

УДК 550.8.056

К. Тройніч, асп.
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
ІНІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна
E-mail: k.stan@i.ua

КОМПЛЕКСНА ІНВЕРСІЯ ГЕОФІЗИЧНИХ ДАНИХ ІЗ ЗАЛУЧЕННЯМ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С.А. Вижвою)

У роботі запропоновано оновлений підхід до виконання комплексної інверсії комплексу геофізичних даних на основі моделювання петрофізичних властивостей порід. Рекомендованими для інверсії є дані, насамперед, методів сейсморозвідки та гравірознвдки, проте підхід не має принципових обмежень включення даних інших геофізичних методів (за умови, що зв'язок між геофізичними параметрами існує).

Інверсія даних сейсморозвідки виконується із використанням методу променевої сейсмічної томографії, де мінімізується нев'язка спостережених та змодельованих часів пробігів хвиль. Інверсія даних гравірознвдки виконується розповсюдженням надлишкової густини поміж комірок пропорційно до впливу цих комірок на точку спостереження з метою мінімізації нев'язки спостереженого і змодельованого гравітаційних полів у сенсі найменшої суми квадратів нев'язки. Спільна інверсія даних методів сейсморозвідки та гравірознвдки передбачає наявність функціонального зв'язку між параметрами швидкості пружних хвиль та густини, цей зв'язок встановлюється у результаті моделювання петрофізичних властивостей. Виконання моделювання петрофізичних властивостей здійснюється за допомогою методу умовних моментів для багатоконентного середовища.

Основним результатом роботи є узагальнена схема виконання літологічної інверсії комплексу даних сейсморозвідки та гравірознвдки із врахуванням результатів петрофізичних моделювань. Через складність схеми рекомендовано розглядати її як генералізацію послідовності виконання різних за своєю природою задач, кожна з яких може бути розв'язана декількома методами. У літературі описана значна кількість методів та алгоритмів розв'язання цих задач. У даній статті вказано лише ті, які використовуються автором для практичної реалізації описаного підходу.

Практична значимість запропонованої схеми полягає в можливості здійснення літологічної характеристики розрізу із врахуванням всієї наявної геолого-геофізичної інформації. При цьому результати інверсії даних окремих геофізичних методів узгоджені між собою та відповідають фізичним властивостям порід із заданим діапазоном концентрації мінералів при заданих термобаричних умовах.

Ключові слова: геофізична томографія, інверсія, літологічна інверсія, моделювання

Вступ. Поступово із розвитком технологій та вичерпання родовищ корисних копалин із простою геологічною будовою складність моделей геологічного середовища значно зросла. Це призвело до того, що виникла необхідність враховувати такі фактори, як температура і тиск, напружено-деформований стан, орієнтація систем тріщин, анізотропія тощо. Також на зміну інверсії даних геофізичних методів незалежно один від одного прийшла інверсія комплексу геофізичних даних, що дозволяє значно зменшити неоднозначність вирішення оберненої задачі.

У даній роботі інверсію комплексу геофізичних даних передбачається виконувати за допомогою геофізичної томографії. Класичними роботами з сейсмічної томографії вважаються [7-10]. Історичний огляд розвитку методу сейсмічної томографії подано в роботі [6] з фокусом на області застосування та в роботі [16] з позиції зміни вимог до моделей отриманих в результаті інверсії та розвитку технологій.

Автор спирається в першу чергу на роботи дослідників Київського національного університету імені Тараса Шевченка С.А. Вижви, Г.Т. Продайводи та І.В. Віршила, які зробили значний вклад у розвиток напрямку літологічної інверсії комплексу методів геофізичних даних [1, 2, 4]. Дана робота є розвитком ідеї використання томографії та петрофізичного моделювання для літологічної інверсії комплексу даних сейсморозвідки та гравірознвдки, що викладена в роботі [15], написаній автором спільно з І.В. Віршилом та Б.В. Матвійчуком, та полягає в модифікації запропонованого підходу для можливості його практичної реалізації.

Незважаючи на велику кількість методів спільної інверсії, більшість з них не передбачає врахування зміни значень петрофізичних параметрів з глибиною та тиском, а при визначенні зв'язку між геофізичними параметрами спирається на статистичні дані, які не дають розуміння літологічних особливостей породи.

Основним завданням цієї статті є розробка такого методу спільної інверсії сейсмічних та гравітаційних даних, в якому значення геофізичних параметрів та

зв'язок між ними контролюється результатами моделювання петрофізичних властивостей.

Теорія методу. У попередній публікації з цього напрямку досліджень автор разом із співавторами прийшли до наступної схеми виконання інверсії комплексу сейсмічних та гравітаційних даних на основі моделювання петрофізичних властивостей [15] (рис. 1). Дана схема є інверсією на основі моделі та передбачає ітеративне оновлення моделі першого наближення таким чином, щоб забезпечити найменшу нев'язку спостережених та змодельованих геофізичних даних. Відповідно до задуму процес інверсії ділиться на три етапи: збір геофізичних звітів, результати буріння тощо), побудова моделі першого наближення та підготовка геофізичних даних до інверсії (зняття відліків часів пробігів сейсмічних хвиль, вираховування регіонального гравітаційного фону тощо) та власне інверсії. В роботі [15] пропонується виконувати інверсію оновлюючи значення не геофізичних параметрів, а літологічного складу. Таким чином, забезпечується геологічна "правдивість" інверсії, оскільки можливі значення геофізичних параметрів контролюються допустимією концентрацією мінералів, структурою породи та термобаричними умовами. По суті, рис. 1 пропонує схему інверсії геофізичних даних безпосередньо в літологічну характеристику розрізу.

Згідно з [15], склад породи визначається не лише концентрацією мінералів, але і порового простору, заповненого певним флюїдом. У загальному випадку для інверсії пропонується використовувати метод найменших квадратів із глобальною оптимізацією методом кубічної інтерполяції [15].

Параметри моделі. Досліджуваний підпростір розбивається на набір прямокутних паралелепіпедів – комірок. Комірки можуть бути згруповані у рядки, стовпчики та секції. Секції являють собою вертикальні площини, направлені вхрест напрямку рядків. У випадку двовимірної задачі розглядається одна секція. На рис. 2 зображений приклад секції: висота рядків та ширина стовпчиків задається незалежно, що дозволяє мати

більшу кількість комірок незначного розміру в зоні інтересу без істотного збільшення кількості комірок моделі.

Кожна комірка описується вектором параметрів, таких, як швидкість/повільність, густина, температура, тиск, клас породи, концентрація мінералів, структура порового простору тощо. Не всі параметри відомі в процесі інверсії, проте основний задум полягає в тому, щоб отримати повну літологічну характеристику части-

ни досліджуваного простору в процесі інверсії. Деякі параметри можуть бути обчислені або оцінені на основі інших параметрів. Наприклад, величина літостатичного тиску в комірці може бути оцінена як тиск, який створюють всі вищезалігаючі комірки заданого стовпчика моделі. Значення параметрів у межах комірки можна вважати постійним, або таким, що змінюється за певним законом (залежно від потреб досліджень).

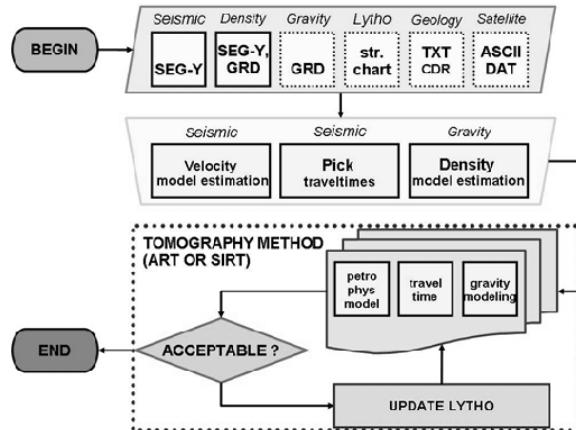


Рис. 1. Схема виконання літологічної інверсії сейсмічних та гравітаційних даних на основі моделювання петрофізичних властивостей за [15]

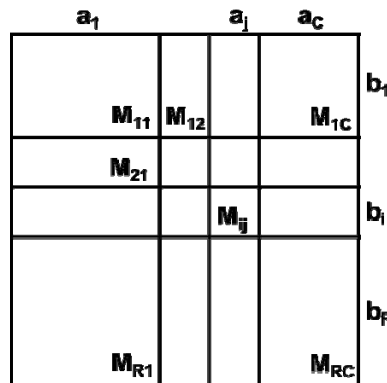


Рис. 2. Поділ секції (двовимірної моделі) на C стовпчиків та R рядків за допомогою нерегулярної сітки: M_{ij} – вектор, що описує набір параметрів моделі в i-му рядку та j-му стовпчику, a_j та b_i – ширина j-го стовпчика та висота i-го рядка відповідно

Інверсія геофізичних даних. Для інверсії геофізичних даних обрано метод томографії, суть якого полягає у відновленні модельної функції на основі проєкцій. Томографічний метод чудово зарекомендував себе при вирішенні великої кількості задач сейсморозвідки, пов'язаних із відтворенням розподілу швидкості або поглинаючих властивостей [6]. Для знаходження розподілу швидкостей пропонується використовувати метод томографічної інверсії часів пробігів сейсмічних хвиль, для якого на кафедрі геофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка було розроблено власний алгоритм, який використовує метод одночасної ітеративної реконструктивної томографії для оновлення швидкісної моделі та теорію мереж для трасування променів через швидкісну модель [5]. Важливою особливістю розробленого алгоритму є те, що під час інверсії положення глибин відбиваючих горизонтів вважається відомим та не змінюється. Тому для коректної інверсії дуже важливо використовувати всю наявну апіорну інформацію, таку як результати буріння, кореляційні схеми тощо.

Для інверсії гравітаційних даних можна використовувати будь-який метод, що здатний дати прийнятні результати для даних геологічних умов та характеру

поля. Наприклад, робота [12] є класичним підходом з інверсії гравітаційних та магнітних даних. Проте використання інверсії гравітаційних даних у вигляді окремої задачі не рекомендується. Набагато достовірніші результати можна отримати в результаті інверсії комплексу гравітаційних та сейсмічних даних. Серед багатьох методів інверсії комплексу геофізичних даних можна виділити одночасну та послідовну інверсію сейсмічних та гравітаційних даних [13]. Автор тяжіє до одночасної інверсії комплексу даних, при якому встановлюється взаємозв'язок між геофізичними параметрами, які отримуються в результаті інверсії.

Моделювання петрофізичних властивостей. Для моделювання значень ефективних геофізичних параметрів заданого речовинного складу та структури можна використовувати метод умовних моментів для багатоконпонентного середовища [3]. На рис. 3 наведено схему моделі багатоконпонентного середовища зі включеннями різної форми, орієнтації та складу, на основі якої розраховуються пружні модулі порід заданого складу та структури під час моделювання [15]. У випадку ізотропної моделі шуканими параметрами будуть густина та два незалежні пружні модулі, через які можна обчислити швидкість пружних хвиль.

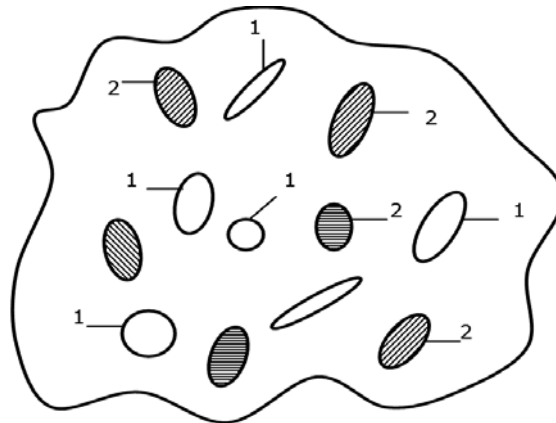


Рис. 3. Схема матрично-текстурної багатокомпонентної моделі порід:
еліпсами з позначкою 1 показано включення з однаковими пружними властивостями, але різної форми, а з позначкою 2 – включення з різними пружними властивостями за [15]

Окрім складу та структури породи, фізичні властивості якої моделюються, необхідно врахувати вплив температури та тиску на зміну оцінюваних геофізичних параметрів. Метод врахування термобаричних умов детально продемонстровано в роботі [11]. Знання пружних модулів, густини та коефіцієнту теплового розширення для всіх компонентів моделі, а також похідних цих параметрів від тиску та температури є необхідним для розрахунків ефективних геофізичних параметрів при заданих термобаричних умовах. Для цих цілей пропонується використовувати таблицю згаданих параметрів та їх похідних [11]. Дана таблиця є компіляцією значної кількості досліджень фізичних властивостей мінералів у різних термобаричних умовах. Окрім пружних властивостей та густини мінералів, також варто враховувати зміну пружних властивостей флюїдів, що заповнюють поровий простір. Як вже згадувалось вище – величина тиску може бути оцінена як тиск, який створюють маси, що залягають вище. Для оцінки температури можуть бути використані дані геофізичних досліджень свердловин або інверсії даних теплового потоку [15].

Нова схема реалізації методу. На рис. 4 наведено схему реалізації літологічної інверсії комплексу геофізичних даних із врахуванням даних петрофізичних властивостей. При побудові цієї схеми було використано модель виконання томографічної інверсії [14] та схему комплексної (joint) інверсії сейсмометричних та гравіметричних даних [13]. У даній схемі під спостереженнями

геофізичними полями розуміють попередньо оброблені та відповідним чином підготовані дані. Для сейсмічної променевої томографії такими даними будуть часи пробігу сейсмічних променів (прямих, відбитих чи заломлених). У випадку гравіметричного методу під спостереженнями будемо розуміти аномальне поле, тобто таке, з якого видалені регіональні поля та прибраний вплив рельєфу та інших факторів. Замість поля сили тяжіння можуть бути використані його трансформаційні перетворення або градієнти (виміряні чи обчислені). Метою петрофізичних моделювань є оцінка можливих значень геофізичних параметрів для заданого діапазону концентрації мінералів та структури порід в певних термобаричних умовах. Замість традиційного використання даних буріння та геофізичних досліджень свердловин для побудови кореляційних зв'язків між літологією та геофізичними параметрами пропонується використовувати ці дані для перевірки коректності літологічної моделі, яка використовується для петрофізичних моделювань. Іншим важливим аспектом петрофізичних моделювань є встановлення функціонального зв'язку між окремими геофізичними параметрами. Цей зв'язок є основою отримання коректних поправок до параметрів моделі з метою зменшення нев'язки між спостереженими та змодельованими даними таким чином, щоб значення геофізичних параметрів не суперечили один одному на етапі літологічної інверсії.

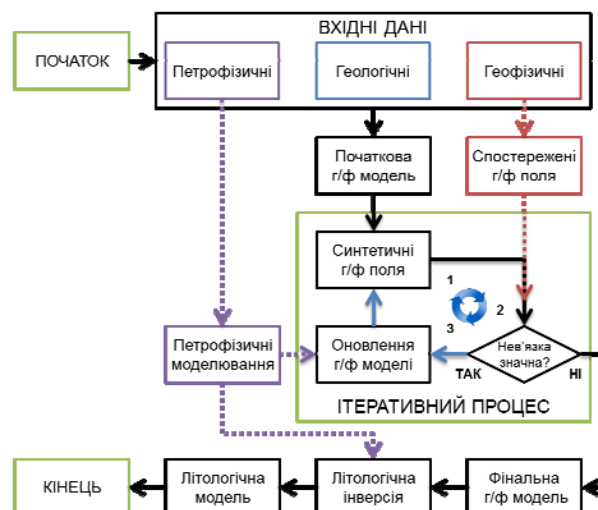


Рис. 4. Схема літологічної інверсії комплексу геофізичних даних на основі петрофізичного моделювання:
суцільними лініями показано основну послідовність виконання інверсії,
пунктирними – спосіб використання окремих категорій вхідних даних на різних етапах інверсії

Основна відмінність від схеми, зображеної на рис. 1, полягає в тому, що розрахунок петрофізичних властивостей та взаємозв'язків між значеннями петрофізичних параметрів винесено за межі ітеративного циклу оновлення моделі, так само, як і літологічну інверсію, яка тепер виконується один раз наприкінці інверсії. Дана схема є значним відходом від основної ідеї роботи [15], що полягає саме у виконанні інверсії геофізичних даних шляхом оновлення літологічного складу. Таким чином, мав забезпечуватись геологічний сенс інверсії (геофізичні параметри ніколи не набудуть значень, які є неможливими для порід заданого складу та структури в заданих термобаричних умовах). Також в роботі [15] стверджується, що виконання інверсії на основі літологічного складу також має на меті унеможливити ймовірність того, що отримані геофізичні параметри можуть відповідати різному літологічному складу, у випадку, якщо геофізичні поля інвертувались незалежно та без врахування петрофізичних даних. Автор цілком погоджується з цими положеннями, але працюючи над втіленням цього теоретичного задуму в життя, дійшов висновку, що виконання моделювання значень ефективних геофізичних параметрів та літологічної оптимізації на кожній ітерації для кожної комірки моделі робить такий підхід занадто трудомістким з точки зору обчислювальної складності та обчислювальних потужностей, необхідних для розв'язання задачі інверсії у прийнятний проміжок часу. Схема на рис. 4 забезпечує обидва зазначені фактори – геологічний сенс та непротиріччя геофізичним параметрам за рахунок петрофізичного моделювання, результати якого виступають у ролі обмежень можливих значень геофізичних параметрів, та їх непротиріччя під час ітеративного оновлення геофізичних параметрів, а також основою для інверсії геофізичних параметрів у літологічний склад на заключному етапі інверсії. Таким чином, досягається суттєве зменшення кількості обчислень із збереженням ролі петрофізичного моделювання в процесі інверсії.

Висновки. В даній роботі запропоновано новий підхід до виконання літологічної інверсії комплексу даних геофізичних методів із використанням томографії та результатів петрофізичних моделювань. Даний підхід дозволяє враховувати можливі значення геофізичних параметрів для заданого діапазону концентрації мінералів та термобаричних умов. При цьому петрофізичні моделювання та літологічна інверсія виконуються лише один раз за межами ітеративного циклу, що дозволяє значно виграти в часі обчислень.

Список використаних джерел

1. Вижва С. А. Геофізичний моніторинг небезпечних геологічних процесів / С. А. Вижва. – Київ: Обрії, 2004. – 234 с.
2. Вижва С. А. Методологічні і теоретичні принципи сейсмогравітаційної томографії / С. Вижва, Г. Продайвода, І. Віршило // Вісник Київського університету. Геологія. – 2010. – Вип. 48. – С. 29-33.
3. Продайвода Г. Т. Математичне моделювання геофізичних параметрів: Навчальний посібник / Г. Т. Продайвода, С. А. Вижва. – К.: ВЦ "Київський університет", 1999. – 112 с.
4. Сейсмогравітаційний метод визначення мінерального складу геологічного середовища / Г. Т. Продайвода, І. В. Віршило, О. А. Козіонова, Т. Г. Продайвода // Вісник Київського університету. Геологія. – 2005. – Вип. 34-35. – С. 58-61.
5. Тройніч К. С. Ефективний алгоритм сейсмічної променевої томографії при обробці великих масивів сейсмічних даних / К. С. Тройніч, С. А. Вижва // Вісник Київського університету. Геологія. – 2014. – Вип. 3(66). – С. 77-82.
6. Тройніч К. С. Геофізична томографія: сучасний стан та перспективи впровадження для розв'язання задач нафтогазової геології / К. С. Тройніч, Б. В. Матвійчук, С. А. Вижва // Вісник Київського університету. Геологія. – 2014. – Вип. 4(67). – С. 59-63.

7. Aki K. Quantitative Seismology. Theory and Methods. Vol. II / K. Aki, P. G. Richards [ed. W. H. Freeman]. – San Francisco, 1980. – 373 p.
8. Anderson D. L. Seismic tomography / D. L. Anderson, A. M. Dziewonski // Scientific American. – 1984. – № 10. – P. 60-68.
9. Tomographic determination of velocity and depth in laterally varying media / T. N. Bishop, K. P. Bube, R. T. Cutler et al. // Geophysics. – 1985. – № 50(6). – P. 903-923.
10. Chiu S. K. L. Tomographic determination of three-dimensional seismic velocity structure using well logs, vertical seismic profiles, and surface seismic data / S. K. L. Chiu, R. R. Stewart // Geophysics. – 1987. – № 8. – P. 1085-1098.
11. Hacker B. R. Subduction Factory 3: An Excel worksheet and macro for calculating the densities, seismic wave speeds, and H₂O contents of minerals and rocks at pressure and temperature / B. R. Hacker, G. A. Abers // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2004. – № 1. – P. 1-7.
12. Li Y. 3-D inversion of gravity data / Y. Li, D. W. Oldenburg // Geophysics. – 1998. – № 63(1). – P. 109-119.
13. Lines L. R., Schultz A. K., Treitel S. Cooperative inversion of geophysical data / L. R. Lines, A. K. Schultz, S. Treitel // Geophysics. – 1998. – № 1. – P. 8-20.
14. Lo T. Fundamentals of Seismic Tomography / T. Lo, P. Inderwiessen // SEG, Geophysical Monograph Series. – 1994. – 187 p.
15. Virshylo I. From traveltimes to composition: a new inversion algorithm for seismic and gravity data / I. Virshylo, K. Troinich, B. Matviichuk // 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. – 2014. – P. 451-458.
16. Woodward M. J. A decade of tomography / M. J. Woodward, D. Nichols, O. Zdraveva et al. // Geophysics. – 2008. – № 73(5). – P. VE5-VE11.

References

1. Vyzhva, S.A. (2004). *Geofizychnyy monitoryng nebezpechnykh geologichnykh protsesiv*. Kyiv: Obriyi, 234 p. [in Ukrainian].
2. Vyzhva, S., Prodayvoda, G., Virshylo, I. (2010). Metodologichni i teoretychni pryntsyipy seysmogravitatsiynoyi tomografiiy. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 48, 29-33. [in Ukrainian].
3. Prodayvoda, G.T., Vyzhva, S.A. (1999). *Matematychnye modelyuvannya geofizychnykh parametriv*. Kyiv: VTS "Kyivskiy universytet", 112 p. [in Ukrainian].
4. Prodayvoda, G.T., Virshylo, I.V., Kozionova, O.A., Prodayvoda T.G. (2005). Seysmogravitatsiyniy metod vyznachennya mineralnogo skladu geologichnogo seredovyscha. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 34-35, 58-61. [in Ukrainian].
5. Troynich, K.S., Vyzhva, S.A. (2014). Efektyvnyy algoritm seysmichnoyi promenevoyi tomografiiy pry obrobtsi velikykh masyviv seysmichnykh danykh. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 3(66), 77-82. [in Ukrainian].
6. Troynich, K.S., Matviichuk, B.V., Vyzhva, S.A. (2014). Geofizychna tomografiya: suchasnyi stan ta perspektyvy vprovadzhennya dlya rozvyazannya zadach naftogazovoyi geologiiy. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 4(67), 59-63. [in Ukrainian].
7. Aki, K., Richards, P.G. (1980). *Quantitative Seismology. Theory and Methods*. (Vol. II). W.H. Freeman (Ed.). San Francisco, 373 p.
8. Anderson, D.L., Dziewonski, A.M. (1984). Seismic tomography. *Scientific American*, Oct., 60-68.
9. Bishop, T.N., Bube, K.P., Cutler, R.T., Langan, R.T., Love, P.L. et al. (1985). Tomographic determination of velocity and depth in laterally varying media. *Geophysics*, 50(6), 903-923.
10. Chiu, S.K.L., Stewart, R.R. (1987). Tomographic determination of three-dimensional seismic velocity structure using well logs, vertical seismic profiles, and surface seismic data. *Geophysics*, 8, 1085-1098.
11. Hacker, B.R., Abers, G.A. (2004). Subduction Factory 3: An Excel worksheet and macro for calculating the densities, seismic wave speeds, and H₂O contents of minerals and rocks at ressure and temperature. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 1, 1-7.
12. Li, Y., Oldenburg D.W. (1998). 3-D inversion of gravity data. *Geophysics*, 63(1), 109-119.
13. Lines, L.R., Schultz, A.K., Treitel, S. (1988). Cooperative inversion of geophysical data. *Geophysics*, 1, 8-20.
14. Lo, T., Inderwiessen P. (1994). Fundamentals of Seismic Tomography. *SEG, Geophysical Monograph Series*, 187 p.
15. Virshylo, I., Troinich, K., Matviichuk, B. (2014). From traveltimes to composition: a new inversion algorithm for seismic and gravity data. (pp. 451-458). 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 2014.
16. Woodward, M.J., Nichols, D., Zdraveva, O., Whitfield, P., Johns, T. (2008). A decade of tomography. *Geophysics*, 73(5), VE5-VE11.

Надійшла до редколегії 23.11.15

K. Troinich, Postgraduate Student
Institute of Geology, Taras Shevchenko National University of Kyiv
90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022 Ukraine
E-mail: k.stan@i.ua

SIMULTANEOUS GEOPHYSICAL DATA INVERSION WITH USING PETROPHYSICAL PROPERTIES MODELING

Revised approach of joint inversion of geophysical data set carried out on the base of petrophysical properties modeling is proposed. Seismic and gravity data are recommended to be inverted. But proposed approach does not have any restrictions on using other geophysical methods (relation between geophysical parameters should exist).

Inversion of seismic data is performed by using seismic tomography with ray approximation. The method is used to minimize mismatches between observed and estimated traveltimes. Gravity inversion is made by density distribution proportionally to cell influence on observation point in order to minimize mismatches between observed and estimated gravity in least squares sense. Simultaneous inversion of seismic and gravity data is possible only if functional relation between velocity and density exists. This relationship should be established with using petrophysical properties modeling. A petrophysical property modeling are performed by using method for multicomponent media.

The main result of this paper is making of generalized scheme of lithological inversion via simultaneous inversion of seismic and gravity data and petrophysical modeling. The scheme could be treated as a set of independent problems of different nature. Each problem could be solved by various methods. A lot of other methods are widely known and their description might be found in scientific and technical publications. In this paper author describes only those methods which have been used for implementation of the proposed approach.

The practical importance of described approach is a possibility to perform lithological inversion with taking into account all available geophysical and geological data. Inversion results are also satisfy all the geophysical data (inversion results of different geophysical data sets used separately could contradict each other).

Keywords: geophysical tomography, inversion, lithological inversion, modeling.

К. Тройнич, асп.
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина
E-mail: k.stan@i.ua

КОМПЛЕКСНАЯ ИНВЕРСИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

В работе предлагается обновленный подход к исполнению инверсии комплекса геофизических данных на основе моделирования петрофизических свойств пород. Рекомендованными к инверсии являются данные, в первую очередь, методов сейсморазведки и гравиразведки, однако данный подход не имеет принципиальных ограничений для включения данных других геофизических методов (при условии существования связи между геофизическими параметрами).

Инверсия данных сейсморазведки выполняется с применением метода сейсмической томографии, где минимизируется невязка между наблюдаемыми и смоделированными временами пробега сейсмических лучей. Инверсия данных гравиразведки выполняется путем распространения избыточной плотности между ячейками пропорционально влиянию этих ячеек на точку наблюдения с целью минимизации невязки наблюдаемого и смоделированного гравитационных полей в смысле наименьшей суммы квадратов невязки. Комплексная инверсия данных методов сейсморазведки и гравиразведки предполагает наличие функциональной связи между параметрами скоростей упругих волн и плотности. Эта связь устанавливается в результате моделирования петрофизических свойств. Выполнение моделирования петрофизических свойств выполняется с помощью метода условных моментов для многокомпонентной среды.

Основным результатом работы является обобщенная схема выполнения литологической инверсии комплекса данных сейсморазведки и гравиразведки с учетом результатов петрофизических моделирований. Из-за сложности схемы, ее рекомендуется рассматривать как обобщение решения последовательности разных по своей природе задач, каждая из которых может быть решена несколькими методами. В литературе описана значительная часть методов и алгоритмов решения упомянутых задач. В данной статье упоминаются лишь те, которые используются автором для практической реализации описанного подхода.

Практическая значимость предложенного подхода заключается в возможности осуществления литологической характеристики разреза с учетом всей известной геолого-геофизической информации. При этом результаты инверсии данных отдельных геофизических методов согласованы между собой и отвечают физическим свойствам пород с заданным диапазоном концентрации минералов при определенных термобарических условиях.

Ключевые слова: геофизическая томография, инверсия, литологическая инверсия, моделирование.