

УДК 550.8.056

К. Тройніч, асп.,
С. Вижва, д-р геол. наук, проф.,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

ЕФЕКТИВНИЙ АЛГОРИТМ СЕЙСМІЧНОЇ ПРОМЕНЕВОЇ ТОМОГРАФІЇ ПРИ ОБРОБЦІ ВЕЛИКИХ МАСИВІВ СЕЙСМІЧНИХ ДАНИХ

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

Сейсмічна томографія є потужним інструментом дослідження земних надр та останніми роками стала галузевим стандартом у світовій геофізиці. Проте, в Україні вона практично не застосовується. З метою розвитку вітчизняної галузі, а також у рамках виконання наукової теми "Розробка теорії та методології побудови динамічних геолого-геофізичних моделей геологічних об'єктів і процесів", яка фінансується фондом фундаментальних і прикладних досліджень Київського національного університету імені Тараса Шевченка, на кафедрі геофізики геологічного факультету розробляються теоретичні та методологічні основи геофізичної томографії та літологічної інверсії, зокрема, реалізовано обчислювальний алгоритм та розроблено оригінальне програмне забезпечення для реалізації сейсмічної променевої томографії.

Як алгоритм для оновлення швидкісної моделі було обрано метод одночасної ітеративної реконструктивної томографії (SIRT), що є модифікацією методу алгебраїчної реконструктивної томографії (ART), в якому поправка до моделі обчислюється з одночасним використанням усіх наявних променів, що перетинають модель під різними кутами.

Програмне забезпечення реалізоване в сучасному програмному середовищі та апробоване на модельних прикладах. Трасування сейсмічних променів через швидкісну модель базується на ідеї побудови дерева найкоротших відстаней (SPT) із застосуванням теорії мереж. Такий підхід дозволяє за один раз обчислювати траєкторії та часи пробігів усіх хвиль, що виходять з одного джерела, що значно заощаджує час обчислень. За алгоритм для побудови дерева найкоротших відстаней обрано L-deque, що зарекомендував себе як один із найбільш швидких та стійких алгоритмів при роботі зі значними обсягами даних.

Ключові слова: сейсмічна томографія, швидкісна модель, масив даних

Вступ. Томографія – метод, що дозволяє віднаходити функцію за її проєкціями (інтегралами функції). Цей метод має значні можливості для вирішення широкого кола наукових та практичних завдань. Найширшого застосування нині набула медична томографія (від локалізації пухлин мозку до визначення якості пломбування зубів), а в геофізиці – сейсмічна томографія.

Алгоритми для розв'язання задач медичної томографії передбачають повне покриття досліджуваних об'єктів проєкціями. Іншими словами, ми маємо широкий діапазон кутів, під якими енергія перетинає досліджуване тіло, чого зрідка можна досягти при геофізичних спостереженнях. Через це, при виборі програмного забезпечення геофізики обмежені лише невеликою кількістю програмних продуктів, що дозволяють використовувати томографію із вузьким діапазоном кутів перетину досліджуваної області проєкціями, тобто програми для медичної томографії – не прийнятні.

Враховуючи це, автори вирішили розробити власне програмне забезпечення, яке би мало всі необхідні можливості для розв'язання таких задач, як регіональні геофізичні дослідження та дослідження глибинної будови землі; пошук та розвідка родовищ вуглеводнів, інженерно-геологічні дослідження тощо з урахуванням специфіки польових систем спостереження, що використовуються в Україні.

Активний розвиток геофізичної томографії почався у 80-і роки ХХ ст [3, 4, 8, 9]. На даний час метод сейсмічної томографії набув найширшого застосування в практиці геофізичних досліджень та продовжує розвиватись, базуючись, в основному, на принципах, описаних у класичних працях [5-6]. Серед напрямків розвитку методу можна назвати ускладнення моделей середовища, перехід від ізотропних до анізотропних моделей, використання різних азимутів просвічування при розв'язанні тривимірних задач тощо [12].

У рамках виконання фундаментальних та прикладних досліджень у Київському університеті, починаючи з 80-х років ХХ ст почалися дослідження, пов'язані з розробкою теоретичних і методологічних основ геофізичної томографії. Зокрема, під керівництвом Ю.В. Тімошина розроблено ряд технологій сейсмічної томографії на основі використання даних свердловинної та наземної сейсморозвідки [2]. У подальшому в роботах Г.Т. Продайводи, С.А. Вижви, І.В. Віршила розроблено алгоритми та спеціалізоване програмне забезпечення для інверсії ультра-

звуків, акустичних та сейсмічних даних з урахуванням структури пустотного простору, мінералогічного складу, складу пустотних наповнювачів, анізотропії, напружено-деформованого стану та нелінійних ефектів [1].

Впровадження цих розробок у життя вимагає наявності ефективних обчислювальних алгоритмів. Розробці нових підходів до реалізації алгоритмів сейсмічної томографії з урахуванням сучасних обчислювальних схем і присвячена дана робота. Основна увага приділена алгоритмічним аспектам підвищення ефективності та точності розробленого програмного забезпечення.

Алгоритм. У геофізиці розрізняють два види задач: пряму та обернену. Пряма задача полягає в знаходженні розподілу геофізичних полів для відомої моделі. Для розв'язання прямої задачі знання моделі (розподілу геофізичних параметрів) є необхідним та одним із вирішальних факторів відповідності геофізичних полів дійсності. Обернена задача полягає у віднаходженні моделі за відомим розподілом геофізичних полів. Як правило, обернені задачі є неоднозначними, а якість результуючої моделі буде залежати, в першу чергу, від алгоритму інверсії, а також від якості вхідних даних. Процес розв'язання прямої та оберненої задачі схематично зображено на рис. 1 [11].



Рис. 1. Принципова різниця між розв'язанням прямої та оберненої задачі

Геофізична томографія є різновидом оберненої задачі (інверсії), тобто ми намагаємось отримати модель досліджуваного середовища на основі даних спостережень. Значна частина методів томографії (наприклад, дифракційна томографія) легко описується послідовністю дій, зображеною на рис. 1 (б). Проте, такий підхід має суттєвий недолік, який полягає в тому, що ми не можемо вплинути на результат процесу інверсії. З іншого боку, в моделюванні результат цілком визначається параметрами вхідної моделі. Деякі різновиди томогра-

фії (наприклад, променева томографія) використовують перевагу підходу моделювання та представляють собою так звану інверсію на основі розв'язання прямої задачі (model-based inversion). Суть останньої полягає в тому, що для отримання фінальної моделі ітеративно вирішується ряд прямих задач, і на кожній ітерації модель середовища змінюється так, щоб зменшити нев'язку між полем, розрахованим на основі цієї моделі, та спостереженим полем. Таким чином досягається можливість впливати на результат розв'язку оберненої задачі шляхом зміни моделі початкового наближення.

Для реалізації розробленого авторами програмного забезпечення було обрано променеву томографію, що базується на інверсії із попереднім моделюванням (forward modeling). В основі алгоритму лежить схема, зображена на рис. 1 (а), яка удосконалена тим, що після обчислення геофізичних полів виконується оновлення моделі для мінімізації нев'язки між обчисленим та спостереженим полями. Причому, обчислення геофізичного відгуку та оновлення моделі відбувається ітеративно. Для того, щоби мати можливість закінчити ітеративне оновлення моделі після отримання обчислених геофізичних даних на основі поточної моделі, перевіряється величина нев'язки зі спостереженими даними. Якщо нев'язка задовольняє вимогам точності розв'язання оберненої задачі – поточна модель вважається правильним розв'язком задачі та виводиться як результат. На рис. 2 наведено блок-схему, яка зображує описаний вище алгоритм [9].

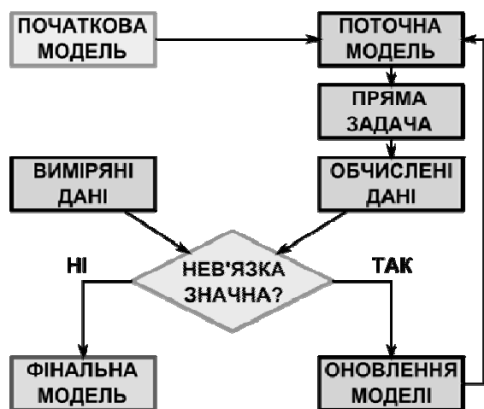


Рис. 2. Блок-схема алгоритму розв'язання зворотної задачі на основі моделювання

Кожна процедура, зображена на рис. 2., є цілою низкою операцій, об'єднаних у власний алгоритм. Так, етапи розв'язання прямої задачі або оновлення моделі є цілком самостійними задачами, кожна з яких має велику кількість способів розв'язання. У даній статті автори не будуть зупинятись на всій різноманітності підходів до розв'язання вищезгаданих задач, а опишуть ті алгоритми, які були використані при реалізації власного програмного забезпечення.

Модель. Відповідно до описаного алгоритму, першим кроком є створення моделі та визначення параметрів першого наближення (початкової моделі). Тому ми почнемо із принципів параметризації моделі та способів отримання першого наближення.

Частина геологічного середовища, яка досліджується, розбивається на прямокутні паралелепіпеди за допомогою трьох систем взаємно-перпендикулярних площин. Відстань між площинами не регулярна, а задається окремо для кожної пари. Така особливість дозволяє ділити підпростір на комірки різного розміру та будувати так звану "шотландську сітку" (Tartan grid). Основною перевагою сітки є можливість збільшувати кількість комірок в зоні інтересу (шляхом зменшення відстані між січними площинами) без суттєвого збільшення

кількості комірок. Окрім цього, дані на граничних частинах зйомки часто не мають достатньої якості для досягнення високої роздільної здатності, а тому робити комірки такого самого розміру, як і в центрі моделі, не доцільно, оскільки час обчислень зростає без суттєвого покращення якості отриманої моделі. Нерегулярна сітка стає корисною і в цьому випадку. На рис. 3 наведено приклад моделі з нерегулярною сіткою та спосіб задання параметрів, необхідних для її описання.

Після того, як підпростір розбитий на прямокутні комірки, кожній комірці задається значення модельної функції M . У випадку сейсмічної променевої томографії, модельна функція описує повільність, величину обернену до швидкості. Всередині кожної комірки значення повільності є постійним. Теоретичних обмежень на значення повільності, що змінюється в межах комірки за певним законом, немає. Проте для задач нафтогазової геології це не є доцільним, оскільки розміри комірки достатньо малі, щоб будь-яку фізичну величину в середині цих комірок вважати постійною та мати при цьому достатню точність моделі. Інша справа, розв'язання задач глибинної будови землі, де через невисоку роздільну здатність розміри комірок дуже значні та цілком потребують градієнтної зміни значень фізичних параметрів у їхніх межах як мінімум з глибиною.

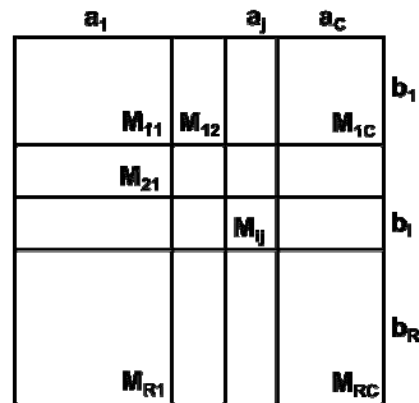


Рис. 3. Поділ двовірної моделі на C стовпчиків та R рядків за допомогою нерегулярної сітки.

M_{ij} – значення модельної функції (повільність) в i -му рядку та j -му стовпчику,

a_j та b_i – ширина j -го стовпчика та висота i -го рядка відповідно

Основними вхідними даними для реалізації променевої томографії є часи проходження сейсмічної енергії від джерела до приймача. У випадку наземної сейсморозвідки також необхідно знати положення горизонтів, від яких зареєстровані відбиття.

Оскільки обраний алгоритм томографії відноситься до обернених задач на основі моделі, для його реалізації необхідно мати апріорну інформацію щодо розподілу швидкостей у середовищі, геологічної будови, основних структур та розломів, про природу порід та їх петрофізичні властивості для того, щоби побудувати модель першого наближення. Для ефективного розв'язання задачі залучається вся наявна апріорна геолого-геофізична інформація: швидкості, отримані за сейсмограмами різних типів, дані геофізичних досліджень у свердловинах та вертикального сейсмічного профілювання, а також інша геолого-геофізична інформація.

Пряма задача. У випадку променевої сейсмічної томографії функцією, що підлягає відновленню, є розподіл повільностей у межах досліджуваної частини простору, а проєкціями зазначеної функції – часи пробігів сейсмічних променів вздовж певної траєкторії. Дійсно, якщо взяти інтеграл функції повільності $M(x, y, z)$ від просторових координат (x, y, z) вздовж траєкторії сейсмічного променя, то отримаємо час пробігу P цього променя вздовж траєкторії:

$$P = \int_{\text{траєкторія}} M(x, y, z) ds,$$

де ds – диференціал вздовж траєкторії променя.

Оскільки в реалізації даного програмного забезпечення швидкісна модель задається не у вигляді функції координат, а у вигляді дискретних значень функції в межах прямокутних комірок, то цілком доречно буде перейти від інтегрування до підсумовування. Таким чином, час пробігу кожного окремого променя буде визначатись за формулою:

$$P = \sum_{n=1}^N S_n M_n,$$

де M_n – повільність, а S_n – довжина траєкторії променя в межах n -ї комірки; N – кількість комірок.

Виходячи з попереднього рівняння, для отримання часів пробігу променів ми повинні знати розподіл не лише швидкостей (задається моделлю), але й траєкторію сейсмічних променів. Відповідно до основ геометричної сейсміки, шлях розповсюдження сейсмічних променів визначається швидкістю проходження сейсмічної енергії в середовищі. Отже, отримання матриці S з частковими шляхами пробігу постає у вигляді серйозної самостійної задачі. Причому, кожне оновлення швидкісної моделі вимагатиме повторного виконання процедури трасування променів, оскільки геометрія променів буде змінюватись.

Трасування променів. Для трасування сейсмічних променів крізь уявне геологічне середовище було обрано алгоритм на основі мереж. Подібні алгоритми зараз використовуються для пошуку найкоротшої відстані та прокладання маршрутів між двома географічними пунктами в різноманітних навігаційних та картографічних сервісах, оскільки вони зарекомендували себе як найбільш стійкі та ефективні при роботі з великими масивами даних.

Для здійснення можливості пошуку найкоротшого шляху на основі мереж необхідно дещо модифікувати описану вище модель середовища. Алгоритм передбачає наявність мережі вузлових точок, що з'єднані арками. Дана мережа не містить геологічної або геофізичної інформації, але потрібна для реалізації алгоритму, оскільки уявні промені будуть рухатись від однієї вузлової точки до іншої (рис. 4). Кожній арці задається час пробігу сейсмічної хвилі між вузлами. Під час роботи програми розв'язується комбінаторна задача, що спрямована на пошук найменшого часу проходження хвилі від вузла, найближчого до пункту збудження, до всіх інших вузлів мережі, утворюючи при цьому так зване дерево найкоротших відстаней (shortest path tree).

Незважаючи на те, що теоретично не існує жодних обмежень на розташування вузлових точок (тобто воно може бути як регулярним, так і нерегулярним та мати абсолютно довільне розташування відносно границь прямокутних комірок з повільностями), автори статті вирішили встановити такі правила розміщення вузлових точок: а.) вузлові точки можуть знаходитись лише на границях між прямокутними комірками; б.) арки знаходяться лише всередині комірок та не можуть перетинати їхніх границь.

Це дає такі переваги: по-перше, побудова моделі стає більш логічною та не виникає можливих конфліктів при використанні нерегулярної сітки (щільність розташування вузлів автоматично змінюється зі зміною розміру комірок у різних частинах моделі), та, по-друге, – дані правила значно спрощують ту частину коду, що відповідає розрахунку часу пробігу сейсмічної енергії між двома вузлами, що приводить до зменшення необхідної кількості обчислень та виграшу в часі.

З метою розташування арок під різними кутами та через рівний проміжок кутів нахилу автори вирішили зробити наступне: всередині кожної грані, що розділяє дві комірки, поміщаються чотири вузлові точки таким чином, щоби вони утворили вершини прямокутника, до-

вжина сторін якого в два рази менша від довжин сторін прямокутника, що описує грань. Така конфігурація комірок дозволяє забезпечити до 48-ми варіантів подальшого поширення сейсмічного променя з кожного вузла, що в середньому складає тілесний кут приблизно в 15° .

На рис. 4 наведений приклад мережі, для наочності побудованої на двовимірній площині (у такій конфігурації кожен вузол має до 12 з'єднань за допомогою арок). З рисунку видно, що покриття арками достатньо щільне, проте сейсмічний промінь все одно апроксимується ламаною лінією, яка в дійсності відрізняється від справжньої траєкторії променя.

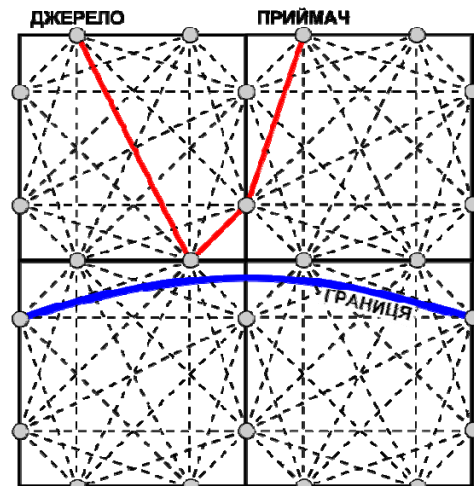


Рис. 4. Принцип створення сітки для трасування сейсмічних променів.

Точками позначено вузли, пунктиром – арки, тонкою суцільною лінією – траєкторію променя, що відбився від акустичної границі, позначеної жирною суцільною лінією

Таке, не зовсім точне, представлення дає наступні переваги. Алгоритм обчислення в цьому випадку припускає довільну конфігурацію джерел та приймачів, а також не залежить від геометрії відбиваючих горизонтів та розломів.

Алгоритм знаходження дерева найкоротших відстаней у найпростішому випадку зображено на рис. 5. Його можна описати у вигляді такої послідовності дій [7]:

I. Нехай дерево T із коренем у вузлі r містить K вузлів, з'єднаних між собою A арками, довжиною l . Кожен вузол u містить посилання на попередній вузол p (ланцюжок послідовних посилань на попередній вузол завжди закінчується на корені дерева), а також інформацію щодо часу t , затраченого на проходження від кореня дерева до даного вузла. Після створення T вузли ініціалізуються наступними значеннями: $pr = dr = 0$, а всі вузли $v \in N - \{r\}$ отримують $pv = r$, $tv = +\infty$. Також створюється список $Q = \{r\}$, в який будуть додаватись вузликандидати для оптимізації за описаним нижче принципом, та $fs(u)$ – список, що містить усі вузли, з'єднанні арками з вузлом u .

II. Дерево будується з арок $(u,v) \in A$, які задовольняють нерівність $tu + luv - tv < 0$ (цікаво, що така нерівність є рівнянням Белмана і тому довгий час задачу побудови дерева найкоротших відстаней адресували до вирішення задачі оптимізації шляхом розв'язку рівнянь Белмана). Побудова дерева відбувається шляхом ітеративного повторення наступного циклу кроків: а) вибрати вузол $u \in Q$; $Q = Q - \{u\}$; б) для кожної $(u,v) \in fs(u)$, такої, що $tu + luv < tv$, задати $pv = u$, $dv = du + luv$ та оновити список $Q = Q \cup \{v\}$;

III. Повторювати крок II до моменту, коли оптимальні умови досягнуті, оскільки всі арки відповідають цим вимогам. На виході маємо дерево, що показує шлях та час, потрібний на подолання відстані від кореня дерева до всіх вузлів у його межах.

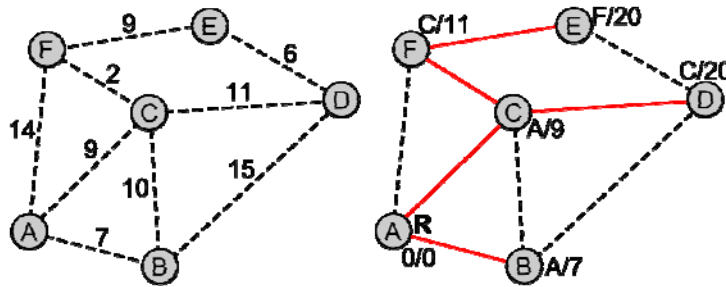


Рис. 5. Приклад побудови дерева найкоротших відстаней

Ліворуч зображені вузлові точки, що утворюють нерегулярну сітку. Праворуч – дерево найкоротших відстаней.

Пояснення до рисунка: латинськими літерами в середині круга позначено номер вузла; пунктирними лініями – арки (цифрові значення поруч із аркою показують час подорожі вздовж арки); суцільними лініями – гілки дерева найкоротших відстаней; поряд із вузлами на правій частині рисунка через дріб записано номер попереднього вузла та відстань до кореня R дерева

Вперше задача знаходження дерева найкоротших відстаней була розв'язана Дікстрою. Проте його алгоритм є дуже неефективним та має складність, пропорційну четвертій степені кількості комірок, у той час, як існують алгоритми складністю, пропорційною логарифму кількості вузлів, або майже лінійною залежністю для розріджених мереж [10].

Оновлення швидкісної моделі. Припустимо, що існує деяке уявлення про розподіл швидкостей у межах досліджуваного півпростору. Тоді для відомої геометрії спостережень можна розрахувати траєкторії та часи проходження хвиль у межах цього півпростору. Найімовірніше, виконане моделювання покаже деяку розбіжність між спостереженими (отриманими під час сейсмічних досліджень) та розрахованими (отриманими під час розв'язання прямої задачі) часами проходження хвиль.

Ця розбіжність пояснюється двома факторами: 1) недосконалість параметризації моделі (неврахування анізотропії, неправильно вибрані розміри комірок, похибки, пов'язані із точністю відліків, та похибки, пов'язані із недосконалістю роботи алгоритму трасування променів (він має певну точність); 2) невірне уявлення про швидкісну модель.

З першим типом помилок можна боротись, правильно вибираючи параметри моделі та алгоритми, проте саме поняття "модель" означає апроксимацію реальної середовища шляхом описання найголовніших його рис та передбачає нехтування деякими параметрами, що завжди породжує певні похибки. Зазвичай модель будується як компроміс між точністю та часом обчислень, причому перевага надається другому фактору.

Оновлення швидкісної моделі відбувається на основі методу Качмажа (Kaczmarz), який названий на честь польського математика та обчислюється за формулою [9]:

$$\Delta^w M_n = S_{wn} \frac{\Delta P_w}{\sum_{n=1}^N S_m^2},$$

де $\Delta^w M_n$ – поправка повільності в n-й комірці для w-го променя, S_{wn} – довжина пробігу w-ї хвилі в межах n-ї комірки, ΔP_w – різниця між спостереженим та обчисленим часами пробігу w-го променя; W – кількість променів, N – кількість комірок у моделі.

Для кращого розуміння цієї формули її можна подати у вигляді таких дій: нев'язка між спостереженим та розрахованим часом пробігу сейсмічної хвилі ділиться на сумарну довжину пробігу променя у всіх клітинках – отримується величина нев'язки часу на одиницю довжини шляху сейсмічного променя. Далі ця нормована величина множиться на частку шляху в межах комірки від повного шляху променя. У результаті отримується величина повільності, яку необхідно додати до поточного значення повільності в межах комірки, щоб мінімізувати нев'язку, шляхом розповсюдження нев'язки пропорційно до довжини пробігу променів у межах комірок.

Дана формула є основою методу алгебраїчної реконструктивної томографії та застосовується окремо для

кожного променя, що проходить крізь модель. Недоліком цього методу є те, що після обчислення поправки до швидкісної моделі на основі нев'язки одного із променів модель необхідно оновити, а відтак – процедуру трасування променів треба виконувати повторно. Тобто для виконання однієї ітерації для кожного із l променів необхідно виконати спочатку трасування променя, а потім оновлення моделі. Такий підхід, безперечно, дає гарну збіжність, проте забирає надмірно велику кількість часу на операції з пам'яттю комп'ютера. У зв'язку із цим було запропоновано одночасну ітеративну реконструктивну томографію. Метод використовує таку саму формулу, але замість того, щоб оновлювати швидкісну модель після трасування кожного променя, спочатку обчислюють величини поправок від кожного променя, а потім модель оновлюється шляхом додавання до значення кожної комірки середньозваженої величини поправки для цієї комірки:

$$\Delta M_n = \frac{1}{W} \sum_{w=1}^W \Delta^w M_n, \quad n = 1, \dots, N.$$

Таким чином досягається те, що модель оновлюється у W разів рідше, ніж у випадку алгебраїчної реконструктивної томографії.

Останнім питанням, на якому варто зупинитись, є критерій завершення ітеративного процесу. Існує два можливі підходи до вирішення цього питання. Найбільш вірним рішенням є визначення певної величини нев'язки. Тобто розподіл нев'язки між спостереженими та модельними часами пробігу хвиль відбуватиметься доти, поки величина цієї нев'язки не задовольнятиме вимогам точності, які ставляться до кожної конкретної задачі. Проте, існують випадки, коли досягти бажаної точності неможливо. В такому випадку слід передбачити ще один критерій закінчення ітеративного процесу, а саме: у випадку, коли величина нев'язок перестала зменшуватись (іншими словами, значення поправок прямують до нуля), – проводити подальші обчислення не доцільно.

Програмне забезпечення реалізоване в середовищі Microsoft Visual Studio 2013 мовою програмування C++ стандарту 1998 р. Використання даного стандарту пов'язане з тим, що програма працюватиме на будь-якій системі або кластері, в той час, як не всі системи підтримують новіший стандарт 2011 р. Також ряд процедур було покладено на паралельні обчислення як на процесорі (технологія Open MP), так і на графічному адаптері (технологія CUDA). Використання графічного адаптера дозволяє використовувати стаціонарні персональні комп'ютери замість обчислювальних кластерів.

На рис. 6 наведений результат роботи програми для модельного прикладу. За вхідні дані взято часи пробігів хвиль, отримані при моделюванні сейсмозвідувальних даних фланговою установкою при відомому розподілі швидкостей вздовж профілю. Двовимірний ізотропний модель має 2000 квадратних комірок із постійними значеннями швидкостей та перетинається 592-ма сейсмічними

променями, що відбиваються від чотирьох горизонтів. За перше наближення обрано двошарову модель. На рисунку видно, що в правій частині профілю швидкості відновились не повністю. Це пов'язано із тим, що в даній частині профілю проходить недостатня кількість сейсмічних

променів (результат навмисно неправильно обраної геометрії модельної зйомки), що наглядно демонструє залежність результату відновлення функції швидкості від якості перетину моделі проєкціями.

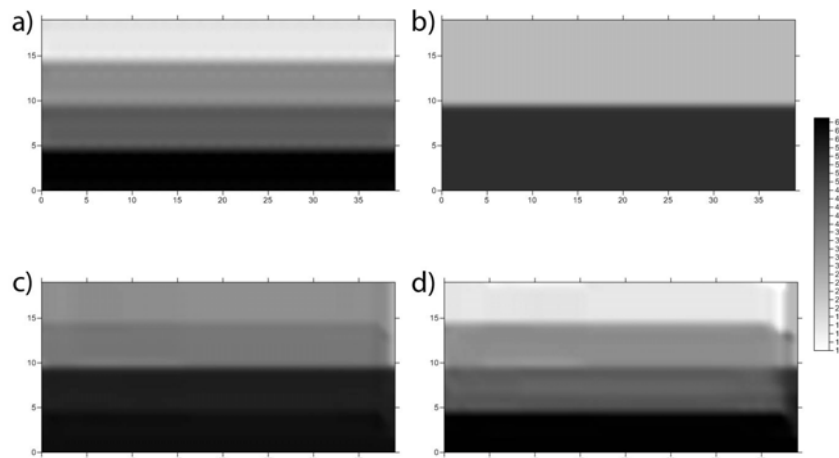


Рис. 6. Приклад роботи алгоритму SIRT:

а) швидкісна модель; б) початкове наближення; в) результат томографічної інверсії після однієї ітерації; д) результат томографічної інверсії після ста ітерацій

Висновки. Розроблене авторами оригінальне програмне забезпечення є оригінальним поєднанням відомих класичних алгоритмів, що зарекомендували себе як надійні та ефективні рішення. Дане програмне забезпечення працює як з двовимірними, так і з тривимірними моделями. Для демонстрації роботи програми на рис. 6 наведено приклад розв'язання двовимірної задачі для моделі із горизонтальними відбиваючими горизонтами.

Для більш ефективної реалізації обчислювальних процедур авторами пропонується нерегулярна мережа комірок зі згущеннями в центрі та розрідженнями на периферії, а також введення одночасної поправки в траси всіх променів, що пересікають модель під різними кутами. За алгоритм для побудови дерева найкоротших відстаней обрано L-deque, що зарекомендував себе як один з найбільш швидких та стійких алгоритмів при роботі зі значними обсягами даних. Алгоритм та програмне забезпечення апробовані на модельних прикладах, що підтвердило високу ефективність з точки зору швидкості обчислювальних процедур.

Подальший розвиток алгоритму можливий шляхом переходу від ізотропного до анізотропного середовища. Також програма може бути покращена оптимізацією програмного коду з точки зору як збільшення швидкодії, так і зменшення використання системних ресурсів.

Список використаних джерел

1. Вижва С.А., (2004). Геофізичний моніторинг небезпечних геологічних процесів. Київ: Обрії, 234.
2. Vyzhva S.A., (2004). Geophysical monitoring of hazardous geological processes. Kyiv: Obryi, 234 (in Ukrainian).
3. Тимошин Ю.В., (1978). Импульсная сейсмическая голография. Москва: Недра, 285.
4. Timoshin U.V., (1978). Impulse seismic holography. Moscow: Nedra, 285 (In Russian).
5. Aki, K. and Richards P.G., (1980). Quantitative Seismology, Theory and Methods, Vol. II, W.H. Freeman, San Francisco, 373.
6. Anderson D.L., Dziewonski A.M., (1984). Seismic tomography. Scientific American, October, 60-68.
7. Bishop T.N., Bube K.P., Cutler R.T., Langan R.T., Love P.L., Resnick J.R., Shuey R.T., Spindler D.A., Wyld H.W., (1985). Tomographic determination of velocity and depth in laterally varying media. Geophysics, 50(6), 903-923.
8. 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.
9. Gallo G., Pallottino S., (1986). Shortest path methods: a unifying approach. Mathematical Programming Studies, 26, 38-64.
10. Lines L., (1991). Applications of tomography to borehole and reflection seismology. The Leading Edge, 10, 11-17.
11. Lo T., Inderwiessen P., (1994). Fundamentals of Seismic Tomography. SEG, Geophysical Monograph Series, 187.
12. Moser T.J., (1991). Shortest path calculations of seismic rays. Geophysics, 56(1), 59-67.
13. Russell B., (1988) Introduction to Seismic Inversion Methods. Society of Exploration Geophysicist, 178.
14. Woodward M.J., Nichols D., Zdraveva O., Whitfield P., Johns T., (2008). A decade of tomography. GEOPHYSICS, 73(5), VE5-VE11.

Надійшла до редколегії 02.10.14

K. Troinich, Postgraduate Student
S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.
Institute of Geology, Taras Shevchenko National University of Kyiv
90 Vasykivska Str., Kyiv, 03022 Ukraine

EFFICIENCY ALGORITHM OF SEISMIC RAY TOMOGRAPHY IN PROCESSING EXTENSIVE SEISMIC DATA

Seismic tomography is both a powerful tool for studying Earth's subsurface and a standard for worldwide geophysics. However, this method has a very sporadic implementation in Ukraine. In order to raise standards of Ukrainian geophysics and in accord with the scientific research into the methodology of dynamic geological and geophysical models for geological objects and processes (the programme being funded by Theoretical and Applied Research Foundation at Kyiv National University) the Department of Geophysics (Institute of Geology) has been developing a methodology for geophysical tomography and lithological inversion. Namely, there have been elaborated a computing algorithm and upgraded software programming to launch seismic ray tomography.

To update velocity model there was chosen a simultaneous iterative reconstruction tomography (SIRT) technique. This technique is a modification of algebraic reconstruction tomography (ART) that calculates updating of the velocity model simultaneously using all available rays that cross the model at different angles.

Software programmes have been tested in upgraded programming environment and on the computational models. Ray tracing through velocity model is grounded in calculating shortest path tree (SPT) when using network theory. This approach allows calculating ray-paths and travel-times for all rays starting with one source point. It saves a lot of time and resources for performing calculations. Having proved to be a fastest and robustest algorithm for a large amount of data, L-deque was chosen to be an algorithm for building shortest path tree.

Keywords: seismic tomography, velocity model, large amount of data

К. Тройнич, асп.,
С. Выхва, д-р геол. наук, проф.,
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

ЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЛУЧЕВОЙ ТОМОГРАФИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ БОЛЬШИХ МАССИВОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Сейсмическая томография – мощный инструмент для исследования земных недр, который в последние годы стал отраслевым стандартом в международной геофизике. Однако он практически не нашел применения в Украине. С целью развития отечественной геофизики, а также в рамках научной темы "Разработка теории и методологии построения динамических геолого-геофизических моделей геологических объектов и процессов", которая финансируется фондом фундаментальных и прикладных исследований Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, на кафедре геофизики геологического факультета разрабатываются теоретические и методологические основы геофизической томографии и литологической инверсии, в частности, разработаны алгоритм и программное обеспечение для реализации сейсмической лучевой томографии.

В качестве алгоритма для обновления скоростной модели был избран метод одновременной итеративной реконструктивной томографии (SIRT), который является модификацией метода алгебраической реконструктивной томографии, в котором поправка к модели рассчитывается с одновременным использованием всех доступных лучей, пересекающих модель под разными углами.

Трассирование сейсмических лучей через скоростную модель основывается на идее построения дерева кратчайших расстояний с использованием теории сетей. Такой подход позволяет за один раз получить траектории и времена пробега всех лучей, исходящих из одного источника, что в значительной мере сокращает время расчетов. В качестве алгоритма построения дерева кратчайших расстояний был избран L-deque, который зарекомендовал себя как один из наиболее быстрых и устойчивых алгоритмов при работе с большими объемами данных.

Программное обеспечение реализовано с использованием современных средств разработки и апробировано на модельных примерах.

Ключевые слова: сейсмическая томография, скоростная модель, массив

УДК 550.832

В. Колісниченко, канд. геол.-мінералог. наук
ОЦ ГГТ ТОВ "Надра Інтегровані рішення"
вул. Дубровицька, 28, м. Київ, Україна
E-mail: vl_kolko@yahoo.com

Г. Кашуба, канд. геол. наук.
ТОВ "Надра Інтегровані рішення"
вул. Дубровицька, 28, м. Київ, Україна
E-mail: Kashuba11@mail.ru

Е. Солодкий, асп.
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
ІНІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна
E-mail: Eugeniy_Solodkiy@ukr.net

ПРОГНОЗУВАННЯ ГЕОАКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОЗРІЗІВ НАФТОГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН ДДЗ ЗА ВІДСУТНОСТІ ВИМІРІВ АКУСТИЧНОГО КАРОТАЖУ

(Рекомендовано членами редакційної колегії доктором геол.-мінералог. наук, проф. В.М. Курганським та кандидатом геол. наук, ст. наук. співроб. І.М. Безродною)

Метою статті є: – оцінка можливостей побудови геоакустичної моделі досліджуваного розрізу гірських порід Дніпровсько-Донецької западини залежно від наявного комплексу геофізичних досліджень свердловин; – аналіз існуючих способів і методик прогнозування параметрів геоакустичної моделі (швидкості розповсюдження пружних коливань у пласті, акустичної жорсткості досліджуваного середовища та коефіцієнтів відбиття) за обмеженого комплексу ГДС; – визначення точності прогнозу вище названих параметрів геоакустичної моделі на прикладі свердловини № 6 Свиридівської площі.

Проведено обробку та інтерпретацію геофізичних досліджень свердловин у досліджуваному розрізі. Розраховано компонентний склад гірських порід. За методикою побудови лінійних геоакустичних моделей свердловин проведено моделювання пластової швидкості розповсюдження пружних коливань та густини гірських порід. У роботі зроблено спробу класифікації всіх основних способів визначення параметрів геоакустичної моделі за допомогою різних даних геофізичних досліджень свердловин. Проаналізовано можливість визначення пластових швидкостей та коефіцієнтів відбиття за даними електрокаротажу, нейтронного каротажу та нормальних залежностей зміни петрофізичних властивостей гірських порід з глибиною (як вхідну інформацію використано: питомий опір породи за даними градієнт- і потенціал-зондів, бокового каротажу; пористість, визначену за даними електрокаротажу; покази гамма- і нейтронного каротажу; воднеміст; глибину залягання досліджуваних відкладів). Зроблено порівняння отриманих прогнозованих параметрів з фактичними параметрами геоакустичної моделі. Основні результати виконаних експериментів зведено в таблицю, де показано рівняння, що були використані для прогнозу швидкості, парні коефіцієнти кореляції взаємозв'язку прогнозованої і фактичної (спостереженої) швидкостей, а також відносну середньоквадратичну помилку прогнозу швидкості хвиль, акустичної жорсткості та коефіцієнтів відбиття. На базі проведених досліджень наведено конкретні рекомендації щодо розв'язання поставленої задачі, залежно від наявності у інтерпретатора методів ГДС. Теоретичні висновки підтверджено статистичним аналізом.

Ключові слова: геоакустична модель, пластова швидкість, акустична жорсткість, коефіцієнт відбиття.

Вступ. Теоретичні відомості. Основними параметрами геоакустичної моделі, які можуть бути визначені за даними геофізичних досліджень свердловин (ГДС), є: швидкість розповсюдження пружних коливань у пласті (пластові швидкості), акустична жорсткість (хвильовий опір) досліджуваного середовища, коефіцієнти відбиття пружних хвиль.

Коефіцієнт відбиття (K) пружних хвиль на границі двох пластів є відношенням амплітуд відбитої або заломленої хвилі до амплітуди падаючої хвилі. Акустична жорсткість (G) – це добуток густини (δ) на пластову швидкість. За наявності якісного запису щільнісного

(ГГК-Щ) і акустичного (АК) каротажів визначення названих вище параметрів не викликає складностей.

Ситуація дещо ускладнюється при відсутності ГГК-Щ, що є типовим випадком у практиці каротажу. Це обумовлено, по-перше, відсутністю відповідної апаратури, що використовувалася у старому фонді свердловин (до середини 80-их років минулого століття); по-друге, навіть у свердловинах нового фонду використання ГГК-Щ часто обмежене продуктивними або перспективними інтервалами. Для цілей сейсмораметрики необхідно мати дані про густину всього розрізу гірських порід у цілому. В такому випадку задача розв'язується шляхом