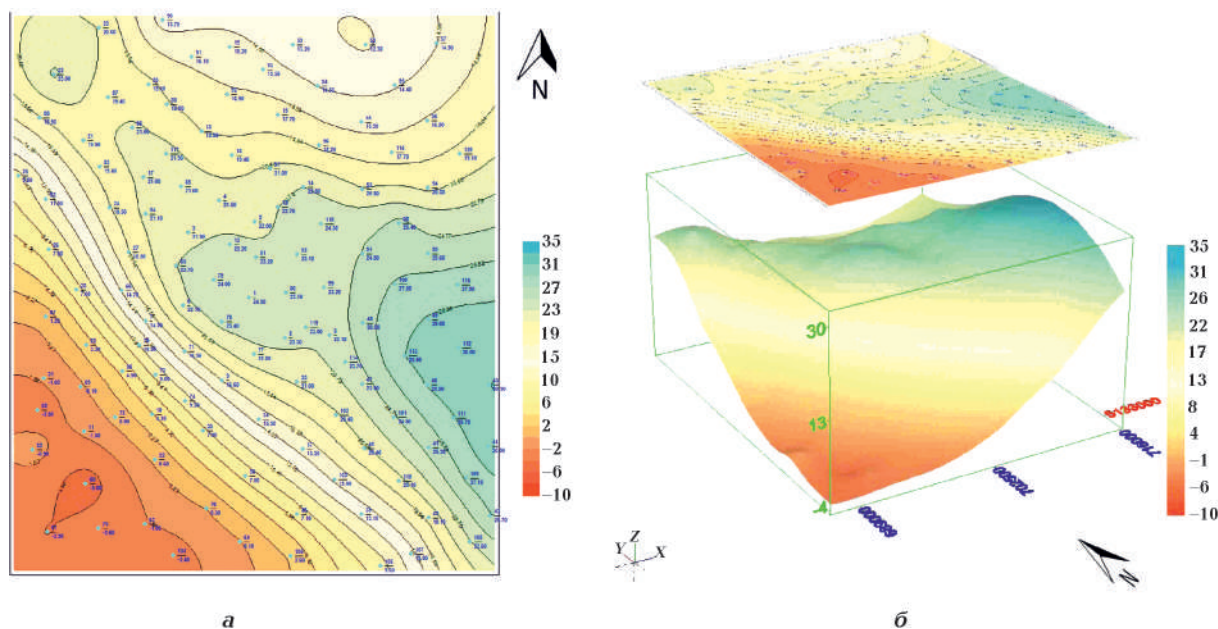


Рис. 1. Ділянка району досліджень Тургайської нафтогазоносної області Республіки Казахстан: *a* — карта-схема спостережуваного гравітаційного поля в редуції Буге, мГал, і розташування точок спостереження; *б* — 3D проєкція спостережуваного гравітаційного поля в редуції Буге, мГал.

Fig. 1. The area of the research area of the Turgai oil-and-gas-bearing region of the Republic of Kazakhstan: *a* — map-scheme of the observed gravity field in Bougue reduction, mGal and the location of observation points; *б* — 3D projection of the observed gravitational field in the Bougue reduction, mGal.

жини можливих при цьому не прив'язаний до ймовірнісних властивостей похибок.

Статистичний підхід доволі успішно використовується в сейсмічних обернених задачах. Добре відомі статті [Sambridge, 1999; Kozlovskaya, 2000] є тому підтвердженням.

Імовірнісний підхід до оберненої задачі визначає апіорну інформацію про модель за допомогою функції щільності ймовірності. Завдання полягає у пошуку апостеріорі щільності ймовірності розподілу вектора $p(\mathbf{d})$ модельних параметрів \mathbf{m} з огляду на спостережені дані, теоретичний взаємозв'язок між модельними параметрами і спостереженим полем, а також на апіорну інформацію [Tarantola, Valette, 1982]:

$$p(\mathbf{d}) = k p(\mathbf{m}) L(\mathbf{m}),$$

де k — відповідна нормалізуюча константа; $p(\mathbf{m})$ — щільність ймовірності апіорного модельного розподілу; $L(\mathbf{m})$ — функціонал, який порівнює відповідність між спостереженими та теоретичними даними.

На практиці в більшості геофізичних екс-

периментів вважають, що обидві апіорні та апостеріорні щільності розподілу є гаусовими. За цих припущень задача зводиться до мінімізації цільової функції [Kozlovskaya, 2000] вигляду

$$L(\mathbf{m}) = [g(\mathbf{m}) - \mathbf{d}_{\text{obs}}]^T C_D^{-1} [g(\mathbf{m}) - \mathbf{d}_{\text{obs}}] + (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)^T C_M^{-1} (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0),$$

де \mathbf{m}_0 — апіорна модель; $g(\mathbf{m})$ і \mathbf{d}_{obs} — теоретичні та спостережені дані аномального поля відповідно; C_M і C_D — коваріаційні матриці моделі і спостережених даних відповідно.

Модельний простір зазвичай багатовимірний, тому і відповідний апіорний розподіл зазвичай є доволі складним. У цій ситуації неймовірна апіорна інформація може бути описана способом, більш ефективним, ніж за допомогою функції щільності розподілу, а саме за допомогою нечітких множин. Ступінь відповідності елемен-

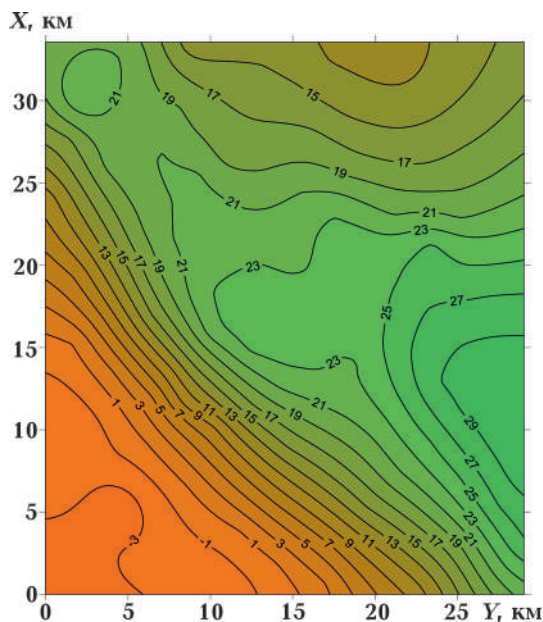


Рис. 2. Теоретичне поле, отримане в результаті розв'язання тривимірної оберненої задачі гравірозвідки.

Fig. 2. The theoretical field obtained as a result of solving the three-dimensional inverse problem of gravity prospecting.

та деякій множині в умовах невизначеності характеризує функція належності. Важлива перевага в тому, що основні операції нечітких множин забезпечують досить зручне поєднання чітких і нечітких обмежень на модельні параметри. Однак необхідно пам'ятати, що функція належності не може бути використана замість апіорної функції розподілу щільності у класичному формулюванні оберненої задачі, оскільки вони не тільки виражають два різні типи невизначеної інформації, а й також відповідають різним типам невизначеності, які мають задовольняти різні аксіоми. Для того щоб комбінувати різні типи невизначеності в одній схемі інверсії, необхідно змінити формулювання оберненої задачі [Kozlovskaya, 2000]. Розв'язання оберненої задачі гравіметрії на підставі такого формулювання наведено у статтях [Кишман-Лаванова, 2015, 2020].

Неймовірніший підхід передбачає перетворення традиційної одноцільової геофізичної задачі на багатоцільову задачу оптимізації з двома цільовими функціями:

$$\mathbf{F}(\mathbf{m}) = (F_1(\mathbf{m}), F_2(\mathbf{m})),$$

де $F_1(\mathbf{m}) = p(\mathbf{d}_{\text{obs}} | \mathbf{m})$ — функція щільності умовної ймовірності даних; $F_2(\mathbf{m}) = \mu_M(\mathbf{m})$ — функція належності нечіткої множини можливих розв'язків. Для ефективного пошуку в багатовимірному параметричному просторі використовується підхід, запропонований М. Самбріджем [Sambridge, 1999], — алгоритм околів, тобто апроксимація параметричного простору діаграмами Вороного. Діаграми Вороного доцільно використовувати в алгоритмах глобальної оптимізації для зменшення кількості обчислень прямої задачі та для збільшення роздільної здатності області дослідження. Обчислення прямої задачі замінюється пошуком найближчого елемента діаграми Вороного. У такому випадку розподіл Вороного використовується для визначення зони пошуку парето-оптимальних точок [Kozlovskaya, 2000]. Якість розв'язку оцінюється двома значеннями: а) умовною функцією щільності спостережених даних, яка показує, наскільки розв'язок задовольняє спостережені дані; б) функцією належності нечіткої множини можливих розв'язків, яка показує, наскільки модель узгоджується з апіорною інформацією.

Отже, поєднання детерміністичного та статистичного підходів для інверсії гравіметричних даних в умовах невизначеності різномірної апіорної інформації розширює можливості обернених задач при пошуках вуглеводнів. У межах імовірнісного підходу апіорний розподіл модельних параметрів описується за допомогою нечітких множин. Ця пропозиція заснована на тому факті, що апіорна інформація часто пов'язана з невизначеністю більшою мірою неімовірнісного походження. Детерміністичний підхід використовують при обчисленні поля від заданого розподілу модельних параметрів, а також для формалізації апіорної інформації за допомогою природних обмежень, незалежного оцінювання надлишкової маси джерел аномалії, обмеження максимально допустимих перевищень густин та ін.

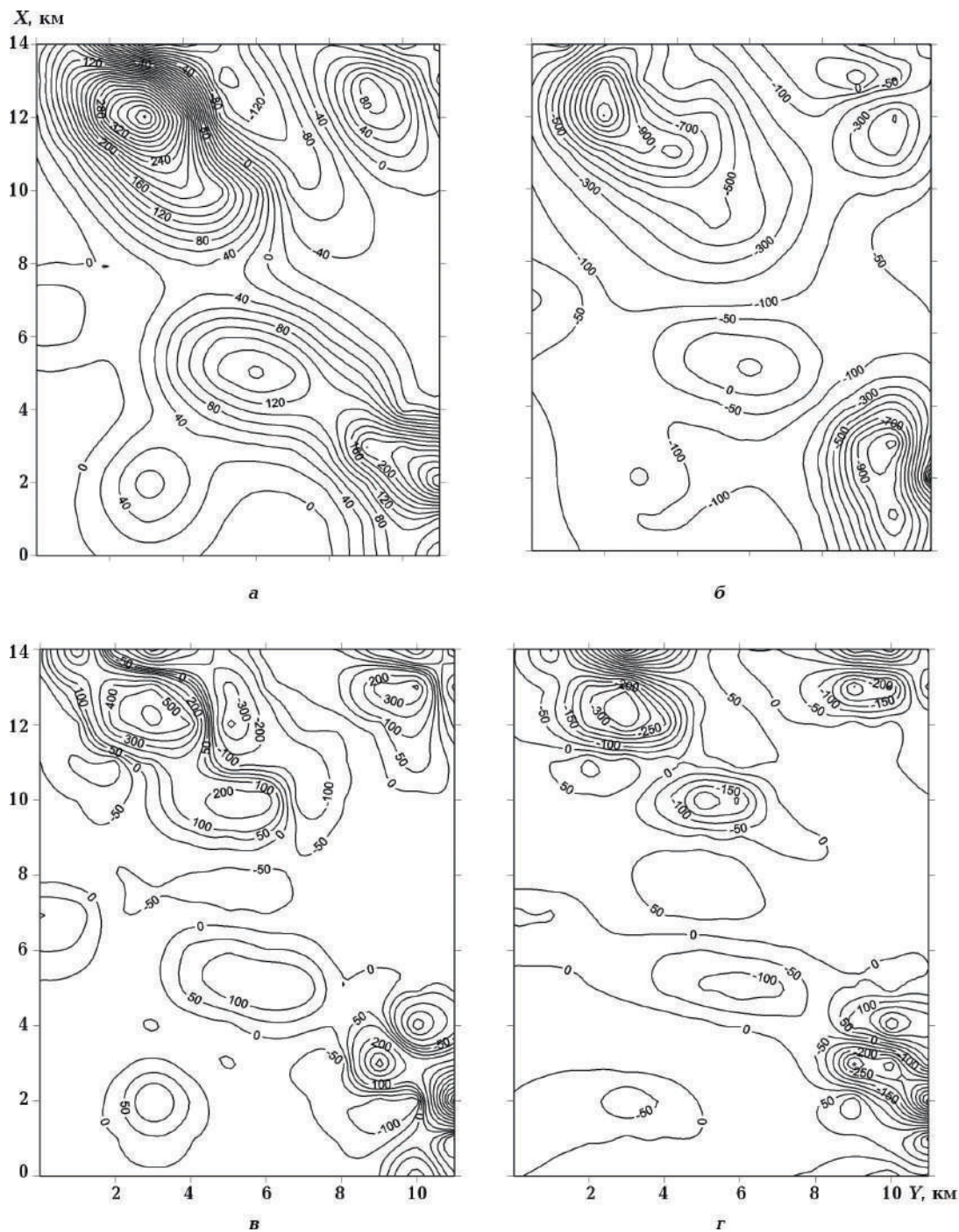


Рис. 3. Карти-схеми вищих похідних вихідного магнітного поля T_z , нТл, для району досліджень Алуштинсько-Батумської аномальної зони в акваторії Чорного моря: а — похідна $\frac{\partial T_z}{\partial z}$; б — похідна $\frac{\partial^2 T_z}{\partial z^2}$; в — похідна $\frac{\partial^3 T_z}{\partial z^3}$; г — похідна $\frac{\partial^3 T_z}{\partial z \partial x^2}$.

Fig. 3. Maps-schemes of the higher derivatives of the initial magnetic field T_z , nTl, for the research area of the Alushta-Batum anomalous zone in the Black Sea water area: а — derivative $\frac{\partial T_z}{\partial z}$; б — derivative $\frac{\partial^2 T_z}{\partial z^2}$; в — derivative $\frac{\partial^3 T_z}{\partial z^3}$; г — is a derivative $\frac{\partial^3 T_z}{\partial z \partial x^2}$.

Розвиток технологій кількісної інтерпретації векторних вимірювань магнітного поля за даними ΔX , ΔY , ΔZ . Важливо зазначити, що інтерес до цієї проблеми підвищився останнім часом у зв'язку з появою і практичним застосуванням магнітометрів, що дають змогу вимірювати три компоненти магнітного поля. Працездатність алгоритмів підбору за компонентами магнітного поля ΔX , ΔY , ΔZ застосовувалась при розв'язанні модельних і практичних завдань. Розв'язано серію обернених задач інтерпретації векторного знімання на площі робіт, що тяжіє до потужної Суботсько-Мошоринської широтної зони розломів. За даними свердловинних досліджень тут існують характерні горизонти «бокситоподібних» порід, які залягають у нижній частині райгородської товщі. Встановлено, що в деяких випадках у верхній частині розрізу над покладами вуглеводнів відбувається перерозподіл окисних і закисних форм заліза, що призводить до різких перепадів (зменшення і збільшення) магнітної сприйнятливості порід. Інтерпретацію даних площадного векторного магнітного знімання детально описано у статті [Михеєва, Лапина, 2021].

Математичне моделювання показало, що визначення і картування мало намагнічених об'єктів за допомогою тільки векторної магніторозвідки виявились недостатніми. Для розв'язання поставленої задачі векторну магніторозвідку потрібно використовувати у комплексі з іншими геофізичними методами. Тому площадну векторну магніторозвідку не проводили на всіх ділянках, а виконували моделювання 2D уздовж профіля 3 (Грузьська Південна). Технологія передбачає побудову числової моделі магнітного поля досліджуваної ділянки, формування моделі початкового наближення, оцінювання геометричних і фізичних показників збурюючих об'єктів. Для опису джерел аномалій використано апроксимаційну конструкцію, представлену сукупністю однорідно намагнічених багатокутних призм.

На рис. 4 наведено приклад імовірної моделі, отриманої за можливості застосування запропонованої технології для пошуку

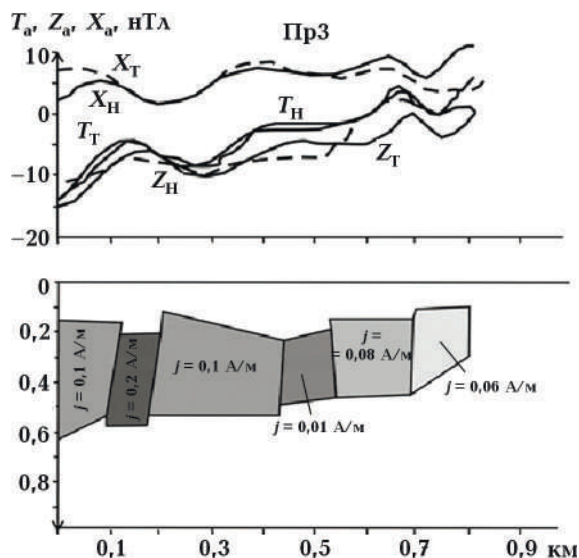


Рис. 4. Результати моделювання вздовж профілю 3 Південногрозької ділянки Сурозького родовища за розв'язком оберненої задачі магнітометрії з використанням даних векторних вимірювань.

Fig. 4. Results of the probable model along profile 3 of the Gruzsko Southern section of the Surozh deposit based on the solution of the inverse problem of magnetometry based on the data of vector measurements.

та розвідки корисних копалин. Ця технологія кількісної інтерпретації даних векторного магнітного знімання може істотно допомогти у певних фізико-геологічних умовах, при виявленні та локалізації покладів вуглеводнів [Mikheeva et al., 2017].

Програмний комплекс інтерпретації магнітотелуричних даних на підставі використання граничних умов імпедансного типу. Методика призначена для візуалізації даних МТЗ на етапі якісної інтерпретації паралельно з методом тензора імпедансу і векторів Візе. Безумовною перевагою цього підходу є незалежність від умови плоскої падаючої хвилі і використання всіх шести компонент електромагнітного поля (у тому числі Z-компоненти електричної складової МТ-поля). У складних сейсмогеологічних умовах використання динамічних параметрів визначення характеристик колекторських властивостей і флюїдонасиченості доволі проблематичне. Проте зазвичай питомий електричний опір нафтогазоносних плас-

тів перевищує опір водоносних пластів у 10 разів і більше, причому опір газових покладів вище опору нафтових. Це призводить до додатних аномалій уявного опору, які на десятки відсотків перевищують рівень опору законтуреної області. Вдалим доповненням, а іноді й альтернативою сейсмічним методам є геоелектричні, зокрема електромагнітні, зондування, що ґрунтуються на вивченні варіацій природного поля Землі. Особливе місце у пошуках вуглеводнів займають методи МТЗ. Їх результати, що отримані на нафтоперспективних площах, можуть бути істотним доповненням до результатів, одержуваних сейсморозвідкою. Перевагами магнітотелуричних методів можна також вважати певну екологічність — адже як джерело поля використовують природні електромагнітні варіації.

Теорія і методика інтерпретації даних МТЗ глибоко розроблені та широко застосовуються на практиці. Застосування методу тензора імпедансу, використання векторів Візе, незважаючи на певні обмеження застосування вихідної моделі «джерело — Земля», дають змогу вирішувати різноманітні практичні завдання. Пошуки можливостей оминати обмеження методу тензора імпедансів привели В.М. Шумана до реалізації ідеї про використання параметрів перетворення точної векторної імпедансної умови [Шуман, 2015]: $\mathbf{n} \times \mathbf{E} \times \mathbf{n} = \zeta (\mathbf{n} \times \mathbf{H}) + \xi (\mathbf{n} \times \mathbf{H}^* \times \mathbf{n})$ для інтерпретації даних МТЗ. По суті, це розкладання величини на дві ортогональні складові. Параметри інтерпретації в даному методі — скалярні імпеданси ζ та ξ , а також уявні безрозмірні вектори \mathbf{K} , \mathbf{L} та їх комбіновані варіанти \mathbf{K}_s , \mathbf{K}_r , \mathbf{L}_s і \mathbf{L}_r . Для роботи з даними МТЗ за цими параметрами створено програмний комплекс VECTOR.

Програмний комплекс дає змогу обробляти великі досліджувані площі відразу за всіма параметрами інтерпретації. Як результат роботи комплексу VECTOR будують поля скалярних імпедансів та уявних векторів у різних комбінаціях [Причепий, 2020]. Комплекс застосовували до великої кількості моделей геологічних структур. Більшість моделей мають типові характеристики структур

Українського щита. Програмний комплекс VECTOR цілком задовільно оконтурює досліджувані структури та відновлює питоми опір моделей. Метод постійно вдосконалюється. Один з основних недоліків його полягає у тому, що на практиці мережа наземних вимірів є вкрай нерівномірною, поступово може нівелюватися з розвитком технологій. З'являється реальна можливість використовувати нові високоточні вимірювання геомагнітного поля, отримані спеціальними супутниками. Це також дасть змогу отримати рівномірну мережу спостережень поля на значних територіях. На такій мережі методика візуалізації даних з використанням уявних векторів та скалярних імпедансів може бути ефективнішою.

На рис. 5 представлені результати візуалізації МТ-даних для 3D моделі за параметрами уявних безрозмірних векторів \mathbf{K} і \mathbf{K}_s . Для порівняння наведено візуалізацію за класичним параметром Візе $\mathbf{W}_{z \text{ real}}$. Досліджується тривимірна модель косоного розлому складної конфігурації, в центрі якого S-подібна форма вертикального падіння розташована приблизно під кутом 45° до осі Ox . Модель відображає субвертикальну структуру, що не збігається за простяганням з напрямком поляризації електромагнітного поля. Ширина близько 20 км, верхня кромка на поверхні, підшва на глибині 50 км; $\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, для вмисної породи $\rho = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

На рис. 6 показано візуалізацію даних електромагнітного поля для 3D моделі структури, що збігається за простяганням з напрямком поляризації електромагнітного поля; складається з блоків довільно змінюваної електропровідності. Загальна довжина структури 500 км, ширина — 20 км. Верхній край на поверхні, глибина підшви 50 км. Розміри блоків структури: ширина — від 4 до 6 км, довжина — від 60 до 90 км. Значення питомого опору блоків 10, 100, 250 і 500 $\text{Ом} \cdot \text{м}$, для вмисної породи $\rho = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. На рисунку наведено результати розрахунків питомого опору структури за значеннями скалярних імпедансів.

Висновки. Наведені в статті дані, а також результати раніше проведених досліджень

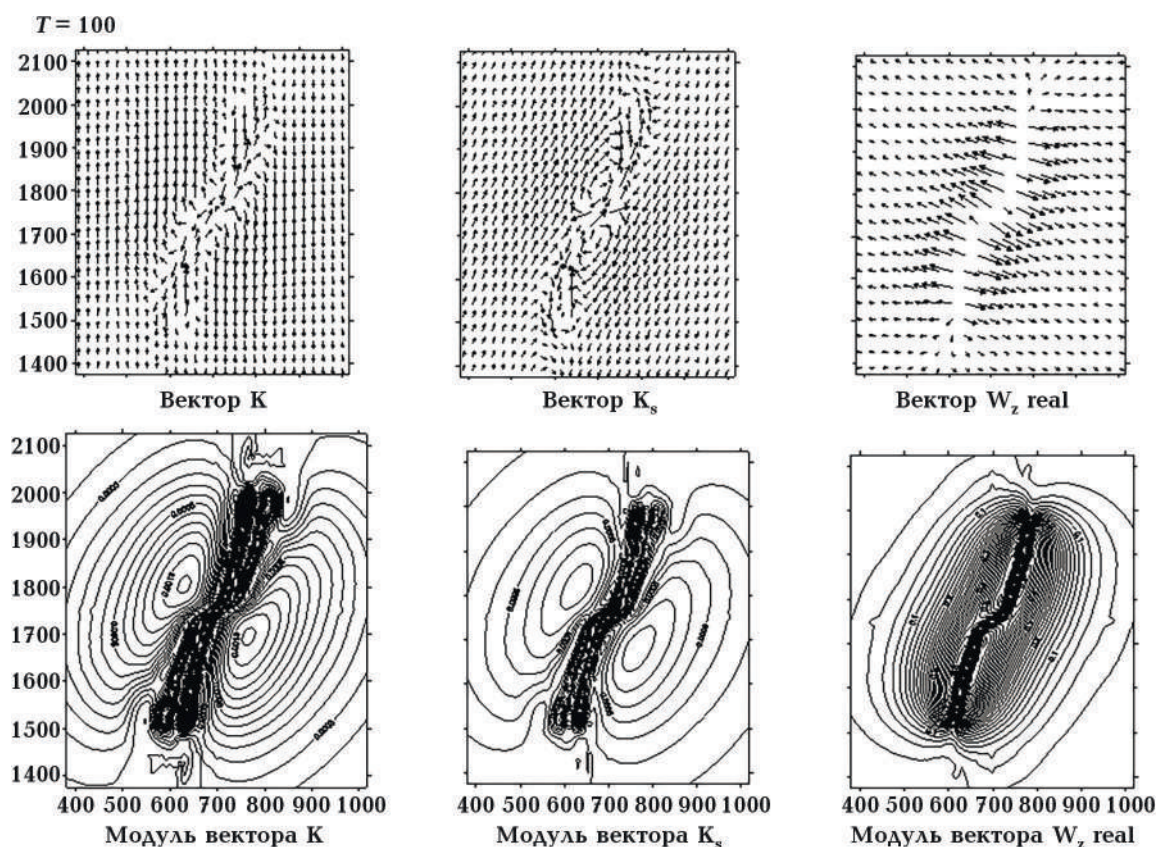


Рис. 5. Візуалізація електропровідної структури «косий розлом $T = 100$ » за результатами роботи програмного комплексу VECTOR (вектори \mathbf{K} і \mathbf{K}_s): справа — порівняння з $\mathbf{W}_{z\text{real}}$ (модель сформована Т.К. Бурахович, О. Гищук).

Fig. 5. Visualization of the leading structure «oblique fault $T = 100$ » according to the results of the VECTOR software complex (vectors \mathbf{K} and \mathbf{K}_s): on the right — comparison with $\mathbf{W}_{z\text{real}}$ (the model was created by T. Burakhovich, O. Gishchuk).

авторів дають змогу стверджувати, що розроблені технології при інтерпретації геофізичних даних можуть бути використані як для вивчення значних за розмірами і важкодоступних регіонів, так і для додаткового оцінювання перспектив нафтогазоносності виявлених традиційними геофізичними методами і рекомендованих для розбурювання об'єктів і структур. При вивченні та оцінюванні перспектив нафтогазоносності областей (ділянок, блоків) поширення традиційних і нетрадиційних колекторів доцільно досліджувати весь доступний розріз. Скупчення вуглеводнів можуть бути розташовані і вище, і нижче відомих виявлених горизонтів, а також у кристалічному фундаменті.

Прогнозування ділянок накопичення вуглеводнів виконується на підставі інтерпретації результатів комплексного геофізичного моделювання з огляду на аналіз сейсмічних даних. У запропонованих дослідженнях доцільно виконувати інтерпретацію векторних вимірювань магнітного поля, що має бути спрямована на виявлення градієнтних зон, пов'язаних із земною корою, де під дією вуглеводневих флюїдів змінюється магнітна сприйнятливості порід.

Інтегрування теоретичних і програмно-алгоритмічних розробок дасть змогу сформувати технологію комплексної інтерпретації геолого-геофізичних даних, призначених для вирішення завдань нафтогазової гео-

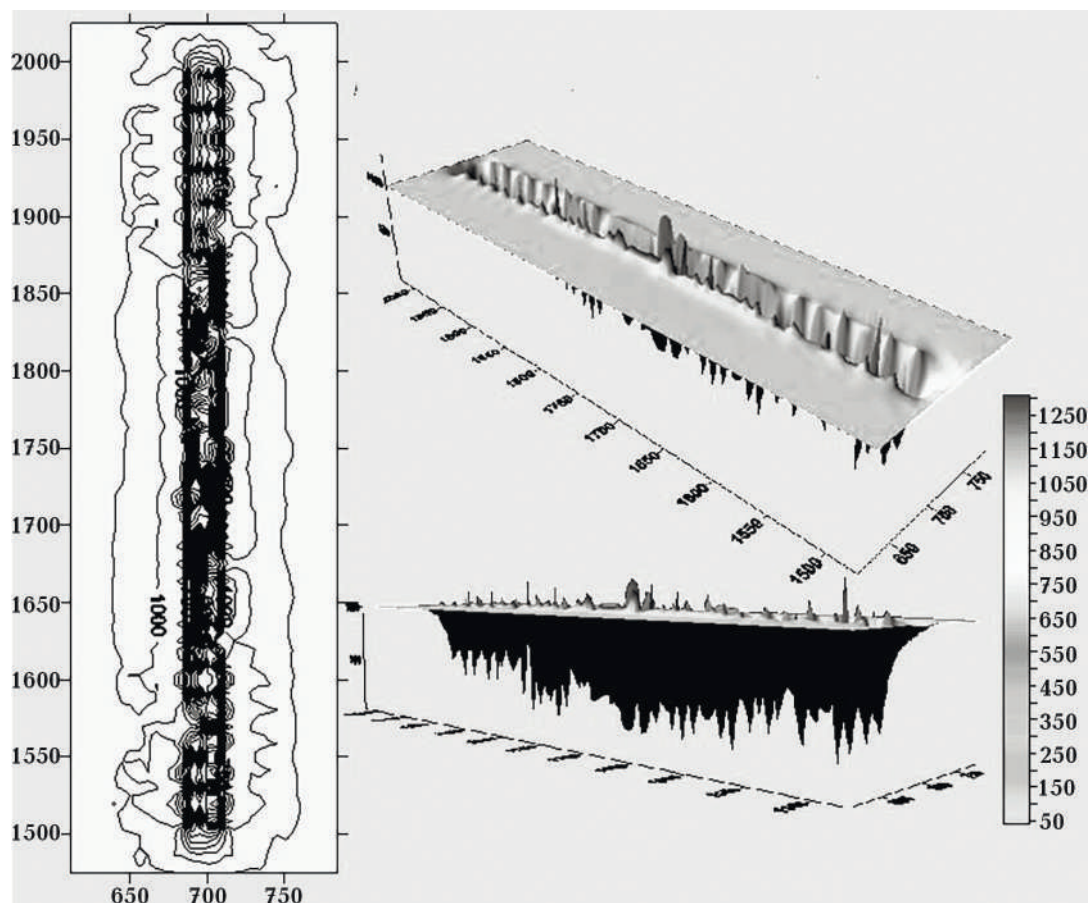


Рис. 6. Прямий розлом. Уявний питомий опір для системи блоків, розрахований за методом скалярних імпедансів програмним комплексом VECTOR (модель сформована Т.К. Бурахович, О. Гищук).

Fig. 6. Direct fault. The apparent specific resistance for the system of blocks, calculated by the method of scalar impedances by the VECTOR software complex (the model was created by T. Burakhovich, O. Gishchuk).

логії. Якісна інтерпретація даних МТЗ паралельно із застосуванням методу тензора імпедансу і векторів Візе, побудова типових моделей магнітотелурики, інтерпретація даних гравімагніторозвідки і геотермії на основі різних методів мінімізації багатопараметричного функціонала сприятимуть достовірності отриманих результатів. Передумовою є тісний взаємозв'язок і спільна участь ендегенних й екзогенних термічних

процесів у формуванні скупчень нафти і газу. Це дає змогу ідентифікувати аномалії теплового потоку, пов'язані зі структурно-теплофізичними неоднорідностями та конвективним винесенням тепла флюїдами, і оцінити нафтогазоносність надр. Актуальність і важливість очікуваних результатів зумовлюється прогнозуванням нових перспективних ділянок, а також переоціненням запасів відомих родовищ.

Список літератури

- Булах Е.Г., Шиншин И.В. Об аналитической аппроксимации исходного поля аномалии силы тяжести и его качественной интерпретации. *Физика Земли*. 2002. № 4. С. 67—74.
- Булах Е.Г., Кишман-Лаванова Т.Н. Еще один аппроксимационный подход к решению обратных задач гравиметрии в классе трехмерных контактных поверхностей. *Геофиз. журн.* 2006. Т. 28. № 2. С. 54—62.
- Булах Е.Г., Лапина Е.П. К вопросу о построении аналитической модели внешнего магнитного поля. *Геофиз. журн.* 2008. Т. 30. № 2. С. 42—50.
- Дворянин Є.С., Кабишев Б.П., Пригарина Т.М. Нафтогазоносний потенціал Південного борту Дніпровсько-Донецької западини. Київ, 1996. 44 с. (Препр. Держ. геофіз. підпр. «Укр-геофізика»; 96-1).
- Кишман-Лаванова Т.Н. Парето-оптимальные решения обратной задачи гравиметрии в классе трехмерных контактных поверхностей. *Геофиз. журн.* 2020. Т. 42. № 6. С. 207—221. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i6.2020.222297>.
- Кишман-Лаванова Т.Н. Парето-оптимальные решения обратной задачи гравиметрии с неопределенной априорной информацией. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 5. С. 93—103. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i5.2015.111148>.
- Кобрунов А.И. К теории интерпретации данных гравиметрии для слоистых сред (равномерная оптимизация). *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1988. № 8. С. 33—44.
- Корчагин И.Н., Левашов С.П., Михеева Т.Л., Орлова М.И., Прилуков В.В., Якимчук Н.А., Якимчук Ю.Н., Шумик С.В. Элементы многошаговых стратегий в технологиях автоматизированного подбора гравитационных и магнитных аномалий. *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики: Зб. наук. праць*. 2004. Т. 1. С. 143—158.
- Лапина Е.П., Михеева Т.Л., Панченко Н.В. Локализация геологических объектов по магнитометрическим данным с использованием алгоритмов автоматизированного подбора. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 6. С. 160—173. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i6.2016.91904>.
- Маркова М.Н., Лапина Е.П. Высшие производные магнитного поля, их исследование и возможности практического использования для решения задач магнитометрии. *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики: Зб. наук. праць*. 2013. Вип. 10. С. 81—98.
- Маркова М.Н., Лапина Е.П. Исследования и возможности практического применения высших производных магнитного потенциала для решения задач магнитометрии. *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. Зб. наук. праць*. 2014. Вип. 11. С. 102—120.
- Михеева Т.Л., Лапина Е.П., Панченко Н.В. Автоматизированный подбор по векторным измерениям аномального магнитного поля. *15th EAGE International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects*, 10—13 May 2016. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201600509>.
- Михеева Т.Л., Лапина Е.П. Компьютерная технология интерпретации векторных изменений магнитного поля. *Геофиз. журн.* 2021. Т. 43. № 5. С. 219—232. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i5.244083>.
- Михеева Т.Л., Лапина Е.П., Панченко Н.В. Моделирование магнитометрических данных с использованием алгоритмов автоматизированного подбора. *Геоінформатика*. 2018. № 1(65). С. 48—54.
- Орлюк М.И., Пашкевич И.К., Магнитная ха-

- рактеристика и разломная тектоника земной коры Шебелинской группы газовых месторождений как составляющая часть комплексных поисковых критериев углеводородов. *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 6. С. 136—151. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i6.2011.116799>.
- Причепий Т.И. Модификации мнимых векторов, их свойства и возможности при визуализации магнитотеллурического поля. *Геоінформатика.* 2020. № 1(73). С. 72—81.
- Старостенко В.И., Лукин А.Е., Русаков О.М., Пашкевич И.К., Кутас Р.И., Гладун В.В., Лебедь Т.В., Максимчук П.Я., Легостаева О.В., Макаренко И.Б. О перспективах открытия массивных залежей углеводородов в гетерогенных ловушках Черного моря. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 5. С. 3—21. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i5.2012.116660>.
- Старостенко В.И., Лукин А.Е., Цветкова Т.А., Шумлянская Л.А. Геофлюиды и современное проявление активизации Ингульского мегаблока Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 5. С. 3—25. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100/v36i5.2014.111567>.
- Старостенко В.И., Черная Н.Н., Черный А.В. Обратная задача гравиметрии для контактной поверхности I. *Физика Земли.* 1992. № 6. С. 48—58.
- Тектоника и углеводородный потенциал кристаллического фундамента Днепровско-Донецкой впадины. Ред. В.И. Старостенко, О.М. Русаков. Киев: Галактика, 2015, 212 с.
- Шуман В.Н. О концептуальных основах диагностики и мониторинга геосистем. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 4. С. 93—103. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i4.2015.111128>.
- Kozlovskaya, E. (2000). An algorithm of geophysical data inversion based on non-probabilistic presentation of a priori information and definition of Pareto-optimality. *Inverse Problem*, 16(3), 839—861.
- Mikheeva, T.L., Lapina, E.P., & Panchenko, N.V. (2018). Application of algorithms for the selection of an automated interpretation system for oil-and-gas prospects. *17th EAGE International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects*, May 2018. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201801856>.
- Mikheeva, T.L., Lapina, E.P., & Panchenko, N.V. (2017). The practical realization of program-algorithmic complex modeling of magnetometric data. *16th EAGE International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects*, May 2017. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201701854>.
- Sambridge, M. (1999). Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm — I. Searching a parameter space. *Geophysical Journal International*, 138(2), 479—494. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1999.00876.x>.
- Tarantola, A., & Valette, B. (1982). Generalized nonlinear inverse problems solved using the least squares criterion. *Reviews of Geophysics*, 20(2), 219—232. <https://doi.org/10.1029/RG020i002p00219>.

Geophysical data interpretation technologies in the study and exploration of oil-and-gas deposits

*T.L. Mikheeva, O.P. Lapina, T.M. Kyshman-Lavanova,
T.I. Prychepiy, 2022*

S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

The article presents the results of scientific research on the creation of computer technology for the interpretation of geophysical field data in the exploration of oil-and-gas deposits of Ukraine. The theoretical, informational, technological and methodical foundations for increasing the efficiency of geological exploration work due to the in-depth extraction of information from geological and geophysical data based on their complex interpretation within the framework of new mathematical models have been developed. Three-dimensional gravity and magnetometric modeling can be directed to the detection of densification zones and the tracing of tectonic disturbances in the consolidated crust, without which the existence of hydrocarbon transportation channels is impossible. The practical application of examples of quantitative interpretation of three-component magnetic survey data is given, which will significantly help in the detection and localization of hydrocarbon deposits. Development and expansion of the software complex for the interpretation of magnetotelluric data based on the use of impedance-type boundary conditions. The technique is intended for visualization of MTS data at the stage of qualitative interpretation in parallel with the method of the impedance tensor and Wiese vectors. The absolute advantage of this approach is its independence from the condition of a plane incident wave and the use of all six components of the electromagnetic field (including the Z component of the electric component of the MT field). The integration of statistical and deterministic methods during the inversion of geophysical data will increase the reliability of the obtained geological results. The relevance and importance of the results presented in the work is determined by the conceptual novelty of methods and tools for forecasting new promising areas, as well as the reassessment of reserves of known deposits.

Key words: gravitational field, magnetic field, electromagnetic field, analytical approximation, qualitative and quantitative interpretation, inverse problem, oil-and-gas deposits, imaginary vector, scalar impedance.

References

- Bulakh, E.G., & Shinshin, I.V. (2002). On the analytical approximation of the initial field of the gravity anomaly and its qualitative interpretation. *Fizika Zemli*, (4), 67—74 (in Russian).
- Bulakh, E.G., & Kyshman-Lavanova, T.N. (2006). Another Approximation Approach to Solving Inverse Problems of Gravimetry in the Class of Three-Dimensional Contact Surfaces. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 28(2), 54—62 (in Russian).
- Bulakh, E.G., & Lapina, E.P. (2008). On the question of constructing an analytical model of an external magnetic field. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 30(2), 42—50 (in Russian).
- Dvoryanin, E.S., Kabyshev, B.P., & Prygarina, T.M. (1996). *Oil-and-gas potential of the Southern side of the Dnieper-Donetsk Basin*. Kyiv, 44 p. (Preparation of the State Geophysics Agency «Ukrgeofizika»; 96-1) (in Ukrainian).
- Kyshman-Lavanova, T. (2020). Pareto-optimal solutions of the inverse gravimetric problem in the class of three-dimensional contact surfaces. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 42(6), 207—221. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i6.2020.222297> (in Russian).
- Kyshman-Lavanova, T. (2015). Pareto-optimal solutions of the inverse problem of gravimetry with indeterminate a priori information. *Geo-*

- fizicheskiy Zhurnal*, 37(5), 93—103. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i5.2015.111148> (in Russian).
- Kobrunov, A.I. (1988). On the theory of interpretation of gravimetric data for layered media (uniform optimization). *Izvestiya AN SSSR. Ser. Fizika Zemli*, (8), 33—44 (in Russian).
- Korchagin, I.N., Levashov, S.P., Mikheeva, T.L., Orlova, M.I., Prilukov, V.V., Yakimchuk, N.A., Yakimchuk, Yu.N., & Shumik, S.V. (2004). Elements of multi-step strategies in technologies for automated selection of gravitational and magnetic anomalies. *Theoretical and applied aspects of geoinformatics*, 1, 143—158 (in Russian).
- Lapina, E.P., Miheeva, T.L., & Panchenko, N.V. (2016). Localization of geological objects according to magnetometric data with application of algorithms of automated selection. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 38(6), 160—172. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i6.2016.91904> (in Russian).
- Markova, M.N., & Lapina, E.P. (2013). Higher derivatives of the magnetic field, their study and the possibilities of practical use for solving problems of magnetometry. *Theoretical and applied aspects of geoinformatics*, (10), 81—98 (in Russian).
- Markova, M.N., & Lapina, E.P. (2014). Research and practical application of higher derivatives of the magnetic potential for solving problems of magnetometry. *Theoretical and applied aspects of geoinformatics*, (11), 102—120 (in Russian).
- Mikheeva, T.L., Lapina, E.P., & Panchenko, N.V. (2016). Automated selection by vector measurements of the anomalous magnetic field. *15th EAGE International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects*, 10—13 May 2016. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201600509> (in Russian).
- Mikheeva, T.L., & Lapina, O.P. (2021). Computer technology for interpreting vector measurements of the magnetic field. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(5), 219—231. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i5.244083> (in Russian).
- Mikheeva, T.L., Lapina, E.P., & Panchenko, N.V. (2018). Modeling of magnetometric data using automated selection algorithms. *Geoinformatika*, (1), 48—54 (in Russian).
- Orlyuk, M.I., & Pashkevich, I.K. (2011). Magnetic characteristics and fault tectonics of the Earth's crust of the Shebelina group of gas fields as a component of the complex search criteria of hydrocarbons. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 33(6), 136—151. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i6.2011.116799> (in Russian).
- Prichepiy, T.I. (2020). Modifications of imaginary vectors, their properties and possibilities in the visualization of the magnetotelluric field. *Geoinformatika*, (1), 72—81 (in Russian).
- Starostenko, V.I., Lukin, A.E., Rusakov, O.M., Pashkevich, I.K., Kutas, R.I., Gladun, V.V., Lebed, T.V., Maximchuk, P.Ya., Legostaeva, O.V., & Makarenko, I.B. (2012). On the prospects for the discovery of massive hydrocarbon deposits in the heterogeneous traps of the Black Sea. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 34(5), 3—21. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i5.2012.116660> (in Russian).
- Starostenko, V.I., Lukin, A.E., Tsvetkova, T.A., & Shumlyanskaya, L.A. (2014). Geofluids and up-to-date display of activation of the Ingul megablock of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 36(5), 3—25. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i5.2014.111567> (in Russian).
- Starostenko, V.I., & Rusakov, O.M. (2015). *Tectonics and hydrocarbon potential of the crystalline basement of the Dnieper-Donetsk depression*. Kyiv: Galaktika, 212 p. (in Russian).
- Shuman, V.N. (2015). On conceptual grounds of diagnostics and monitoring of geosystems. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 37(4), 93—103. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i4.2015.111128> (in Russian).
- Kozlovskaya, E. (2000). An algorithm of geophysical data inversion based on non-probabilistic presentation of a priori information and definition of Pareto-optimality. *Inverse Problem*, 16(3), 839—861.
- Mikheeva, T.L., Lapina, E.P., & Panchenko, N.V. (2018). Application of algorithms for the selection of an automated interpretation system for oil-and-gas prospects. *17th EAGE Interna-*

- tional Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects*, May 2018. <https://doi.org/10.3997/2214-4609/201801856>.
- Mikheeva, T.L., Lapina, E.P., & Panchenko, N.V. (2017). The practical realization of program-algorithmic complex modeling of magnetometric data. *16th EAGE International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects*, May 2017. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201701854>.
- Sambridge, M. (1999). Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm — I. Searching a parameter space. *Geophysical Journal International*, 138(2), 479—494. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1999.00876.x>.
- Tarantola, A., & Valette, B. (1982). Generalized non-linear inverse problems solved using the least squares criterion. *Reviews of Geophysics*, 20(2), 219—232. <https://doi.org/10.1029/RG020i002p00219>.