

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.834

С. Вижва, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vsa@univ.kiev.ua,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна,
Г. Лісний, д-р геол. наук, доц.,
E-mail: lesnoygd@gmail.com,
В. Круглик, пров. геолог,
E-mail: v.kruglyk@gmail.com,
ТОВ "Тутковський геофізика",
вул. Рилєєва, 10-а, м. Київ, 04073, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ГРАФІЧНИХ ПРОЦЕСОРІВ ДЛЯ ПОБУДОВИ СЕЙСМІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА

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

Розроблено новий алгоритм та комп'ютерну програму для побудови двовимірних та тривимірних сейсмічних зображень неоднорідних анізотропних середовищ на основі паралельних обчислень на графічних процесорах. Основним типом вихідних даних для програми є сейсмограми спільних джерел довільної конфігурації. Передбачено можливість побудови швидкісних моделей та сейсмічних зображень за сейсмограмами обмінних хвиль та з використанням довільних вертикальних координат джерел і приймачів. Для визначення швидкісної моделі геологічного середовища використовуються багатовимірні спектри швидкостей сейсмічних хвиль та застосовується спосіб анізотропної декомпозиції сейсмічних зображень. Виконано порівняння сейсмічних зображень, що отримані з використанням графічних процесорів та програмного забезпечення власної розробки, а також кластерних обчислювальних систем та програмного забезпечення для пре-стек міграції провідних компаній. Як вихідні дані використано реальні сейсмограми спільних джерел, що отримані на площі із складною геологічною будовою та мають некоректну просторову дискретизацію.

На основі отриманих результатів продемонстровано стійкість розробленої обчислювальної схеми щодо некоректності просторової дискретизації сейсмограм, більш точне визначення швидкісної моделі геологічного середовища з урахуванням анізотропії швидкостей поширення сейсмічних хвиль, показано ефективність застосування графічних процесорів для прямого перетворення сейсмограм спільних джерел на сейсмічні зображення геологічного середовища.

Ключові слова: сейсмічні зображення, швидкості поширення сейсмічних хвиль, спектри швидкостей, анізотропія швидкостей, паралельні обчислення, графічні процесори.

Вступ. Побудова сейсмічних зображень традиційно потребує найбільшої кількості обчислень у геофізиці. Особливо це стосується прямого перетворення сейсмограм спільних джерел на об'ємні сейсмічні зображення геологічного середовища. Отже, світова тенденція використання графічних процесорів у цій галузі є цілком обгрунтованою [4, 5, 7]. Незважаючи на очевидну економічну доцільність впровадження обчислень на графічних процесорах у практику сейсморозвідувальних робіт, цей процес у світі йде досить повільно. На початковому етапі його стримували, в основному, технічні проблеми, наприклад, недостатня кількість графічних ядер, малий обсяг пам'яті на графічних картах, складності в організації ефективних паралельних обчислень. Сьогодні до цих стримуючих факторів додалися комерційні інтереси компаній, що виробляють кластерні обчислювальні системи.

Враховуючи це, а також потреби вітчизняної сейсморозвідки у програмному забезпеченні для паралельних обчислень на графічних процесорах, на кафедрі геофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка розроблено та впроваджено у виробництво технологію та пакет програм для побудови швидкісних моделей та об'ємних сейсмічних зображень анізотропних середовищ.

Виклад основного матеріалу та обговорення. Програмне забезпечення функціонує під керуванням операційної системи Windows із 64-бітною архітектурою. Основним типом вихідних даних є наземні або свердловинні сейсмограми спільних джерел довільної розмірності та довільної конфігурації. Передбачено можливість побудови швидкісних моделей та сейсмічних зображень за сейсмограмами обмінних хвиль. Пакет програм не має обмежень щодо регулярності та обсягу вихідних сейсморозвідувальних даних. Реалізовано можливість побудови сейсмічних зображень для довільних вертикальних координат джерел та прийма-

чів. Це дозволяє ефективно будувати сейсмічні зображення з використанням сейсмограм спільних джерел, що отримані в умовах складного, в тому числі гірського, рельєфу. Окремою опцією використанням сейсмограм з довільними вертикальними координатами джерел та приймачів є побудова об'ємних сейсмічних зображень за даними свердловинної сейсморозвідки.

Інтерфейс пакету програм передбачає автоматичну візуалізацію результатів у процесі обчислень. Різні варіанти розрізів сейсмічних зображень відображаються у головному вікні програми, у трьох додаткових незалежних вікнах для візуалізації ортогональних розрізів зображень та у вікні тривимірної візуалізації. Можливість аналізу сейсмічних зображень у процесі обчислень дозволяє корегувати параметри їх побудови, а також запобігати неефективним витратам часу на обчислення у разі ймовірного негативного результату. Крім того, візуалізація поточного стану зображень дозволяє робити попередні висновки щодо особливостей геологічного середовища ще до завершення процесу побудови сейсмічних зображень.

Визначення швидкісної моделі геологічного середовища може бути виконано за спектрами швидкостей та в автоматичному режимі. Для цього застосовується технологія анізотропної декомпозиції сейсмічних зображень [1]. Швидкісні моделі та сейсмічні зображення геологічного середовища, що отримані з використанням даного програмного забезпечення, зберігаються у сучасних цифрових форматах та передаються в будь-які пакети програм обробки та інтерпретації сейсморозвідувальної та іншої геолого-геофізичної інформації.

Приклади застосування даного програмного забезпечення для сейсморозвідувальних даних, що отримані за регулярною ортогональною системою спостережень, розглянуто в роботах [2, 3] та інших. Разом з тим, значний інтерес становить використання програмного забезпечення у разі некоректних щодо просторової дис-

кретизації сейсмічних зйомок. Основною причиною проектування нерегулярних зйомок є складні поверхневі умови. Некоректна просторова дискретизація є доволі поширеною навіть у ортогональних системах спостережень. Доволі часто інтервали дискретизації сейсмограм спільних джерел для сейсмічних зйомок у Дніпровсько-Донецькій западині становлять 400 м в напрямку ліній джерел та 50 м в напрямку ліній приймачів. Такі інтервали дозволяють виконувати коректну дискретизацію для просторових частот $K_x = 0.00125$ (1/м) та $K_y = 0.01$ (1/м) відповідно. Значення можливих просторових частот для вказаних напрямків відрізняються у вісім разів. Спектр відбитої хвилі, що відповідає розрізу сейсмограми у напрямку x , є періодизованим з інтервалом 0,0025 (1/м). Отже, розглянута дискретизація сейсмограми загального джерела передбачає, що модель середовища не може істотно змінюватися у напрямку x , або ці зміни мають бути малі порівняно з розмірами зйомки в цьому напрямку.

Разом із ускладненням поверхневих умов проблема некоректної просторової дискретизації сейсмограм спі-

льних джерел поглиблюється. Екстремальним варіантом щодо некоректності просторової дискретизації є випадкова зйомка. У цьому разі дуже складно кількісно оцінити рівень некоректності просторової дискретизації. Характерним прикладом такої системи спостережень є так звана сейсмічна петля (або *seisloop* в англійському варіанті) [6]. У цьому випадку приймачі та джерела розташовуються уздовж випадкової замкнутої лінії, що утворює сейсмічну петлю, а також усередині петлі. Такий зйомці відповідає нерегулярна кратність, розподіл віддалень та азимутальний розподіл.

Спробуємо побудувати об'ємне сейсмічне зображення з використанням сейсмограм спільних джерел, отриманих для випадкової системи спостережень, що нагадує згадану вище сейсмічну петлю. На рис. 1 наведено фрагмент такої зйомки, де хрестами показано джерела сейсмічних хвиль, а колами – приймачі. Джерела та приймачі розташовані нерегулярно. Лінія джерел не збігається з лінією приймачів, а конфігурація ліній обумовлена відповідними поверхневими умовами.

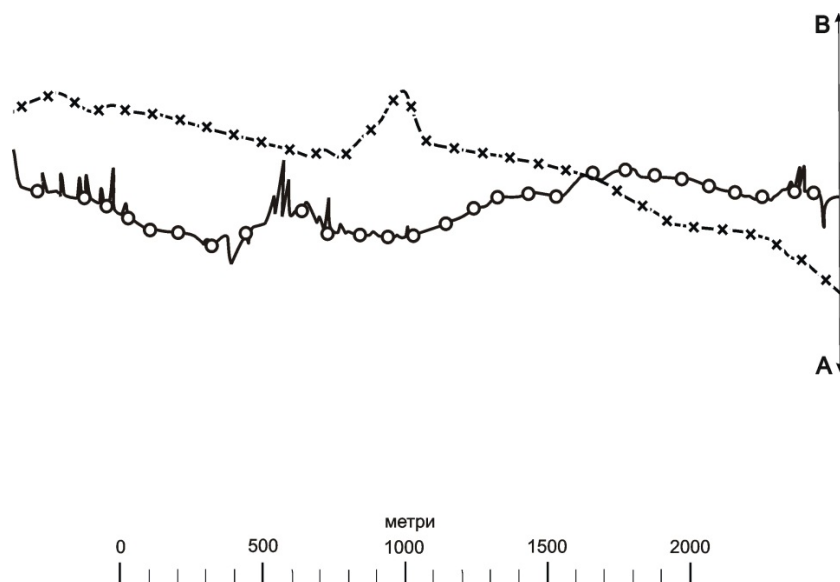


Рис. 1. Фрагмент схеми спостережень випадкової зйомки: колами показано приймачі, хрестами – джерела; АВ – ширина смуги побудови сейсмічного зображення

Область побудови сейсмічного зображення визначається смугою А–В шириною 1250 м та довжиною 14 000 м, центральному фрагменту якої відповідає рис. 1. Побудова зображення виконувалася у два способи. Для реалізації першого способу використано кластер IBM/Dell Claster із 176 процесорами та продуктивністю 1780 Gigaflors, а також програмне забезпечення провідних компаній для пре-стек міграції за алгоритмом Кірхгофа. Для отримання зображення у другий спосіб використовувалася графічна карта Tesla C2075 із 448 обчислювальними ядрами та продуктивністю 515 Gigaflors, а також програмне забезпечення власної розробки для пре-стек міграції за алгоритмом Кірхгофа на основі паралельних обчислень на графічних картах. У обох випадках використовувалася середньошвидкісна модель поперечно-ізотропного середовища з вертикальною віссю симетрії та еліптичною апроксимацією індикатрис променевої швидкості.

На рис. 2 показано порівняння результатів побудови сейсмічних зображень у два різні способи для ізотропної моделі геологічного середовища.

За допомогою рис. 2 проаналізуємо відмінності результатів побудови сейсмічних зображень на традиційному кластерному програмному забезпеченні та з вико-

ристанням програмного забезпечення власної розробки для графічних карт.

У цілому можна зазначити, що роздільна здатність сейсмічних зображень на рис. 2–а є значно меншою, ніж на рис. 2–б. Це обумовлено більш низькочастотним характером спектрів за часовими частотами, що є типовим для поширених програм побудови сейсмічних зображень перед підсумовуванням для середньошвидкісної моделі середовища.

Серія відбиваючих границь у інтервалі пікетів 101–151 та в часовому інтервалі від -400 до -800 мс на рис. 2–б виглядає більш інформативно, порівняно з рис. 2–а. На рис. 2–б на пікеті 151 добре видно вертикальний розлом, який на рис. 2–а виглядає нечітко (оконтурений еліпсом А). Вертикальний розлом, що відповідає пікету 85, більш виразно виглядає на рис. 2–б (оконтурений еліпсом В). Середня частина сейсмічного зображення на рис. 2–б характеризується доволі високою роздільною здатністю, порівняно з рис. 2–а. Це дозволяє використовувати зображення рис. 2–б для впевненої кореляції відбиваючих границь та побудови структурно-тектонічної моделі. Неглибокі відбиваючі границі на пікетах 400–500 у правій частині зображення, наведеного на рис. 2–б, (оконтурені еліпсом С) також вигля-

дають більш інформативними, порівняно із зображенням на рис. 2-а, на якому деякі неглибокі відбиваючі границі взагалі відсутні.

При переході до анізотропного середовища спостерігається процес підсилення та згасання амплітуд хвиль, що відповідають відбиваючим границям. Підсилення або згасання амплітуд залежить, відповідно, від

ступеня збігу або розбіжності швидкісної моделі, що використовується для побудови сейсмічних зображень, та реального розподілу швидкостей поширення сейсмічних хвиль у геологічному середовищі.

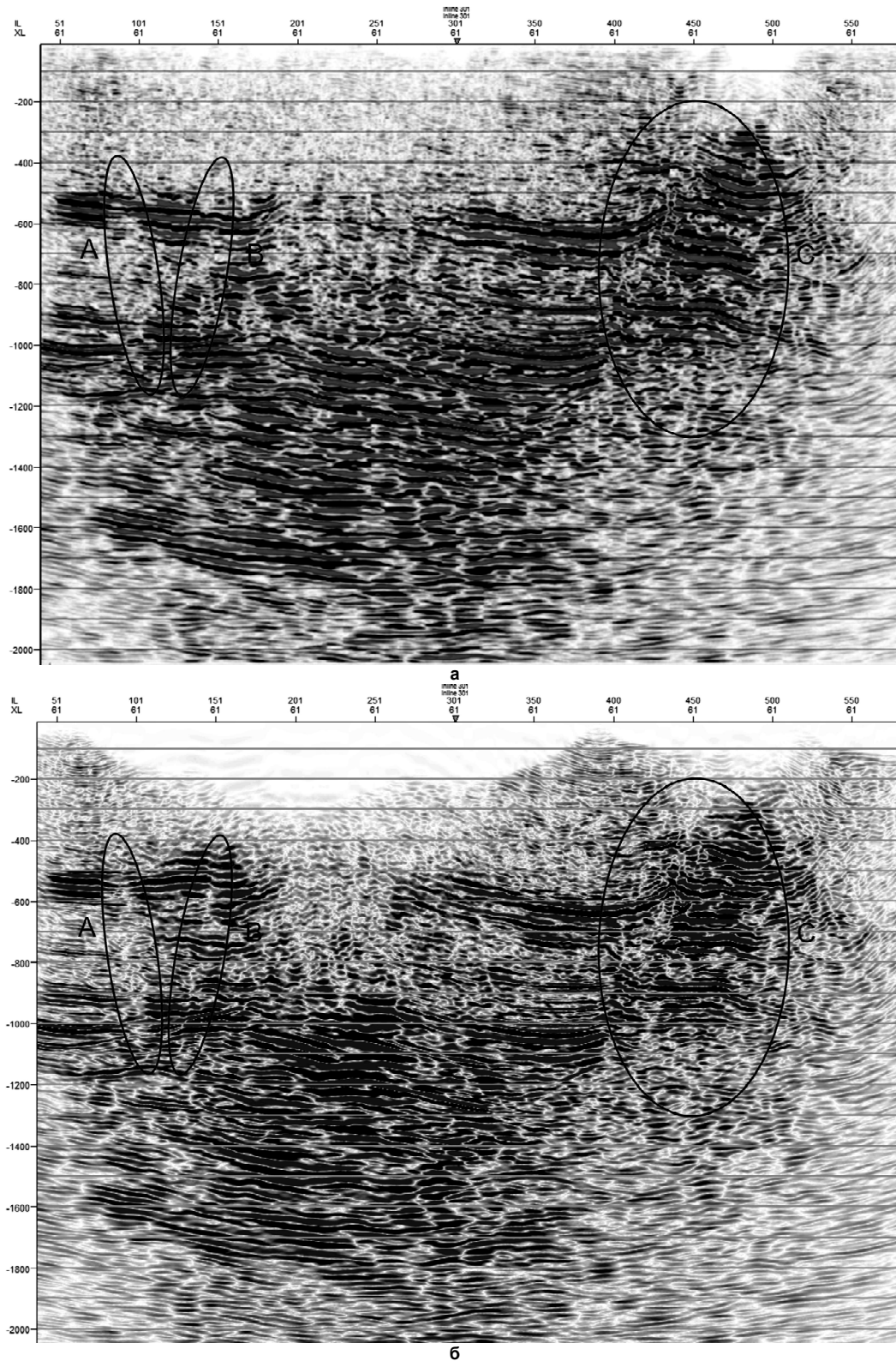


Рис. 2. Вертикальний розріз об'ємного сейсмічного зображення для центральної лінії, який побудовано з використанням: а – кластеру IBM/Dell Cluster та програмного забезпечення сторонніх виробників, б – графічної карти Tesla C2075 та програмного забезпечення власної розробки. Зображення відповідає ізотропній швидкісній моделі геологічного середовища

Описані переваги сейсмічних зображень, що отримані з використанням програмного забезпечення власної розробки, пояснюються таким чином. Значні обчислювальні можливості та ефективна передача даних графічних карт дозволили реалізувати адаптивний алгоритм побудови об'ємних сейсмічних зображень на основі розробленого авторами способу анізотропної декомпозиції [1]. Основна ідея способу полягає у автоматичній корекції швидкісної моделі середовища для анізотропного наближення. Адаптивний алгоритм корекції швидкісної моделі передбачає також можливість використання різних швидкісних законів для падаючих та висхідних хвиль, регулювання апертури інтегральних перетворень та інші технологічні особливості.

Розроблена програма побудови сейсмічних зображень є доволі стійкою щодо використання сейсмограм спільних джерел з некоректною просторовою дискретизацією. Підвищення стійкості до некоректної просторової дискретизації сейсмограм забезпечується просторовою інтерполяцією з визначенням положення поверхонь рівних фаз хвиль на сейсмограмах.

Висновок. У роботі проаналізовано результати побудови об'ємних сейсмічних зображень за допомогою кластеру із 176 процесорами продуктивністю 1780 GigaFlops та стандартного, поширеного у світі, програмного забезпечення для пре-стек міграції, а також за допомогою графічної карти Tesla C2075 із 448 обчислювальними ядрами продуктивністю 515 GigaFlops та програмного забезпечення для пре-стек міграції власної розробки, яке реалізує паралельні обчислення на графічних картах. У обох випадках швидкість обчислень є приблизно однаковою. Побудову сейсмічних зображень виконано як для ізотропної швидкісної моделі середовища, так і для поперечно-ізотропного середовища з вертикальною віссю симетрії та різною величиною анізотропії. Сейсмічні зображення, отримані з використанням програмного забезпечення власної розробки, характеризуються більшою роздільною здатністю порівняно із результатами, що отримані з використанням стандартного програмного забезпечення для кластерних систем. Важливі структурно-тектонічні елементи є більш інформативними на сейсмічних зображеннях, що побудовані з використанням власного програмного забезпечення.

Розроблена технологія, алгоритми та пакет програм швидкісного аналізу та прямого перетворення сейсмограм спільних джерел на сейсмічні зображення для неоднорідних анізотропних середовищ може застосовува-

тися як для поверхневих сейсмічних даних, так і для сейсмограм вертикального сейсмічного профілювання. Для побудови сейсмічних зображень можуть використовуватися сейсмограми монотипних та обмінних хвиль.

Розроблене програмне забезпечення може використовуватися як для розв'язання виробничих задач, так і для навчальних цілей, завдяки відкритому коду, можливість його модифікації та додавання нових обчислювальних блоків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Лісний Г. Д. Анізотропна декомпозиція сейсмічних зображень / Г. Д. Лісний // Геолог України. – 2012. – № 1–2. – С. 94–103.
2. Лесной Г. Д. Возможности определения скоростной модели с эллиптической анизотропией с помощью прямого преобразования сейсмограмм общих источников в сейсмические изображения геологической среды / Г. Д. Лесной // Геолог Украины. – 2010. – № 4 (32). – С. 69–75.
3. Лісний Г. Д. Результати явного врахування анізотропії швидкостей щодо побудови сейсмічних зображень геологічного середовища / Г. Д. Лісний, П. О. Загороднюк // Геолог України. – 2013. – № 1(41). – С. 42–55.
4. Deschizeaux B. Imaging Earth's subsurface using CUDA / B. Deschizeaux, J. Y. Blanc // NVidia GPU Gems. – 2009. – N 38. – P. 831–851.
5. Johansen O. Seismic Shot Processing on GPU / O. Johansen. – Oslo : NTNU, 2009. – 60 p.
6. Mithilesh Kumar. Seisloop based 3D seismic survey: an unconventional approach / Kumar Mithilesh, Dr. R. Dasgupta // 10th Biennial International Conference and Exposition, India, 2013. – Duliajan, 2013.
7. Wang Z. Modeling seismic wave propagation using graphics processor units (GPU) / Z. Wang, S. Peng, T. Liu // International symposium on networking and network security, 2–4 April 2010, China. – Jinggangshan, 2010.

REFERENCES:

1. Lisny G. D. (2012). Anisotropic decomposition of the seismic images. Geolog of Ukraine, 1–2, 94–103. [in Ukrainian].
2. Lisny G. D. (2010). The possibilities of the velocity model determination using pre-stack migration for geological media with elliptical anisotropy. Geolog of Ukraine, 4, 69–75. [in Russian].
3. Lisny G. D., Zagorodnyuk P. O. (2013). The results of implicit accounting of the velocity anisotropy concerning geological media seismic imaging. Geolog of Ukraine, 1, 42–55. [in Ukrainian].
4. Deschizeaux B., Blanc J. Y. (2009). Imaging Earth's subsurface using CUDA. NVidia GPU Gems, 38, 831–851.
5. Johansen O. (2009). Seismic Shot Processing on GPU. Oslo: NTNU. 60 p.
6. Mithilesh Kumar, Dasgupta Dr. R. (2013). Seisloop based 3D seismic survey: an unconventional approach. 10th Biennial International Conference and Exposition. Duliajan, India.
7. Wang Z., Peng S., Liu T. (2010). Modeling seismic wave propagation using graphics processor units (GPU). International symposium on networking and network security, 2–4 April 2010. Jinggangshan, China.

Надійшла до редколегії 30.10.16

Vyzhva S., Dr. Sci. (Geol.), Prof.
E-mail: vsa@univ.kiev.ua
Institute of Geology
Taras Shevchenko National University of Kyiv
90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022 Ukraine,
Lisny G., Dr. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.
E-mail: lesnoygd@gmail.com,
Kruhlyk V., Chief Geologist
E-mail: v.kruglyk@gmail.com,
Tutkovsky Geophysics LLC
10-a Rileeva Str., Kyiv, 04073 Ukraine

USE OF GRAPHIC PROCESSORS FOR CONSTRUCTION OF THE GEOLOGICAL MEDIA SEISMIC IMAGES

The new algorithm and appropriate software for construction of two dimensional and three dimensional seismic images of inhomogeneous anisotropic images were developed. Graphic processing units were used for this problem solution. The main input data type for this software is common shot point seismograms with free configuration. The possibility of velocity models and seismic images construction using free vertical coordinate of sources and receivers was provided. For determination of velocity model of geological media the multidimensional velocity spectra of seismic waves are used. The method of anisotropic decomposition of seismic image is used as well. The comparison of seismic images obtained using graphic processors and individual software as well as cluster calculation system and leading companies software for pre-stack migration was done. The real field common shot point seismograms were used as input data. These seismograms were obtained for area with complex geological structures. The seismic data were characterized by incorrect space sampling of common shot point seismograms.

The stability of developed calculation scheme against incorrect space sampling was demonstrated on the basis of obtained results. Additionally, more precise velocity model detection was shown on the basis of accounting of wave propagation anisotropy. The efficiency of graphic processor use for straight transformation of common shot point seismograms into seismic images was shown as well.

Keywords: seismic images, seismic waves propagation velocities, velocity spectra, velocity anisotropy, parallel computation, graphic processors.

Выжва С., д-р геол. наук, проф.
E-mail: vsa@univ.kiev.ua,
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина,
Лесной Г., д-р геол. наук, доц.,
E-mail: lesnoygd@gmail.com,
Круглик В., ведущий геолог,
E-mail: v.kruglyk@gmail.com,
ООО "Тутковский геофизика",
ул. Рылеева, 10-а, г. Киев, 04073, Украина

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Разработан новый алгоритм и компьютерная программа для построения двухмерных и трехмерных сейсмических изображений неоднородных анизотропных сред на основе параллельных вычислений на графических процессорах. Основным типом исходных данных для программы являются сейсмограммы общих источников произвольной конфигурации. Предусмотрена возможность построения скоростных моделей и сейсмических изображений по сейсмограммам обменных волн, а также с использованием произвольных вертикальных координат источников и приемников. Для определения скоростной модели геологической среды используются многомерные спектры скоростей сейсмических волн, а также применяется способ анизотропной декомпозиции сейсмических изображений. Выполнено сравнение сейсмических изображений, полученных с использованием графических процессоров и программного обеспечения собственной разработки, а также кластерных вычислительных систем и программного обеспечения для пре-стек миграции ведущих компаний. В качестве исходных данных использованы реальные сейсмограммы общих источников. Сейсмограммы получены на площади со сложным геологическим строением и характеризуются некорректной пространственной дискретизацией.

На основе полученных результатов продемонстрирована устойчивость разработанной вычислительной схемы в отношении некорректности пространственной дискретизации сейсмограмм, показано более точное определение скоростной модели геологической среды с учетом анизотропии скоростей распространения сейсмических волн, а также эффективность применения графических процессоров для прямого преобразования сейсмограмм общих источников в сейсмические изображения геологической среды.

Ключевые слова: сейсмические изображения, скорости распространения сейсмических волн, спектры скоростей, анизотропия скоростей, параллельные вычисления, графические процессоры.