

УДК 550.83.01

К. Тройніч, асп.
Email: k.stan@i.ua,Б. Матвійчук, асп.
Email: molotokhammer@bigmir.net,С. Вижва, д-р геол. наук, проф.
Email: vsa@univ.kiev.ua,Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

ГЕОФІЗИЧНА ТОМОГРАФІЯ: СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ НАФТОГАЗОВОЇ ГЕОЛОГІЇ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром фіз.-мат. наук, проф. Б. П. Масловим)

Розглядаються сучасні підходи до застосування методу сейсмічної томографії – інструменту розв'язання оберненої задачі геофізики. Основну увагу приділено застосуванню геофізичної томографії для вирішення завдань нафтогазової промисловості на всіх етапах життя родовищ.

Показано, що даний метод може бути успішно використаний для інверсії пружних та електричних параметрів, анізотропії тощо. Тривимірний розподіл геофізичних параметрів у середовищі, що досліджується, отриманий за допомогою томографії, може бути використаний для переходу до геологічних (літологічних) параметрів, таких як мінеральний склад, структурно-текстурні особливості, пористість, тріщинуватість.

Запропоновано один із можливих варіантів отримання за допомогою інверсії не геофізичних, а безпосередньо літологічних параметрів. Також показано, що томографію можна використовувати для апроксимації даних геофізичних досліджень свердловин у міжсвердловинному просторі.

Ключові слова: інверсія, геофізична томографія, літологічна томографія, методологія геофізичних досліджень.

Вступ. Останніми роками спостерігається тенденція до залучення родовищ нафти та газу з усе складнішою геологічною будовою у зв'язку з виснаженням родовищ, приурочених до традиційних пасток вуглеводнів. Як наслідок, вимоги до роздільної здатності та кількості параметрів, що характеризують геолого-геофізичні моделі, постійно зростають. Це ставить перед геологами та геофізиками нове завдання, успішне подолання якого потребує безперервного вдосконалення існуючих методів досліджень з використанням усього потенціалу сучасних технологій та новітніх наукових досягнень.

Крім цього, усе більш актуальним постає питання отримання геологічних параметрів на базі геофізичних даних. У цьому напрямку широко застосовується інверсія геофізичних даних, тобто оцінка розподілу геофізичних параметрів на основі спостережених геофізичних полів. Проте геофізичні параметри, отримані на основі більшості методів інверсії, не дають повного уявлення про геологічні параметри (мінеральний склад, літологічні та структурно-текстурні особливості тощо) середовища. Наявна геологічна інформація, отримана прямими методами (дослідження керна, шламу), часто носить дуже обмежений характер через високу вартість її отримання та супроводжується похибками, пов'язаними з руйнуванням породи під час відбору зразків. Тому завдання отримання геологічних характеристик на основі даних геофізичних методів набуває все більшої актуальності.

У ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка ведуться власні розробки з отримання літологічних характеристик на основі даних геофізичних методів. Сьогодні технічний прогрес дозволяє поступово наблизитися до розв'язання задач літотомографії в режимі реального часу і автори сподіваються зробити свій внесок у вирішення обернених поліпараметричних задач.

За тридцятирічну історію розвитку томографії даний метод набув широкої популярності, а коло завдань, що вирішуються за його допомогою, значно розширилося [41]. Серед піонерних можна виділити роботи Акі, Richards [7], Anderson, Dziewonski [8], Bishop et al. [11], Shiu, Stewart [18]. Принципи, закладені в цих роботах, залишаються незмінними й сьогодні. З 80-х рр. XX ст у рамках виконання фундаментальних і прикладних досліджень у Київському університеті почалася розробка теоретичних і методологічних основ геофізичної томографії. Зокрема, під керівництвом Ю. В. Тімошина роз-

роблено ряд технологій сейсмічної томографії на основі використання даних свердловинної та наземної сейсморозвідки [5]. У подальшому в роботах Г. Т. Продайводи, С. А. Вижви, І. В. Віршила розроблено алгоритми та спеціалізоване програмне забезпечення для інверсії ультразвукових, акустичних і сейсмічних даних з урахуванням структури пустотного простору, мінералогічного складу, складу пустотних наповнювачів, анізотропії, напружено-деформованого стану та нелінійних ефектів [1].

Серед методів інверсії геофізичних даних, на думку авторів статті, найбільший потенціал має геофізична томографія. Найширшого застосування з-поміж різновидів томографії сьогодні набула сейсмічна томографія, що пов'язано з провідною роллю сейсморозвідки як найбільш розвинутого та затратного методу геофізичних досліджень. Її використовують для глибинних перетворень, міграційних процедур, оцінки Q-фактора, побудови швидкісної моделі, вивчення підсолевих покладів тощо. Серед несейсмічних методів томографія застосовується для інверсії даних георадара, методів геофізичних досліджень свердловин, ВСГП, електричних методів і гравімагнітних полів. Проте напрям застосування геофізичної томографії для отримання літологічної характеристики розрізу на основі геофізичних даних наразі розвинутий слабо.

Метою статті є аналіз вітчизняних і зарубіжних публікацій, що стосуються геофізичної томографії, для виділення напрямку, який є актуальним, але не розроблений повною мірою. Такий аналіз є дуже важливим, оскільки в ННІ "Інститут геології" в межах наукової програми досліджень ведуться активні розробки алгоритму літологічної томографії. Отже, аналіз існуючих сучасних підходів до розв'язання оберненої задачі геофізики з метою отримання літологічної характеристики розрізу дасть змогу визначити їхні переваги і недоліки та пересвідчитись, що підходи, які розробляються на геологічному факультеті, ще не застосовувались.

Для збереження послідовності викладу матеріалу огляд буде згрупований за завданнями, які розв'язуються. Причому основну увагу буде приділено завданням, пов'язаним з пошуками та розробкою вуглеводнів.

Геофізична томографія. Основні аспекти. Геофізична томографія базується на фундаментальних математичних положеннях. В її основі лежить теорема Радона, яка встановлює зв'язок між функцією (параме-

трами середовища) та її проекціями (інтегралами параметрів) [22, 29]. Багато методів сейсмічної томографії мають тісні зв'язки з більш звичними методами сейсмічної візуалізації, такими як інверсія часу проходження (traveltime inversion), міграція Кірхгофа та інверсія Борна (Born inversion) [32]. Наприклад, сейсмічна променева томографія, що використовується для визначення пружних швидкостей, є формою інверсії пробігу, а сейсмічна дифракційна томографія тісно пов'язана з інверсією Борна і сейсмічною міграцією. Таким чином, сейсмічна томографія – це фактично ще один різновид відтворення будови геологічного середовища, який геофізики вже використовують протягом багатьох років.

Сейсмічна томографія застосовується для широкого кола завдань у нафтовій промисловості на різних стадіях розвитку родовищ, починаючи з розвідки і до розробки та видобутку. Тематичні дослідження показують, що сейсмічна томографія може доповнювати звичайні сей-

смічні методи і забезпечує унікальну, раніше недоступну, інформацію про геологічну будову [31]. Томографія, застосована до сейсмічних даних, дає можливість створювати моделі сейсмічних швидкостей для розв'язання задач сейсморозвідки. Ці швидкісні моделі можуть, у свою чергу, бути використані як додаткова інформація для геостатистичної інтерполяції даних каротажу між свердловинами.

Використання томографії при міжсвердловинних дослідженнях. Швидкий розвиток томографії, особливо у сфері міжсвердловинних досліджень, пов'язаний з можливістю отримання інформації високого ступеня достовірності на недосяжних для класичних методів відстанях [34]. Дана теза проілюстрована на рис. 1. Наведено модель геологічного середовища, яка чудово ілюструє переваги міжсвердловинної томографії при дослідженні пласта-колектора.

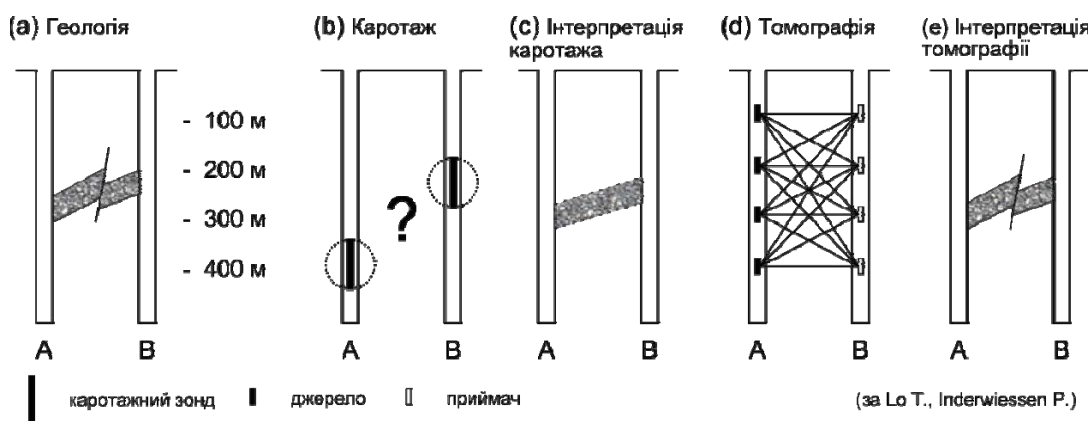


Рис. 1. Переваги використання томографії перед ГДС [32]:

а – реальна модель геологічного середовища; б – можливості стандартних методів ГДС; с – інтерпретація методів ГДС з використанням лінійної інтерполяції; д – схема проведення міжсвердловинної геофізичної томографії; е – результат геофізичної томографії

Спираючись на дані ГДС відносно невеликої глибини (рис. 1, б), можна провести лише лінійноподібну інтерпретацію, адже геометрія пласта простежується лише на невеликій відстані від ствола свердловини (рис. 1, с). На рис. 1, д зображено конфігурацію системи джерело-приймач для проведення томографії між свердловинами А та В. Залежно від відстаней між свердловинами, кількості датчиків та відстаней між ними, можна отримувати моделі різної роздільної здатності, а отже вирішувати задачі різних масштабів. При порівнянні інтерпретації томографії (рис. 1, е) та інтерпретації ГДС (рис. 1, с) можна легко показати, що відсутність інформації на більшій частині простору не дозволяє робити достовірні висновки про будову геологічного середовища, спираючись на дані ГДС. Наявність розлому між свердловинами А та В може призвести до неприємних наслідків, особливо при розробці пласта-колектора методами інтенсифікації видобутку.

Історично вперше [12] метод томографії був застосований за даними міжсвердловинних досліджень. У цьому випадку відносно невеликі масштаби, достовірні дані ГДС і можливість повного покриття досліджуваного об'єкта променями під різними кутами дозволяли отримувати однозначний результат [13]. Розглянуто як можливі конфігурації свердловин, так і використання томографії для різних параметрів [23]. Результатом стала запропонована одночасна інверсія двох і більше параметрів (joint inversion) [30, 45]. Використання сейсмічної томографії для міжсвердловинних досліджень дозволяє на порядок покращити уявлення про просторове положення досліджуваного пласта, а також виявити наявні

розломи, зони високої тріщинуватості тощо. Ця інформація особливо цінна для пластів колекторів, до яких необхідне застосування інтенсифікації видобутку (бітумінозні пісковики, низькопористі карбонати, сланцеві товщі та ін.). Результатом міжсвердловинної сейсмічної томографії є отримання зображення сейсмічної структури між свердловинами, яке неможливо одержати класичними методами каротажу, адже методи ГДС мають досить обмежену глибинність, а тому міжсвердловинний простір може бути лише результатом певного виду (у т. ч. лінійної) інтерполяції [32].

Методика проведення електричної резистивної (питомого опору) томографії (ЕРТ) описана в роботі [20]. Наведено розрахунки прямої задачі, концепцію проведення дослідження в міжсвердловинній конфігурації, а також ітеративний алгоритм обчислення томограми. Варто зауважити, що оптимальний розв'язок особливо сильно залежить від кількості ітерацій, підвищення кількості яких може виразитися як у покращанні якості зображення, так і в підвищенні рівня артефактів. Оптимальна кількість ітерацій залежить від природи артефактів і характеристик розподілу питомого опору.

У 90-і рр. було опубліковано групу робіт з теоретичних основ міжсвердловинної електромагнітної (ЕМ) томографії, а також розробки апаратної частини методу [9, 27]. Один із методів використовує томографію через перетворення дифузійних ЕМ полів у хвильові поля. Щоправда, задача перетворення полів не має стійкого розв'язку і потребує відповідної схеми регуляризації. Тому в роботі [27] запропоновано спрощений метод на базі апроксимації, який дозволяє відтворювати структуру роз-

поділу питомого опору/провідності досліджуваного середовища. Даний метод має свої недоліки, які пов'язані з високою чутливістю до відстані між антеною та тілом, що досліджувалося, породжує артефакти в результаті високої наведеної індуктивності при близькому взаємному розташуванні та низькому питомому опорі тіла/розрізу.

Подальший розвиток ЕМ томографія отримала в роботі [14]. Запропоновано використання одразу групи частот та описано застосування ЕМ томографії з використанням двох частот. За допомогою такого підходу було отримано результати без артефактів, тобто проблема вторинної індуктивності високопровідних середовищ була повністю розв'язана. Крім цього, спостерігається підвищення роздільної здатності порівняно з одночастотними дослідженнями.

Використання томографії в сейсморозвідці. Томографічну інверсію можна застосовувати не лише для даних міжсвердловинного прозвучування, але й даних поверхневої сейсморозвідки. Для цього розроблено спеціальні методи, що не передбачають повного покриття моделі променями з широким діапазоном азимутів спостережень [19]. Розрізняють багато різних модифікацій цього методу, які можна звести до двох великих груп: променевої [36] та дифракційної томографії [40, 42]. Як вхідні дані для цих двох груп методів використовуються часи пробігів хвиль і повне хвильове поле відповідно.

За допомогою сейсмічної томографії вирішується велика кількість задач, суть яких найчастіше зводиться до визначення швидкісної моделі. Серед великої різноманітності методів сейсмічної томографії найкраще зарекомендував себе метод томографії на основі трасування сейсмічних променів і зменшення нев'язки між спостереженими часами та часами пробігів хвиль. На думку авторів [28, 30–31], трасування променів є компромісом між якістю результатів, вартістю досліджень і затracеним часом. У фундаментальній роботі [11] наводиться опис алгоритму відновлення швидкісної моделі середовища, швидкісні параметри якого змінюються як по вертикалі, так і по латералі. Даний підхід дав набагато кращі результати порівняно з іншими тогочасними алгоритмами, які припускали, що варіації швидкості можливі лише по глибині [37]. Пізніше, у роботах [38], модель була розширена таким чином, щоб враховувати не лише латеральні варіації швидкості, але й анізотропію.

У подальшому сейсмічна томографія розвивалась у таких напрямках [41]: перехід від маленьких моделей до великих, від вузького діапазону азимутів до широкого, від ізотропних моделей до анізотропних. Також багато уваги було приділено питанню трасування променів [10, 17, 26, 39] та збільшенню стійкості розв'язку задач у випадку недостатнього покриття моделі сейсмічними променями [35, 44, 46–47]. Інший напрям розвитку сейсмічної томографії полягає у зменшенні часу обчислень [6, 21] і створенні моделі з меншою кількістю параметрів, що знижує ціну застосування томографії (менш потужні обчислювальні системи та менший час оренди серверів). Проте всі ці дослідження ніяк не змінюють суті задач – визначення розподілу швидкості. Лише потім, на більш пізніх етапах обробки, відбувається інверсія швидкостей в такі геофізичні параметри, як густина та пружні сталі, а також такі характеристики, як пористість і проникність [31] або навіть літологічний склад та інші геофізичні параметри [2–4, 33].

Важливим аспектом лишається те, що існують різні підходи до включення геологічних структур у модель. У частині з них томографія оновлює тільки швидкісну модель, не змінюючи геометрії пластів, але деякі дослідники [38] в алгоритм томографії закладають одночасно і геометрію відбивних горизонтів. Таким чином, не-

в'язка пробігу часу може зменшуватись не лише за рахунок швидкостей, але й за рахунок зміни товщини пластів.

Широко розвивається започаткований напрям томографії [18], в якому розглядається інтегрування каротажних даних, даних ВСП і сейсморозвідки для отримання оптимальної структурної моделі з глибиною. Використання поверхневої сейсморозвідки забезпечує покриття на великій площі, а ВСП та/або каротажні дані забезпечують граничні умови, які необхідні для розв'язання проблеми багатозначності даних сейсморозвідки. ВСП дослідження на різних офсетах використовуються для обчислення швидкостей поперечно-ізоотропного середовища. Використовуючи томографічну інверсію каротажу, ВСП та сейсміки, отримують геологічну модель (глибинну), яка добре узгоджується з акустичним каротажем і даними сейсморозвідки після стандартної 3D обробки сейсмічних даних.

Як відомо, сейсмічні дослідження показують геологічні об'єкти в подвійному часі пробігу сейсмічної хвилі, що не має жодного сенсу для геологів. Отже, постає важливе питання правильного відображення сейсмічних відбиттів у глибинному геологічному просторі. Це задача надзвичайно складна, оскільки для того, щоб правильно знайти місцеположення сейсмічних відбиттів у просторі, треба розв'язувати хвильове рівняння та простежувати шлях сейсмічної енергії від джерела до приймачів, враховуючи рефракцію, дифракцію, поглинання енергії тощо. Така задача дуже просто вирішується за допомогою томографії, оскільки сама суть томографії передбачає відновлення розповсюдження сейсмічної енергії у просторі. Існує велика кількість робіт [24–25, 43], в яких томографія використовується для вирішення задачі правильного відображення положень відбивних горизонтів у просторі.

Швидкісна модель, яка була отримана в результаті інверсії за допомогою сейсмічної томографії, може бути безпосередньо використана для здійснення перетворення час–глибина. Така опція доступна в сучасному програмному забезпеченні для інтерпретації геологічних даних, таких як Petrel, у вигляді стандартної функції.

З іншого боку, швидкісна модель, отримана за допомогою томографії, може бути використана як вхідні дані для глибинної міграції [29]. Такий підхід користується великою популярністю, оскільки дозволяє створити замкнений цикл оновлення структурної моделі: на основі томографії трасується відбиття та оновлюється швидкісна модель. Отримані швидкості дозволяють знайти уточнене положення відбивних поверхонь, що, у свою чергу, дозволяє краще змодельувати шлях розповсюдження сейсмічних відбиттів. Ми вже зазначали, що деякі дослідники [38] замість ітеративного процесу створюють розрахункові схеми, які одночасно обчислюють положення відбивних горизонтів і швидкість у межах шарів.

Іншим важливим аспектом обробки даних сейсморозвідки є знаходження статичної поправки або уточнення існуючої поправки за наявності даних просторового розміщення сейсмопрофільів достатньої якості. Ця задача також успішно вирішується за допомогою томографії. У роботі [16] для обчислення статичної поправки використовується тривимірна модель, через яку проходять прямі, відбиті та заломлені промені. Одночасне використання всіх можливих видів променів дозволяє дуже впевнено побудувати приповерхневу модель середовища.

Томографія дозволяє інвертувати не лише часи пробігів хвиль, але й їхні амплітуди. Тобто даний метод спроможний розраховувати коефіцієнти поглинання середовища [38]. Оскільки з коефіцієнтами поглинання тісно пов'язана втрата частот з глибиною (що зменшує

роздільну здатність сейсморозвідки), то введення поправок за поглинання (Q-компенсація) стає окремим важливим завданням. У роботі [15] показано один із можливих варіантів вирішення цієї задачі.

Як видно з наведених публікацій, усе частіше томографія застосовується як основний метод для аналізу швидкостей як у міжсвердловинних дослідженнях, так і даних наземної сейсморозвідки, існує декілька методів аналізу швидкостей відбиттів. Зрештою, стало можливим використання великої кількості параметрів для застосування в задачах томографії, що гарантує поширення застосування геофізичної томографії в майбутньому.

Проблеми та перспективи розвитку методу. Основна ідея літологічної томографії полягає в тому, щоб, маючи дані непрямих і прямих спостережень у певних ділянках простору, перенести параметри, вимірні прямими методами (або оцінені непрямими методами з високим ступенем достовірності) на ті області, де наявні дані лише непрямих методів [33]. Це можливо лише у випадку, коли буде встановлено зв'язок між тими параметрами, що ми можемо виміряти, та тими, що ми хочемо отримати в результаті наших досліджень. Так чи інакше, це можливо, оскільки в арсеналі дослідника є закони природи, які визначають ці зв'язки. Крім цього, велика кількість параметрів у геофізиці має кореляційні зв'язки та може бути пов'язана статистичними законами з необхідною точністю.

Значну роль у літологічній інверсії геофізичних даних відіграє математичне моделювання ефективних пружних параметрів геологічного середовища з урахуванням мінералогічного складу, структурно-текстурних особливостей, пористості та тріщинуватості, функції розподілу напружено-деформованого стану, нелінійних ефектів, анізотропії в триклінному наближенні [1, 3]. Лише врахувавши всі зазначені фактори, можна визначити зв'язки між геофізичними параметрами та літологічним складом. На основі цих зв'язків можна виконувати оцінку літологічної характеристики розрізу за спостереженими геофізичними полями.

У випадку неможливості побудови функціональних зв'язків між літологічними та геофізичними параметрами середовища можна використовувати методи статистичного моделювання (метод Монте-Карло тощо).

Складність задач літологічної томографії полягає в різноманітності характеристик гірських порід. Розв'язок задачі літологічної томографії на сьогоднішній день можливий лише з використанням порід з вузьким діапазоном значень геофізичних параметрів, а отже, необхідно досконало вивчити породи, що представлені на геологічному розрізі досліджуваної ділянки. При виконанні цих умов розв'язок наближається до єдиної літологічної моделі геологічного середовища.

Висновки. Велика кількість задач, що успішно вирішується за допомогою геофізичної томографії, є неспростовним доказом потенціалу даного методу. Проте, на думку авторів статті, потенціал геофізичної томографії повністю не розкритий, оскільки даний метод ще не знайшов широкого застосування в дослідженні літологічної характеристики середовища. Літологічна інверсія даних комплексу геофізичних методів з використанням томографії можлива при її поєднанні з математичним моделюванням ефективних геофізичних параметрів і геостатистикою.

Саме в названому поєднанні методів досліджень автори бачать реальну можливість оцінки кількісної характеристики, зокрема речовинного складу та структурно-текстурних особливостей геологічного середовища. Вирішення цих завдань є метою наступних досліджень авторів. Подальший розвиток даних ідей

знайде своє відображення в розробці сучасних алгоритмів обрахунку томографії для вирішення геофізичних задач та отримання результатів інтерпретації безпосередньо в літологічних параметрах.

Список використаних джерел

1. Вижва С. А. Геофізичний моніторинг небезпечних геологічних процесів / С. А. Вижва. – К.: Обрії, 2004. – 234 с.
2. Vyzhva S.A., (2004). Geophysical monitoring of hazardous geological processes. Kyiv: Obryi, 234. (In Ukrainian)
3. Вижва С. А. Гравімагнітна томографія: становлення і перспективи розвитку / С. А. Вижва, Г. Т. Продайвода, П. І. Гришук // Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Т. Г. Шевченка. Сер. Геологія. – 2010. – № 48. С. 33–35.
4. Vyzhva S.A., Prodayvoda G. T., Gryshchuk P.I., (2010). Gravimagnetic tomography: formation and prospects of development. Visnyk of Kyiv university: Geology, 48, 33-35. (In Ukrainian)
5. Вижва С. А. Методологічні і теоретичні принципи сейсмогравітаційної томографії / С. А. Вижва, Г. Т. Продайвода, І. В. Віршило // Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Т. Г. Шевченка. Сер. Геологія. – 2010. – № 48. С. 29–33.
6. Vyzhva S.A., Prodayvoda G.T., Virshylo I.V., (2010). Methodological and theoretical principles of seismic-gravity tomography. Visnyk of Kyiv university: Geology, 48, 29-33. (In Ukrainian)
7. Продайвода Г. Т. (2005). Сейсмогравітаційний метод визначення мінералогічного складу геологічного середовища / Г. Т. Продайвода, І. В. Віршило, О. А. Козіонова, Т. Г. Продайвода // Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Т. Г. Шевченка. Сер. Геологія. – № 34/35. – С 58–61.
8. Prodayvoda G.T., Vyzhva S.A., Virshylo I.V., Kozionova O.A., Prodayvoda T.G., (2005). Seismic-gravity method for determining the mineralogical composition of geological environment. Visnyk of Kyiv university: Geology, 34/35, 58-61 (In Ukrainian).
9. Тимошин Ю. В. Импульсная сейсмическая голография / Ю. В. Тимошин. – М.: Недра, 1978. – 285 с.
10. Timoshin U.V., (1978). Impulse seismic holography. Moscow, Nedra, 285. (In Russian)
11. Aifei B. Optimization for fast ray tracing in block structure models / B. Aifei, Y. Wenhui // CPS/SEG Beijing 2009. International Geophysical Conference & Exposition. – P. 4–7.
12. Aki K. Quantitative Seismology / K. Aki, P.G. Richards // Theory and Methods. – 1980. – Vol. II. – W. H. Freeman, San Francisco. – 373 p.
13. Anderson D. L. Seismic tomography / D. L. Anderson, A. M. Dziewonski // Scientific American. – 1984, October. – P. 60–68.
14. Becht A. Inversion strategy in crosshole radar tomography using information of data subsets / A. Becht, J. Tronicke, E. Appel, P. Dietrich // Geophysics. – 2004. – № 69(1). – P. 222–230.
15. Benxi K. Fat ray first arrival seismic tomography and its application / K. Benxi, Z. Jianzhong, C. Baofu, Z. Bo // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2007. – P. 2822–2826.
16. Bishop T. N. Tomographic determination of velocity and depth in laterally varying media / T. N. Bishop, K. P. Bube, R. T. Cutler, R. T. Langan, P. L. Love, J. R. Resnick, R. T. Shuey, at al. // Geophysics. – 1985. – № 50(6). – P. 903–923.
17. Bois P. 1972. Well-to well seismic measurements / P. Bois, M. LaPorte, M. LaVergne, G. Thomas // Geophysics. – (3), 7. – P. 471–480.
18. Bregman N. D. Crosshole seismic tomography / N. D. Bregman, R. C. Bailey, C. H. Chapman // Geophysics. – 1989. – 54(2). – P. 200–215.
19. Cao J. Conductivity tomography at two frequencies / J. Cao, Z. He, J. Zhu, P. K. Fullagar // Geophysics. – 2003. 68(2) – P. 516–522.
20. Cavalca M. Ray-based Tomography for Q Estimation and Q Compensation in Complex Media / M. Cavalca, I. Moore, L. Zhang, S. L. Ng, R. P. Fletcher, M. P. Bayly // EAGE Conference. – Vienna, 2011..
21. Chang X. 3D tomographic static correction / X. Chang, Y. Liu, H. Wang, F. Li, J. Chen // Geophysics. – 2002. – 67(4). – P. 1275–1285.
22. Cheng N. Minimum travelttime calculation in 3-D graph theory / N. Cheng, L. House // Geophysics. – 1996. – 61(6), P. 1895–1898.
23. 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.
24. Cutler R. T. Seismic Tomography: Formulation and Methodology / R. T. Cutler, T. N. Bishop, H. W. Wyld, R. T. Shuey, R. A. Kroeger, R. C. Jones, M. L. Rathbun // Geophysics. – 1983. – (1). – P. 19–20.
25. Daily W. Cross-borehole resistivity tomography / W. Daily, E. Owen // Geophysics. – 1991. – 56(8). – P. 1228–1235.
26. Dougherty D. E. Optimal 3-d geophysical tomography / D. E. Dougherty, M. J. Eppstein // Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. – 1998. – P. 249–256.
27. Durrani T. S. The Radon transform and its properties / T. S. Durrani, D. Bisset // Geophysics. – 1984. – 49(8). – P. 1180–1187.
28. Gheshlaghi F. Santamarina J. C., Data Pre-Processing in Cross-Hole Geotomography / F. Gheshlaghi, J. C. Santamarina // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 1998. – 3(1). – P. 41.
29. Guillaume P. Multi-layer tomography and its application for improved depth imaging / P. Guillaume, S. Hollingworth, X. Zhang, A. Prescott, R. Jupp, G. Lambare, O. Pape // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2012. – P. 1–5.
30. Lambare G Non-linear tomography for time imaging / G. Lambare, N. Deladerriere, Y. Traonmilin, J. Toure, J. Le-moigne, C. France // 71st

EAGE Conference Exhibition. – Amsterdam, The Netherlands, 8–11 June 2009. – P. 3984–3988.

26. Langan R. Tracing of rays through heterogeneous media: An accurate and efficient procedure / R. Langan, I. Lerche, R. Cutler // *Geophysics*. – 1985. – 50(9). – P. 1456–1465.

27. Lee T. J. Electromagnetic traveltimes tomography using an approximate wavefield transform / T. J. Lee, J. H. Suh, H. J. Kim, Y. Song, K. H. Lee // *Geophysics*. – 2002. – 67(1). – P. 68.

28. Lines L. Applications of tomography to borehole and reflection seismology / Lines L // *The Leading Edge*. – 1991. – 10. – P. 11–17.

29. Lines L. R. Poor Man's Anisotropic Traveltime Tomography / L. R. Lines // *Geophysics*. – 1991. – (1984). – P. 83–86.

30. Lines L. R. Cooperative inversion of geophysical data / L. R. Lines, A. K. Schultz, S. Treitel // *Geophysics*. – 1988. – 53(1). – P. 8–20.

31. Lines L. Integrated reservoir characterization: Beyond tomography / L. Lines, H. Tan, S. Treitel, J. Beck, R. Chambers, J. Eager, M. Van Schaak // *Geophysics*. – 1995. – 60(2), 354–364.

32. Lo T., Inderwiessen P. Fundamentals of Seismic Tomography / T. Lo, P. Inderwiessen // SEG. Geophysical Monograph Series. – 1994 – P. 187.

33. Lortzer G. An integrated approach to lithologic inversion-Part I: Theory / G. Lortzer, A. Berkhout // *Geophysics*. – 1992. – 57(2). – P. 233–244.

34. McMechan G. Seismic tomography in boreholes / G. McMechan // *Geophys. J. R. astr. Soc.* – 1983. – 74. – P. 601–612

35. Pei D. Threedimensional traveltimes tomography via LSQR with regularization / D. Pei // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2009. – (1). – P. 4004–4008.

36. Phillips W. Fehler M. Traveltime tomography: A comparison of popular methods / W. Phillips, M. Fehler // *Geophysics*. – 1991. – 56(10). – P. 1639–1649.

37. Russell B. Introduction to Seismic Inversion Methods / B. Russell // Society of Exploration Geophysicist. – 1988. – 178 p.

38. Stewart R. R., Chiu S. K. Tomographic Imaging of a Heavy Oil Reservoir Using Well Logs VSP And 3-D Seismic / R. R. Stewart, S. K. Chiu // SEG Annual Meeting, (Mm). – 1986. – P. 5–7.

39. Vidale J. Finite-difference calculation of traveltimes in three dimensions / J. Vidale // *Geophysics*. – 1990. – 55(5). – P. 521–526.

40. Witten A. J. Seismic Reflection Diffraction Tomography / A. J. Witten // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 1996. – 1(3). – P. 205.

41. Woodward M. J. A decade of tomography / M. J. Woodward, D. Nichols, O. Zdraveva, P. Whitfield, T. Johns // *Geophysics*. – 2008. – 73(5), VE5-VE11.

42. Woodward M. J. Wave-equation tomography / M. J. Woodward // *Geophysics*. – 1992. – 57(1). – P. 15–26.

43. Wu R. Toksoz M. Diffraction tomography and multisource holography applied to seismic imaging / R. Wu, M. Toksoz // *Geophysics*. – 1987. – 52(1). – P. 11–25.

44. Zhang J. Fat ray tomography with optimal relaxation factor / J. Zhang, U. Xiamen, B. Zhao, H. Zhou, T. T. U // SEG Houston 2009 International Exposition and Annual Meeting. – 2009. – (1). – P. 4044–4048.

45. Zhou C. Multiparameter joint tomography for TTI model building / C. Zhou, J. Jiao, S. Lin, J. Sherwood, S. Brandsberg-Dahl // *Geophysics*. – 2011. – 76(5). – WB183–WB190.

46. Zhou H. Multiscale traveltimes tomography / H. Zhou // *Geophysics*. – 2003. – 68(5). – P. 1639–1649.

47. Zhou H. Multiscale deformable-layer tomography / H. Zhou // *Geophysics*. – 2006. – 71(3). – R11–R19.

Надійшла до редколегії 17.11.14

K. Troinich, Postgraduate Student

Email: k.stan@i.ua,

B. Matviychuk, Postgraduate Student

Email: molotokhammer@bigmir.net,

S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.

Email: vsa@univ.kiev.ua

Institute of Geology, Taras Shevchenko National University of Kyiv,

90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022 Ukraine

GEOPHYSICAL TOMOGRAPHY: CURRENT STATE AND IMPLICATIONS FOR THE PETROLEUM GEOLOGY INDUSTRY

This paper reviews current approaches to the implementation of the method of seismic tomography – a powerful tool which is used for solving the inverse problem in geophysics. Emphasis is laid on the application of geophysical tomography in the oil and gas industry at all field exploration and production stages.

It has been shown that this method can be successfully used for the inversion of elastic and electrical parameters, anisotropy, etc. The three-dimensional distribution of geophysical parameters in the explored medium obtained through imaging can be used to determine the geological (lithological) parameters such as mineral composition, structural and textural features, porosity, and fracture.

A possible implementation of the inversion suggested is not into geophysical but directly into lithological parameters. It has also been demonstrated that tomography can be used to interpolate the well logging data in the inter-well space.

Keywords: inversion, geophysical tomography, lithological tomography, Geophysical Research Methodology.

К. Тройнич, асп.

Email: k.stan@i.ua,

Б. Матвийчук, асп.

Email: molotokhammer@bigmir.net,

С. Вьжва, д-р геол. наук, проф.

Email: vyzhva_s@ukr.net

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,

УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ

Рассматриваются современные подходы к имплементации метода сейсмической томографии – мощного инструмента решения обратной задачи геофизики. Основное внимание уделено применению геофизической томографии для решения задач нефтегазовой промышленности на всех этапах жизни месторождений.

Показано, что данный метод может быть успешно использован для инверсии упругих и электрических параметров, анизотропии и т.д. Трехмерное распределение геофизических параметров в исследуемой среде, полученное с помощью томографии, может быть использовано для перехода к геологическим (литологическим) параметрам, таким как минеральный состав и структурно-текстурные особенности, пористость или трещиноватость.

Предложен один из возможных вариантов получения с помощью инверсии не геофизических, а непосредственно литологических параметров. Также показано, что томографию можно использовать для интерполяции данных геофизических исследований скважин в межскважинном пространстве.

Ключевые слова: инверсия, геофизическая томография, литологическая томография, методология геофизических исследований.