

де Δg_r^{cn} – аномальне поле, зареєстроване в r -точці спостережень; Δg_r^p – аномальне гравітаційне поле, розраховане при прийнятому наближенні кількісного мінералогічного складу і структурі пустотного простору та типу флюїду із врахуванням порового тиску, літостатичного тиску і температури; $\bar{u}_r^{cn}$ – пружні зміщення хвильового поля, зареєстровані в точці спостережень (або час приходу хвилі в точку спостережень); $\bar{u}_r^p$ – пружні зміщення хвильового поля, розраховані при прийнятих наближених параметрах моделі.

Таким чином, описана постановка задачі комплексної інтерпретації результатів сейсмогравіметричних досліджень із застосуванням принципів сейсмічної томографії значно розширює можливості цих методів при пошуках нафти і газу в кристалічному фундаменті і може надати значну допомогу при виборі напрямку розвідувальних робіт.

УДК 550.831+550.838

ГРАВІМАГНІТНА ТОМОГРАФІЯ: СТАНОВЛЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол.-мінералог. наук, проф. В.М. Курганським)

Розроблено новий гравімагнітний томографічний метод геологічної інтерпретації. Технологія ґрунтується на відновленні структурно-речовинного складу геологічного середовища і його густинних і магнітних властивостей. Метод забезпечує врахування апріорної геологічної інформації та побудову тривимірної геологічної моделі. Розробка забезпечує можливість врахування ефектів неоднорідної намагніченості елементів геологічної структури.

A new gravity and magnetic tomography method of geological interpretation is developed. Technology is founded on renewal of structural-material composition of geological media and its density and magnetization properties. A method provides the most complete consideration of a priori geological information and construction of three-dimensional geological model. Development provides the consideration of heterogeneous magnetization effects of geological structure elements.

Вступ. Бурхливий розвиток інформаційних технологій і суперкомп'ютерної техніки відкриває принципово нові можливості і підходи до комплексної інтерпретації геофізичної інформації.

Як відомо [1, 3], традиційні методи розв'язку нелінійних задач граві- і магнітометрії, які ґрунтуються на класичному апараті мінімізації і направлені на побудову поточкових оцінок шуканих параметрів моделей джерел геофізичних полів, мають принаймні два принципові недоліки. Один із них полягає в тому, що прийняті в умовно-екстремальних задачах форми представлення обмежень на параметри, що оптимізуються, не спроможні охопити всю різноманітність можливих форм апріорних припущень щодо особливостей будови геологічного середовища. Другий недолік безпосередньо пов'язаний із концепцією "оптимальний розв'язок" оберненої задачі і проявляється у відсутності монотонної залежності достовірності цього розв'язку від обсягу вхідних даних. Це спричиняє в задачах комплексування геофізичних методів парадоксальну ситуацію, коли точність розв'язання задачі за сукупністю усіх геофізичних вимірювань виявляється нижчою, ніж у кожного з розв'язків окремо, які побудовані в рамках парціальної моделі спостереженого поля.

Підхід, який ґрунтується на ідеї представлення результатів математичної інтерпретації як набору геологічно змістовних інваріантів на множині допустимих розв'язків оберненої задачі, називається гарантованим [1]. В геофізиці гарантований підхід розвивався переважно в рамках її окремих методів [2, 3]. В роботі [1, 4] зроблено спробу створити новий напрям, який базується на синтезі ідеї

1. Левянт В.Б., Тропов Ю.А., Шустер В.Л. Использование рассеянной компоненты сейсмического поля для дифференциации кристаллического фундамента на коллекторские и монолитные зоны // Геофизика. - 2003. - № 3. - С. 17-26.
2. Пилипенко В.Н. Численный метод полей времен для построения сейсмических границ // Обратные кинематические задачи взрывной сейсмологии. - М., 1979. - С. 124-181.
3. Продайвода Г.Т. Математичне моделювання ефективних термолужних властивостей багатокомпонентного тріщинуватого геологічного середовища насиченого флюїдом з внутрішнім тиском // Геофіз. журн. - 2007. - № 3. - С. 122-130.
4. Продайвода Г.Т., Гришук П.І. Гравіметричний метод геокартування структурно-речовинних комплексів Українського щита // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. - 2007. - Вип. 41. - С. 7-10.
5. Продайвода Г.Т., Вижва С.А. Проблеми геофізики природних і техногенних катастроф // Наук. записки Київськ. ун-ту. - 2004. - Т. III. - С. 162-169.
6. Продайвода Г.Т., Маслов Б.П., Продайвода Т.Г. Сейсмомінералогіческая модель континентальной верхней мантии Земли // Физика Земли. - 2003. - № 2. - С. 3-14.
7. Рыжков Г.А., Троян В.Н. Восстановление поля скорости в трехмерной среде по функционалам от полей упругих волн // Физика Земли. - 1986. - № 7. - С. 49-56.
8. Gibson R.L., Ben-Menahem A. Elastic wave scattering by Anisotropic obstacles: Application of Fractured volumes // J. Geophys. Res. - 1991. - V. 96. - № B12. - P. 905-924.

Надійшла до редколегії 25.05.09

С. Вижва, д-р геол. наук,
Г. Продайвода, д-р фіз.-мат. наук,
П. Гришук, канд. геол. наук

гарантованого підходу і концепції монтажних алгоритмів. Цей напрям орієнтований на максимальне врахування інформації. Разом з тим такий підхід, який іменується гарантованим і ґрунтується на ідеї представлення результатів математичної інтерпретації як набору фізично-змістовних інваріантів на множині допустимих розв'язків оберненої задачі, не гарантує геологічну змістовність інтерпретації, так як фактично ігнорується "зв'язок" середовище-фізичні властивості-геофізичні поля. Основна увага зосереджується на "тонких" особливостях геометрії джерел геофізичного поля [1, 2, 3, 4].

У фундаментальній роботі [5] проаналізовано різні підходи та особливості гравітаційної томографії, серед яких виокремлено два основні: фільтраційний та апроксимаційний. Зроблено спробу застосувати теорію обробки геообразень до задач томографії. Серед перспективних підходів пропонується застосування методів гравітаційної томографії з розв'язком обернених задач гравіметрії.

В запропонованій роботі розглядається апроксимаційний підхід томографії при поєднанні розв'язання обернених задач гравіметрії та магнітометрії.

Теорія методу. Відома формула Пуассона, яка встановлює зв'язок між гравітаційним і магнітним потенціалами, навіть формально не береться до уваги при порівнянні гравітаційних і магнітних аномалій. Оскільки вона справедлива лише для тіла, у якого густина і дипольний момент є сталими величинами. Насправді ця умова в реальному геологічному середовищі практично ніколи не виконується. Формально для локальної однорідно-намагніченої структурної неоднорідності залежність між гравітаційним

($W(\bar{x})$) і ($U(\bar{x})$) магнітним потенціалами можна записати у вигляді рівняння Пуассона [6, 3]:

$$U_i(\bar{x}) = \frac{1}{4\pi} \gamma \sigma(\bar{x}) I_i(\bar{x}) W_i(\bar{x}), \quad (1)$$

де $I_i(\bar{x})$ – компоненти вектора намагніченості локального об'єму структурної неоднорідності; $W_i(\bar{x})$ – перші похідні гравітаційного потенціалу того ж об'єму; γ – гравітаційна стала; $\sigma(\bar{x})$ – густина.

Парадоксальність ситуації полягає в тому, що густина визначається усіма без виключення структурними неоднорідностями геологічного середовища, а магнітні властивості, зокрема, магнітна сприйнятливість, визначається вмістом і структурою феромагнітних мінералів, які розподілені лише в деяких локальних областях макроскопічного об'єму, а не заповнюють його суцільним чином. Крім того, магнітна сприйнятливість є анізотропною величиною і залежить від характеру упорядкованості феромагнітних мінералів, а густина – скалярна величина. Більше того, намагніченість макроскопічного об'єму може бути індукційованою сучасним магнітним полем та залишковою, а геологічні тіла не є однорідно намагніченими.

В роботі [7, 8] запропонований принципово новий підхід до вирішення проблеми комплексної інтерпретації геофізичних полів. У його основі лежить багатокомпонентна нелінійна модель геологічного середовища, ефективні геофізичні параметри якого визначаються сучасними методами механіки мікронеоднорідного середовища із урахуванням напружено-деформованого стану структурних елементів флюїдонасиченості, тиску і температури.

Органічним атрибутом такого середовища є наявність пор і тріщин сухих або флюїдонасичених. Для розв'язання задачі комплексної інтерпретації застосовуються принципи геофізичної томографії, інформаційна змістовність якої визначається перекриттям томографічних потенціалів. Томографічні функціонали, шляхом дії на тензорні поля невідомих ефективних фізичних властивостей геологічного середовища, дозволяють визначити вплив усіх структурних елементів геологічного середовища на зареєстроване у фіксованій точці геофізичне поле. Тобто томографічні функціонали забезпечують кількісну оцінку впливу різних структурних неоднорідностей на зареєстроване поле (при обраній системі спостережень) та їх ефективні геофізичні характеристики.

Приймаючи до уваги вищезгадане, основною метою запропонованого підходу комплексної інтерпретації є відновлення речовинного складу та ефективних властивостей структурованого геологічного середовища. З іншого боку, метою геофізичної томографії є відновлення геофізичних параметрів. Це дає підстави запропонований підхід до інтерпретації граві- і магнітометричних даних назвати *гравімагнітною томографією*. Оскільки, на відміну від традиційного підходу, визначається не структура джерел аномального гравітаційного і магнітного полів, а відновлюються густинні та магнітні властивості геологічного середовища і його мінералогічний склад.

Неоднорідне геологічне середовище розбивається на апроксимуючі комірки – тіла простої геометричної форми, розмір яких визначається масштабом досліджень і роздільною здатністю геофізичної технології, що застосовується. Ефективна густина σ^* апроксимуючої комірки визначається елементарним мінералогічним складом із урахуванням напружено-деформованого стану та флюїдонасиченості пор і тріщин:

$$\sigma^* = \sum_{i=1}^N c_i \sigma_i, \quad (2)$$

де c_i – об'ємна концентрація мінералу або пор і мікротріщин; σ_i – густина i -го мінералу або флюїду, що заповнює пори або тріщини.

Ефективна магнітна сприйнятливість макроскопічного об'єму апроксимуючої комірки (χ^*) зводиться до розв'язку задачі визначення залежності середнього значення напруженості у включенні $\langle H_i \rangle$ і макроскопічною магнітною напруженістю апроксимуючої комірки $\langle H^{(m)} \rangle$ [9]:

$$\langle H^{(m)} \rangle = M \langle H_i \rangle, \quad (3)$$

де M – деякий інтегральний оператор, ядром якого є функція Гріна, що враховує взаємодію між структурними елементами із урахуванням їх форми і розміру. Для узагальнення розв'язку на багатокомпонентне середовище застосовується розрахункова схема Морі-Тонака [8]. Ефективний тензор магнітної сприйнятливості (χ^*) визначається із співвідношення:

$$\chi^* = \sum_{r=1}^{N+1} c_r \chi^{(r)} A^{(r)}, \quad (4)$$

де c_r – об'ємна концентрація r -го включення; χ_r – магнітна сприйнятливість r -го включення;

$$A^{(r)} = A_m \left(1 + \bar{Z}^{(r)} d^{(r)} \right), \quad (5)$$

$$A_m = \left(1 + \sum_{i=1}^N c_i \bar{A}^{(i)} d^{(i)} \right), \quad (6)$$

$$\bar{Z}^{(r)} = \left(1 - G^{(r)} f^{(r)} \right)^{-1} G^{(r)}, \quad (7)$$

$$d^{(r)} = \chi^{(r)} - \chi_m, \quad \bar{Z}^{(r)} = \langle Z^{(r)} \rangle, \quad (8)$$

$$f^{(r)} = \chi^{(r)} - \chi^{(c)} \quad (9)$$

де $G^{(r)}$ – алгебраїчна матриця, яка одержана із розв'язку інтегрального рівняння, ядром якого є функція Гріна, що визначає середнє магнітне поле у включенні із макроскопічним магнітним полем апроксимуючої комірки; N – число включень; $N+1$ – кількість компонент матриці; $\chi^{(r)}$ – магнітна сприйнятливість r -го включення; χ_m – магнітна сприйнятливість матриці; χ^c – магнітна сприйнятливість тіла порівняння.

Гравітаційне і магнітне поле, які зареєстровані в точці спостережень, є сумарним, так як воно створюється усіма гравітаційними і намагніченими об'єктами, а не лише об'ємом апроксимуючої комірки:

$$\Delta g^{(СП)}(x, y, 0) = \Delta g^{(AK)}(x, y, 0) + \Delta g^{(\Phi)}(x, y, 0) + \Delta g^{(3)}(x, y, 0), \quad (10)$$

$$\Delta T^{(СП)}(x, y, 0) = \Delta T^{(AK)}(x, y, 0) + \Delta T^{(\Phi)}(x, y, 0) + \Delta T^{(3)}(x, y, 0), \quad (11)$$

де $\Delta g^{(AK)}(x, y, 0)$, $\Delta T^{(AK)}(x, y, 0)$ – аномальні гравітаційні і магнітні поля, які породжуються апроксимуючими комірками; $\Delta g^{(\Phi)}$, $\Delta T^{(\Phi)}$ – аномальні гравітаційні поля, які створюються об'єктами, що знаходяться за

межами досліджуваного макроскопічного об'єму; $\Delta g^{(3)}(x, y, 0)$, $\Delta T^{(3)}(x, y, 0)$ – аномальні гравітаційні і магнітні поля випадкових завад (помилки вимірювань аномального гравітаційного і магнітного полів та похибки апроксимації реального геологічного середовища однорідною апроксимаційною коміркою).

Формули для гравітаційного і магнітного потенціалу апроксимуючої комірки, форма якої представляє собою елементарний куб, наведені в роботі [10]. Глобальна оптимізація поставленої задачі здійснюється шляхом мінімізації цільової функції:

$$\Phi(\vec{x}) = \sum_{k=1}^M \left[\left(\Delta g_{(k)}^{(сп)} - \Delta g_{(k)}^{(мод)} \right)^2 + \left(\Delta T_{(k)}^{(сп)} - \Delta T_{(k)}^{(мод)} \right)^2 \right], \quad (12)$$

де $\Delta g_{(k)}^{(сп)}$, $\Delta T_{(k)}^{(сп)}$ – аномальне гравітаційне і магнітне поля, які зареєстровані в точці спостережень; $\Delta g_{(k)}^{(мод)}$, $\Delta T_{(k)}^{(мод)}$ – аномальне гравітаційне і магнітне поля, що

обчислені із знайденого наближення кількісного мінералогічного складу в апроксимуючій комірці, який використовується для обчислення ефективних густинних і магнітних властивостей; $\vec{x}$ – вектор невідомих параметрів, який включає кількісний мінералогічний склад апроксимуючої комірки, коефіцієнт пористості і тріщинуватості, а також аномальні ефекти від об'єктів, що знаходяться за межами досліджуваного об'єму, та флуктуаційні складові.

Висновки. Розроблено новий гравімагнітний томографічний метод геологічної інтерпретації, безперечною перевагою якого є відновлення структурно-речовинного складу геологічного середовища і його

густинних і магнітних властивостей. Це забезпечує врахування апіорної геологічної інформації та побудову тривимірної геологічної моделі.

Запропонований метод забезпечує вирішення не лише відновлення структури джерел гравітаційного і магнітного поля, але і надійного розрізнення вкладу в аномальне гравітаційне та магнітне поля неоднорідностей об'єму геологічного об'єкта, що досліджується. Метод дозволяє враховувати ефекти неоднорідної намагніченості структурних елементів геологічної структури.

У випадку слабо намагнічених об'єктів відкривається можливість дослідження впливу на магнітне поле парамагнітних мінералів.

1. Балк П.И., Балк Т.В. Совмещенная обратная задача гравитационной и магнитометрии // Физики Земли. - 1996. - № 2. - С. 16–30. 2. Страхов В.Н., Лапина М.И. Монтанжний метод решения обратной задачи гравиметрии // Докл. АН СССР. - 1976. - № 2. - Т. 227. - С. 344–347. 3. Голлиздра Г.Я. Комплексная интерпретация геофизических полей при изучении глубинного строения земной коры. - М., 1988. 4. Шеффер У., Балк Т.В. Монтанжний метод решения совмещенной обратной задачи гравитационной и магнитометрии // Докл. РАН. - 1992. - № 1. - Т. 327. - С. 79–83. 5. Долгалев А.С., Шархимуллин А.Ф. "Гравитационная томография" – практика, опережающая теорию? // Геоинформатика. - 2009. - № 3. С. 59–67. 6. Тафеев Г.П., Соколов К.П. Геологическая интерпретация магнитных аномалий. - Л., 1981. 7. Продайвода Г.Т., Вижева С.А. Проблемы геофизики природных техногенных катастроф // Наук. записки КНУ ім. Т. Г. Шевченка. - Т. 3. - С. 162–170. 8. Продайвода Г.Т., Вижева С.А. Проблемы комплексной геофизической интерпретации данных геофизического мониторинга природных техногенных процессов // Математика, природознание, технические науки: Доп. НАНУ. - 2004. - № 3. - С. 121–127. 9. Продайвода Г.Т., Маслов Б.П., Лещенко П.В. и др. Новый метод математического моделирования эффективных магнитных свойств многокомпонентных анизотропных геологических сред // Геофиз. журн. - 2005. - № 2. - Т. 27. - С. 280–289. 10. Продайвода Г.Т., Гришук П.И. Гравімагнітний метод геокартування структурно-речовинних комплексів Українського щита // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. - 2007. - Вип. 41-42. - С. 7–10.

Надійшла до редколегії 21.09.09

УДК 550.832

В. Андрущенко, пров.інж.,
В. Курганський, д-р геол.-мінералог. наук,
І. Тішаєв, канд. фіз.-мат. наук,
В. Бугрій, асп.

НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В ПРОМИСЛОВІЙ ГЕОФІЗИЦІ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.М. Карпенком)

Проаналізовано сучасний стан і тенденції в області інформаційного забезпечення процесу буріння глибоких нафтогазових свердловин. Викладено нову ідеологію оперативного отримання геофізичної інформації в процесі буріння без залучення спеціалізованих каротажних загонів. Наведено загальний опис та результати випробування телеметричної системи "Паркус", скидного інклінометра CI-1, пластового нахиломіра НР-6, модуля вимірювання вібрацій "Вібро".

Current status and tendency in dataware drilling process of the deep oil and gas wells are examined. New ideology of operative getting of the reliable geophysics data without special logging services are presented. General description of the bottomhole remote control system "Parcus", the autonomous inclinometer CI-1, the wireline dipmeter NP-6 and the vibrometer "Vibro" and a field testes results are presented.

Вступ. У наш час методи промислової геофізики, наряду із сейсморозвідкою, є найбільш складними, але і найбільш ефективними при вивченні надр Землі. Серед численних напрямків прикладної геофізики саме промислова геофізика найбільш багата на методи й модифікації досліджень, використовує всі види фізичних полів, оперує широким спектром (від даних буріння до результатів випробувань) вихідної й отриманої у процесі досліджень геофізичної, промислової, петрофізичної та іншої інформації. Справді, складний об'єкт дослідження – дифузна система "свердловина-гірські породи", що змінює свої властивості та параметри в часі та просторі, численні й різнопланові задачі, детальність і точність їхнього розв'язання на всіх етапах пошуку, розвідки, дорозвідки, підрахунку запасів вуглеводнів, розробки й експлуатації нафтогазових родовищ

(аж до їхнього закриття), складні, з малим ступенем свободи, свердловинні умови проведення досліджень – все це робить промислову геофізику не тільки специфічним, але й найбільш інтелектуально насиченим напрямком розвідницької геофізики [4, 5].

Подальший розвиток промислової геофізики, зважаючи на сучасний стан науки й техніки, вимагає розв'язання таких задач:

- розвиток теорії існуючих методів ГДС, розв'язання прямих і обернених задач для умов, максимально наближених до реальної моделі досліджуваного середовища;
- розробка нових методів і модифікацій геофізичних досліджень свердловин, зокрема таких, які дозволяють оперативно одержувати геолого-геофізичну й технологічну інформацію в процесі буріння свердловин;