

© П.М. Кузьменко, А.П. Тищенко, В.І. Мироненко,
Є.Є. Коровніченко, О.М. Безхижко, О.П. Лобасов, 2008

УДК 550.834

ДП “Науканафтогаз” НАК “Нафтогаз України”, м. Київ

ПОБУДОВА 3D-ШВИДКІСНИХ МОДЕЛЕЙ ЗА СЕЙСМІЧНИМИ ДАНИМИ 2D

Вступ. Однією з важливих задач сейсморозвідки є отримання даних стосовно швидкості розповсюдження пружних хвиль у середовищі [1–5]. На жаль, оцінити тривимірну швидкісну модель не завжди можливо. Якщо маємо справу з 3D сейсмічними даними, такої проблеми не виникає. Під час роботи з 2D даними також доцільно мати тривимірну швидкісну модель середовища, що дає змогу використовувати потужний апарат 3D-інтерпретації [2, 3]. Побудувати таку модель у цьому випадку можна лише за 2D даними [3].

На цей час переважну більшість площ в Україні відпрацьовано у профільному варіанті, тому немає можливості використати переваги 3D-спостережень. В умовах отримання 2D сейсмічних матеріалів у районах зі складними сейсмогеологічними умовами особливо гострою є проблема кореляції та ув'язки 2D профілів після процедури глибинної міграції. Часто виникає розбіжність кореляції фаз як за глибиною, так і за динамічними властивостями через наявність можливих розбіжностей значень інтервальних швидкостей на перетинах профілів, що не дає змоги повною мірою побудувати навіть товстошарувату модель геологічного середовища. Найбільше проблем виникає за наявності зворотного градієнта швидкості та криволінійної конфігурації профілів.

У процесі обробки даних 2D профільної зйомки не вдається оцінити просторовий розподіл швидкостей за умови відсутності спеціалізованого програмного забезпечення. Нині у світовій практиці з використанням тих чи інших методик застосовують різні програмні розробки з метою отримання тривимірної швидкісної моделі геологічного середовища за даними 2D профільної зйомки. Як правило, такі розробки є однією із багатьох складових частин спеціалізованих математичних пакетів, придбання яких потребує значних коштів. Проблемою отримання псевдо-тривимірних сейсмічних побудов займалося багато дослідників, зокрема картуванням тривимірних структур з використанням 2D сейсміки [3, 5]. Відповідно було розглянуто проблему перерахунку часового розрізу в глибинний з використанням геостатистичних способів оцінки свердловинних і сейсмічних даних. Ос-

новну увагу зосереджували на псевдо-3D структурних побудовах. У зв'язку з цим для мінімізації негативного впливу розбіжностей у значеннях інтервальних швидкостей автори статті зробили спробу розробки та комп'ютерної реалізації технології побудови тривимірної швидкісної моделі інтервальних швидкостей за сейсмічними даними 2D. Ця розробка реалізована на рівні зручного у використанні автономного та дешевого програмного продукту. Розраховану швидкісну модель використовували для глибинної 2D міграції Кірхгофа та під час проведення інтерпретаційного процесу.

Методика отримання псевдо- 3D кубу швидкостей. Нижче викладено технологічний процес отримання кінцевого результату – тривимірної моделі інтервальних швидкостей за даними 2D профільної зйомки. Спочатку проводиться цикл детальної обробки сейсмічних даних:

- первинна обробка даних;
- ослаблення регулярних та нерегулярних хвиль-перешкод;
- розрахунок повного циклу статичних поправок (якщо роботи проводять з наземними сейсмічними даними);
- отримання профільних розрізів інтервальних швидкостей перерахунком швидкостей СГТ за допомогою алгоритму згладжених градієнтів в інтервальні швидкості;
- формування розрізів інтервальних швидкостей у вигляді файлів SGY-формату.

Вихідними даними для розв'язання задачі є сукупність швидкісних розрізів у вигляді файлів SGY-формату із прописаними в заголовках трас координатами.

Обробка цих даних зводиться до такої послідовності кроків:

- формування на базі двовимірних часових розрізів СГТ вертикальних трас значень інтервальної швидкості, згладжених за часовою шкалою;
- розшарування відліків інтервальної швидкості вертикальних трас на часові верстви із заданим кроком;
- побудова по часових верствах числових моделей розподілу швидкостей;
- генерація із числових моделей 3D кубу швидкостей;
- формування 3D кубів даних довільної конфігурації або вилучення з куба значень швидкостей по 2D профілях довільної конфігурації у форматі SGY.

Заключним кроком цього процесу є експорт нових значень інтервальних швидкостей в базу даних програмного продукту, в якому виконується процедура 2D глибинної міграції.

Основним елементом зазначеної технології є побудова почасових числових моделей швидкостей. Її здійснюють з використанням ГІС-технологій ап-

роксимацією синхронних значень швидкості на трасах профілів. Задачу розв'язують у варіаційній постановці в класі сплайн-функцій, визначених на прямокутному базисі. В кожному вузлі ij мережі точок прямокутного базису розраховують базисну функцію у вигляді двовимірного полінома третього степеня (сплайн) $s_{ij}(x, y)$, коефіцієнти якого залежать лише від конфігурації базису, в загальному випадку нерегулярному. Процедура розрахунку сплайну [6] забезпечує побудову максимально гладкої результуючої поверхні, яка має вигляд

$$z_1(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} s_{ij}(x, y), \quad (1)$$

де l – номер часового шару; x, y – координати довільної точки в межах області побудови моделі швидкості; n – число вузлів по x ; m – число вузлів по y ; i, j – номери рядка та стовпчика вузла прямокутного базису відповідно; a_{ij} – елемент матриці коефіцієнтів;

Значення $z_1(x, y)$ знаходимо за умови мінімізації за коефіцієнтами a_{ij} середньоквадратичного функціоналу вигляду:

$$I_1 = w_1 \sum_{i=1}^L [z_i - z_1(x, y)]^2, \quad (2)$$

де w_1 – ваговий коефіцієнт на середньоквадратичний функціонал; z_i – значення швидкості на часовому зрізі; L – загальна кількість значень швидкості на часовому зрізі.

Додатково накладаємо обмеження на першу та другу похідні $z_1(x, y)$, тобто мінімізуємо функціонал

$$I_2 = w_2 \int_{\Omega} \left\{ v \left[\frac{\partial^2 z_1(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z_1(x, y)}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 z_1(x, y)}{\partial y^2} \right]^2 + (1-v) \left[\frac{\partial z_1(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial z_1(x, y)}{\partial y} \right]^2 \right\}, \quad (3)$$

де w_2 – ваговий коефіцієнт на функціонал.

Функціонал стабілізує модель в області екстраполяції. Величина $v = [0, 1]$: $v \sim 1$ забезпечує наближення $z_1(x, y)$ до середнього значення швидкості, розрахованого в L точках спостереження, $v \sim 0$ забезпечує набуті градієнти функції на межі області екстраполяції. Значення параметра підбирають на основі досвіду.

В системі передбачено врахування апріорної інформації заданої у вигляді певної просторової функції $F(x, y)$, до якої шукана функція може бути подібною за формою або значеннями.

У першому випадку в систему додаємо функціонал

$$I_3 = w_3 \int_{\Omega} \left[\left(\frac{\partial z_1(x, y)}{\partial x} - \lambda \frac{\partial F(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z_1(x, y)}{\partial y} - \lambda \frac{\partial F(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right], \quad (4)$$

де $\lambda = [0, 1]$ – коефіцієнт подібності.

У другому випадку доданий функціонал, має вигляд

$$I_4 = w_4 \int_{\Omega} [z_1(x, y) - F(x, y)]^2, \quad (5)$$

де w_3, w_4 – вагові коефіцієнти на функціонали; Ω – область апроксимації.

У такій постановці задачу розв’язано у вигляді програмного комплексу “Горизонт” для моделювання регіональної геологічної будови [7]. В 1998 р. комплекс адаптовано до нових системних можливостей і реалізовано в середовищі геоінформаційної системи ArcView 3.2 [8, 9]. Останній варіант і використовують під час побудови почасових “горизонтальних” моделей швидкості.

Ступінь згладжування залежить від щільності первинних даних та їх розподілу на ділянці дослідження: він тим більший, чим менша щільність і більша нерівномірність розподілу первинної інформації. Крім функціонала (3) ступінь згладжування регулюють (в першу чергу) величиною вікна апроксимації, в якому відбувається осереднення.

В процесі побудови числових моделей використовують у разі наявності інформацію про літологічний розріз ділянки дослідження [3]. Для кожного літологічного різновиду задаються середні значення швидкості. Геологічні межі вважають при цьому поверхнями розриву так само, як і тектонічні порушення. Цю апріорну інформацію задають у вигляді окремого 3D файла SGY-формату, який програмно синтезують з 2D геологічної моделі. В обчислювальній схемі її реалізують у вигляді функціоналів (4) і (5).

Застосування технології на досліджуваній площі. Технологія побудови 3D швидкісної моделі за сейсмічними даними 2D реалізована у вигляді програмного комплексу Avenue в середовищі ArcView 3.2 з використанням Fortran Power Station. Для її апробації використано сітку криволінійних 2D профілів по одній із ділянок робіт ДП “Науканафтогаз”.

На рис. 1 показано розподіл швидкості в координатах час – швидкість по одному з таких профілів. Як видно з рисунку, досліджувана територія має досить складний розподіл швидкостей як по вертикалі, так і по латералі. Відзначається обернений вертикальний градієнт швидкості.

Одержаний куб інтервальних швидкостей має 467 ліній в одному напрямку (XLINE) та 394 лінії в другому напрямку (INLINE), з кроком 100 м між лініями. Глибинний інтервал 3500–8000 м. На рис. 2 зображено вертикальні зрізи куба інтервальних швидкостей в інтервалі глибин 3000–8000 м. Для підтвердження отриманої детальності та відображення суттєвої диференціації швидкісних характеристик уздовж ліній сформованого куба, показано відносно невеликий інтервал, а саме середню частину вертикального швидкісного розрізу.

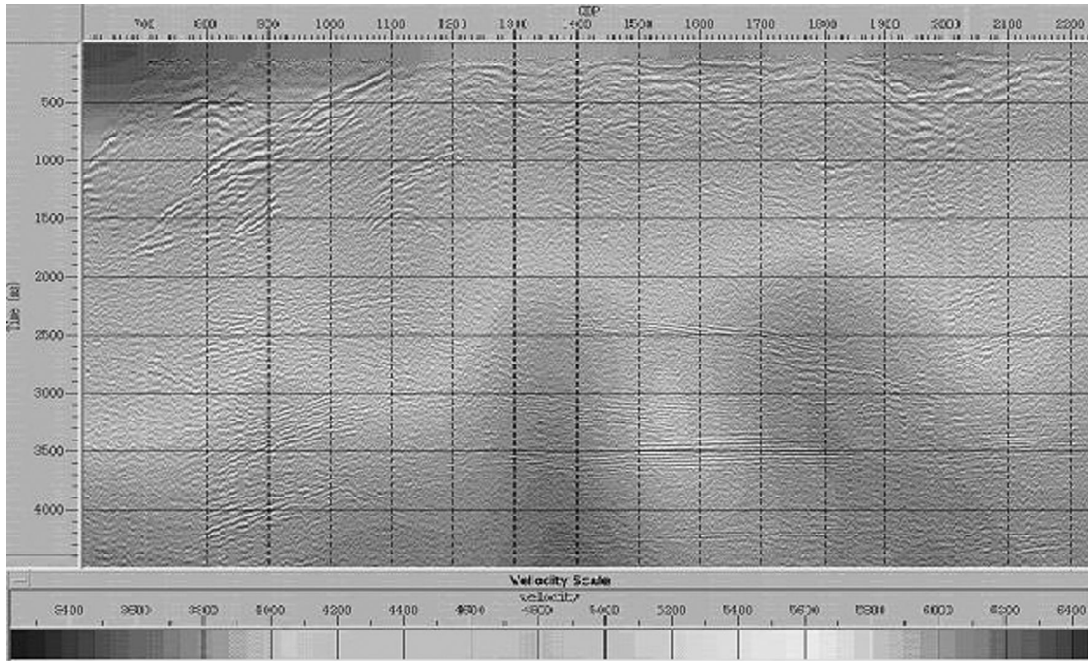


Рис. 1. Один з розрізів швидкостей підсумовування за методом СГТ, накладений на сейсмічний розріз, сукупність яких була використана у побудові тривимірної швидкісної моделі середовища

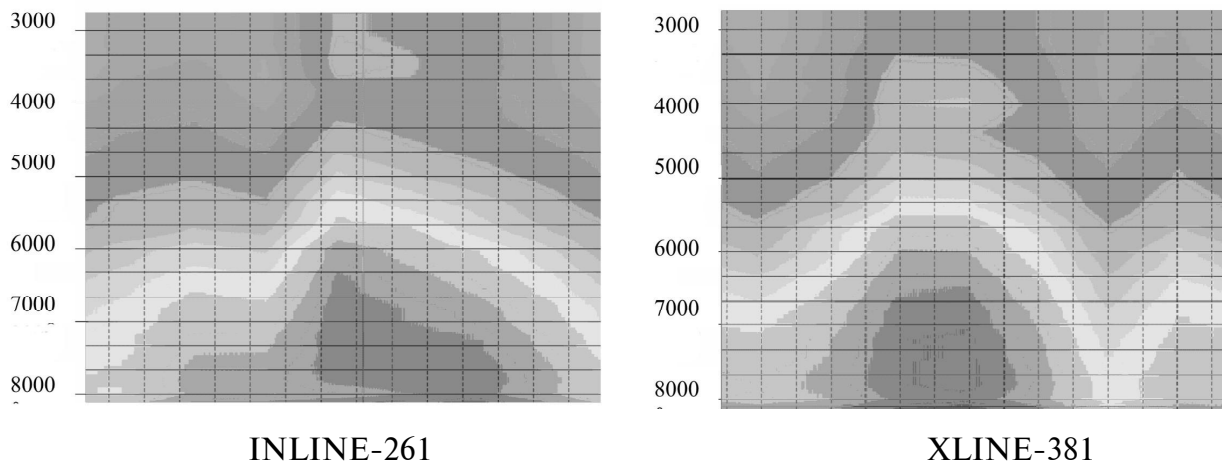


Рис. 2. Вертикальні зрізи кубу інтервальних швидкостей в обох напрямках (INLINE–XLINE) в інтервалі глибин 3000–8000 м

Рис. 3 ілюструє швидкісний горизонтальний зріз на рівні 6000 м з перетином демонстраційних профілів. За латеральним розподілом швидкостей видно, що геологічне середовище має досить складну геологічну будову, яка є не однорідною в літологічному плані. На рис. 3 проглядаються контури сейсмогеологічних комплексів, що характеризуються аномальними значеннями швидкостей. Сітка профілів, за якою отримана 3D швидкісна модель, є досить густою, відповідно перекриває всі структурні одиниці досліджуваної території.

Недоліки ув'язки 2D профілів після глибинної міграції з використанням звичайних інтервальних швидкостей, які отримані на етапі стандартних мані-

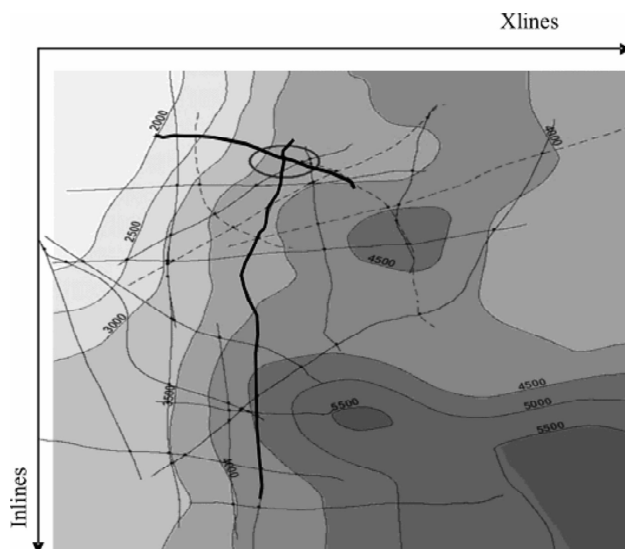


Рис. 3. Просторовий зріз інтервальних швидкостей на рівні 6000 м з нанесенням сітки криволінійних профілів (виділено зону зчленування двох демонстраційних профілів, ізолінії швидкості в м/с)

пуляцій, показано на рис. 4. Відповідно простежується наявність розфазування та неузгодження у динамічному відображенні фаз сейсмічного запису. З рис. 4 можна дійти висновку, що на цьому етапі побудови геологічної моделі середовища уявлення про швидкісну картину не є точним.

За допомогою куба псевдо-3D інтервальних швидкостей вдалося поліпшити результати глибинної міграції з точки зору ув'язки профілів та динамічності вираження сейсмічного сигналу за рахунок цілісної картини розподілу швидкостей (рис. 5).

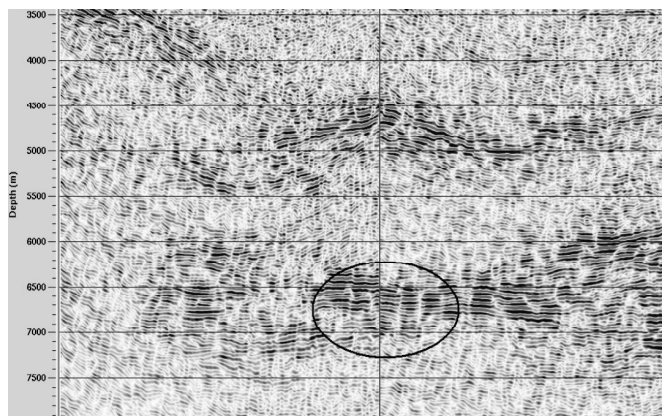


Рис. 4. Фрагменти мігрованих профілів із використанням інтервальних швидкостей, отриманих за стандартною методикою. Вертикальною лінією показано перетин розрізів

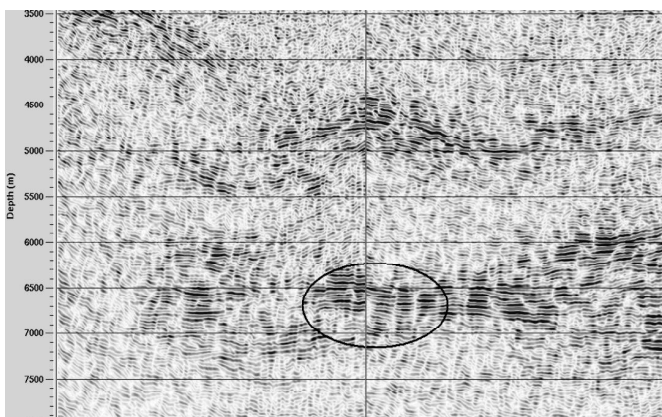


Рис. 5. Фрагменти мігрованих профілів із використанням псевдо-3D інтервальних швидкостей, отриманих за методикою, розробленою авторами. Вертикальною лінією показано перетин розрізів

Задача отримання тривимірної швидкісної моделі є надзвичайно складним і дискусійним питанням, і тому багато дослідників пропонують і впроваджують методи, які дають прийнятні результати, але з певними обмеженнями щодо точності та унікальності просторового розподілу значень швидкостей. Будь-який метод псевдопобудов має строгі обмеження, повноцінне вирішення яких неможливе через некоректність розв'язання оберненої задачі. Максимально точне просторове уявлення про геологічне середовище може зменшити як ризик непродуктивного буріння розвідувальних та експлуатаційних свердловин, так і ризик, пов'язаний із недостатньо точною моделлю геологічного середовища, яке характеризує позиціонування сейсмічних зображень. Великі перспективи демонструє псевдо-3D міграція, але і для неї потрібен просторовий розподіл значень інтервальних швидкостей.

Обговорення та висновки. Автори продемонстрували результативність використання одержаного 3D розподілу швидкостей, за допомогою якого вдалося поліпшити результати обробки сейсмічних даних, зокрема глибинного міграційного перетворення. Слід зазначити, що в процесі міграційного перетворення 2D сейсмічних даних з отриманим тривимірним законом розподілу швидкостей, особливо в складних сейсмогеологічних умовах, не виникає розфазування та зміни динамічної виразності сейсмічного сигналу на перетинах профілів, як це може відбуватися за умови використання 2D швидкісних даних. Оскільки переважна більшість сейсмічної зйомки в Україні зроблена в профільному варіанті, автори змушені використовувати псевдотривимірну (2.5D) методику отримання об'ємних зображень швидкісних характеристик середовища для розв'язання певних задач міграційних перетворень. Такий підхід дає змогу лише частково досягти переваг 3D сейсмічних спостережень і підвищити ступінь адекватності отриманих зображень геологічного середовища.

Програмний комплекс дає змогу створювати куби швидкостей із заданим кроком по осях X та Y та кроком за часом, що відповідає первинній 2D інформації і надає можливість отримання з такого куба швидкісних параметрів вздовж 2D лінії довільної конфігурації у вигляді файла SGY-формату та почасових карт-зрізів розподілу швидкостей. Отримані дані можна використовувати на будь-якому етапі обробки сейсмічних даних: візуалізації 3D швидкісної моделі, підсумовування за методом СГТ, міграції в часовій та глибинній площині, довільних маніпуляцій зі швидкостями на етапі інверсії сейсмічних даних, AVO-аналізу.

Подальші перспективи розвитку вищеописаного методу автори пов'язують з розвитком і вдосконаленням розробленої методики отримання швидкісного розподілу.

1. Войцицкий З.Я., Сидоренко Г.Д., Пархоменко Т.В., Тяпкина А.Н., Хома Р.С. Совершенствование процедур миграции сейсмических записей в свете современных тенденций развития сейсмического метода разведки // Геоинформатика. – 2007. – № 4. – С. 23–30.
2. Мерщій В.В., Полуніч О.І., Ренкас Ю.Л., Ренкас В.Л. Сейсморозвідка 3-D як головний інструмент структурних побудов в складних сейсмогеологічних умовах // Геоінформатика. – 2005. – № 2. – С. 26–31.
3. Houck R.T., House-Finch N.J., Carpenter D.G., Johnson M.L. Mapping 3-D structure using 2-D seismic // The Leading Edge. – 1996. – **15**, № 8. – P. 894–903.
4. Daniel J. Wolf., John D. Logel Geostatistics and depth conversion in the Southern North Sea Basin // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 1991. – P. 251–254.
5. Houck R.T., Johnson M.L., House-Finch N.J. Non-uniqueness of structural mapping from 2-D seismic // Ibid. – 1995. – P. 22.
6. Волков А.М. Геологическое картирование нефтегазоносных территорий с помощью ЭВМ. – М.: Недра, 1988. – С. 53–91.
7. Волков В.А., Гребенников С.Е., Иванов С.А., Кац В.В., Лаптев А.А., Лобасов А.П., Мироненко В.И. Система обработки данных для решения задач разведки нефтяных и газовых месторождений “Горизонт-83” // Разработка и создание АСУ-Геология. – М.: ВИЭМС, 1983. – Вып. 9(49). – С. 63.
8. Гребенніков С.Є., Лобасов О.П. Геолого-математичне моделювання і географічні інформаційні системи в задачі моніторингу седиментаційних басейнів // Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Геологія. – 2001. – Вип. 19. – С. 28–31.
9. Гребенніков С.Є., Лобасов О.П. Моделювання будови осадових басейнів в середовищі ArcView // Мінеральні ресурси України. – 2003. – № 4. – С. 12–13.