

КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ РОЗПОДІЛУ ВЕРТИКАЛЬНИХ ШВИДКОСТЕЙ СЕЙСМІЧНИХ ХВИЛЬ ДЛЯ ЦЕНТРАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКОЇ ЗАПАДИНИ

П. ЗАГОРОДНЮК Кандидат геолого-мінералогічних наук, голова ради директорів Групи компаній Надра
Г. ЛІСНИЙ Кандидат фізико-математичних наук, ТОВ «Надра інтегровані рішення»
В. РЮМІН ТОВ «Надра інтегровані рішення»
Є. УСТЕНКО ТОВ «Надра інтегровані рішення»

Изложены принципы построения скоростных моделей слоистых сред, а также результаты работ по созданию компьютерной модели распределения значений вертикальных скоростей распространения сейсмических волн в центральной части Днепровско-Донецкой впадины. Компьютерная модель позволяет систематизировать данные скважинных сейсморазведочных исследований, а также обеспечивает повышение эффективности сейсморазведки нефти и газа. Это достигается за счет применения новых технологий обработки данных с учетом анизотропии скоростей, а также использования традиционных подходов.

The article states the principles of layered media velocity modeling and the results of computer modeling of the value distribution of the vertical velocity of seismic waves in the central part of the Dnieper-Donets Basin. The computer model is used to integrate the seismic survey data, and to enhance the efficiency of seismic exploration for oil and gas. It is achieved through the application of new technologies for data processing with respect to velocity anisotropy, as well as through the use of traditional approaches.

Ключові слова: сейсморозвідка, сейсмічне зображення, еліптична анізотропія, променеві швидкості.

Ключевые слова: сейсморазведка, сейсмическое изображение, эллиптическая анизотропия, лучевые скорости.

Keywords: seismic prospecting, seismic image, elliptic anisotropy, ray velocities.

Постановка завдання

Для побудови достовірних сейсмічних зображень, що є одним з основних результатів сейсморозвідувальних робіт, необхідно визначити розподіл значень швидкостей поширення сейсмічних хвиль у геологічному середовищі. Більшість осадових басейнів, включаючи центральну частину Дніпровсько-Донецької западини (ДДз), проявляють властивості анізотропії щодо швидкостей поширення сейсмічних хвиль [2, 6]. Анізотропія швидкостей центральної частини ДДз може бути апроксимована еліптичною індикатрисою променевої швидкості. Характерною особливістю таких анізотропних середовищ є некоректність визначення вертикальної півосі індикатриса за результатами поверхневих сейсмічних досліджень. З цієї причини виникають труднощі щодо інтерпретації результатів швидкісного аналізу з використанням результатів поверхневих сейсморозвідувальних досліджень. Враховуючи викладене, розглянемо особливості побудови швидкісної моделі для центральної частини ДДз.

Можливості визначення швидкісних моделей анізотропних середовищ за поверхневими сейсмічними даними

Теорія побудови швидкісних моделей анізотропних середовищ базується на аналізі рівнянь відбиваючих границь на сейсмічних зображеннях [1, 5].

Рівняння відбиваючої границі описує положення цієї границі в залежності від співвідношення між швидкісним законом геологічного середовища та тим, що використовується для побудови сейсмічного зображення.

Для отримання зазначених рівнянь застосовується поняття уявного джерела сейсмічних хвиль в анізотропному середовищі [4]. Використання уявних джерел значно підвищує наочність аналізу сейсмічних зображень. Проте застосування такого підходу супроводжується виникненням певних труднощів, зокрема, зміною форми уявних джерел у залежності від значень швидкостей, які використовуються для побудови сейсмічних зображень. Навіть у найпростішому випадку – плоскій відбиваючій границі в ізотропному середовищі – не виходить отримати прості рівняння

для опису відбиваючих границь, якщо швидкість у середовищі відрізняється від тієї, що використовується для побудови сейсмічних зображень. Зауважимо, що саме цей випадок становить практичний інтерес через неточне встановлення розподілів значень швидкостей у геологічному середовищі. Більше того, для розробки стратегії визначення швидкісного закону необхідно знати, як саме змінюється відбиваюча границя на сейсмічному зображенні через помилки у побудові швидкісної моделі.

Хоча, на перший погляд, це здається парадоксальним, але подолання означених труднощів було пов'язано з ускладненням моделі середовища, тобто переходом від ізотропного до анізотропного середовища. Такий перехід у низці випадків дає можливість замість зміни форми уявного джерела у разі застосування неточного швидкісного закону для міграційного перетворення використовувати його зсув. Це дає можливість одержати низку важливих результатів.

Рівняння відбиваючої границі на сейсмічному зображенні суттєво відрізняється від рівняння границі у середовищі насамперед тим, що воно залежить від розподілу швидкостей поширення сейсмічних хвиль у середовищі та швидкостей, які використовуються для побудови сейсмічного зображення. Рівняння плоскої границі на сейсмічному зображенні еліптично-анізотропного середовища має такий вигляд:

$$z = -x \frac{(-x_s + x_{d2})z_{d2}^2 v_z^2}{(-z_s + z_{d2})z_{d1}^2 v_x^2} - \frac{z_{d2}^2 v_z^2 (x_s^2 - x_{d2}^2)}{2v_x^2 z_{d1}^2 (-z_s + z_{d2})} + \frac{z_{d2}^2 - z_s^2}{2(-z_s + z_{d2})}. \quad (1)$$

де v_x, v_z – параметри індикатриси променевої швидкості; x_s, z_s – координати дійсного точкового джерела; x_{d2}, z_{d1} – координати уявного точкового джерела; x_{d2}, z_{d2} – координати уявного точкового джерела у разі використання помилкової індикатриси променевої швидкості.

Ця формула характеризує сейсмічне зображення, яке побудоване з використанням хибної вертикальної осі індикатриси. В окремому випадку розміщення дійсного джерела на початку координат отримаємо таке рівняння:

$$z = \frac{-xx_{d2}v_z^2 z_{d2}^2}{z_{d2}v_x^2 z_{d1}^2} - \frac{x_{d2}^2 v_z^2 z_{d2}^2}{2v_x^2 z_{d2}^2 z_{d1}^2} + \frac{z_{d2}}{2}. \quad (2)$$

При розташуванні дійсних джерел на одній прямій уявні джерела також лежатимуть на деякій прямій. На рис. 1. зображена плоска відбиваюча границя в анізотропному середовищі, на якій показано декілька пар дійсних та уявних джерел. Дійсні джерела

належать прямій $z = 0$, уявні джерела - d_1 , причому відбиваюча границя Γ_1 у загальному випадку не є бісектрисою кута, утвореного прямими, які містять дійсні та уявні джерела. Враховуючи, що для одного й того ж ефективного швидкісного закону між координатами уявного та хибного уявного джерела існує лінійний зв'язок, можна стверджувати, що хибні уявні джерела також належать певній прямій d_2 .

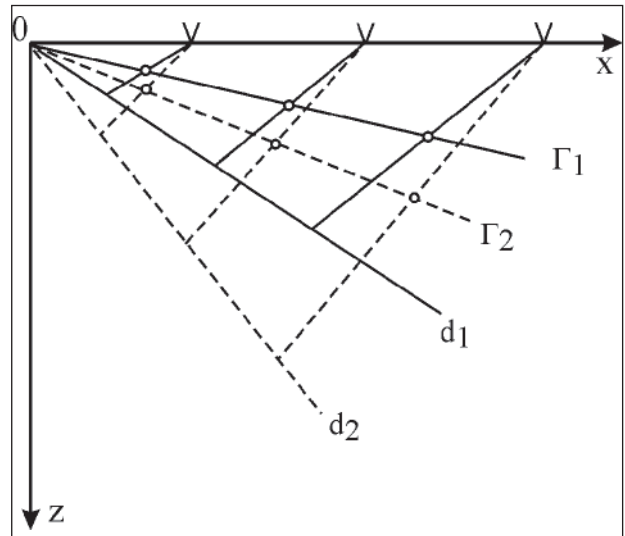


Рис. 1. Сейсмічне зображення, яке отримане з використанням неточної індикатриси швидкості поширення сейсмічних хвиль: Γ_1 – положення відбиваючої границі в середовищі; Γ_2 – положення відбиваючої границі на сейсмічному зображенні, одержаному з використанням неточної індикатриси; d_1 – лінія уявних джерел для правильної індикатриси; d_2 – лінія уявних джерел для помилкової індикатриси

Виділимо основні особливості відбиваючих границь на сейсмічних зображеннях для розглянутих розбіжностей у швидкісних законах.

1. Плоскій відбиваючій границі у середовищі відповідає плоска границя на сейсмічному зображенні.
2. Зміни кутового коефіцієнту та вільного члена плоскої відбиваючої границі на сейсмічному зображенні залежать від величин похибок визначення швидкісної моделі.
3. При зсуві дійсного джерела сейсмічних хвиль уздовж поверхні спостережень хибні плоскі границі на сейсмічному зображенні співпадають.

Відсутність зміни кривизни відбиваючої границі при використанні неточної індикатриси ускладнює проведення аналізу швидкостей за поверхневими сейсмічними даними. Відзначимо, що у випадку ізотропного середовища такої проблеми не виникає. Це пов'язано з тим, що хибне уявне джерело не є точковим, йому відповідає криволінійна відбиваюча границя на сейсмічному зображенні.

Отже, побудова швидкісної моделі еліптично-анізотропного середовища за поверхневими сейсмічними

даними обмежується лише визначенням розподілу значень горизонтальних швидкостей. Визначення вертикальних швидкостей за поверхневими сейсмічними даними в цьому випадку є некоректним. Для побудови моделі розподілу вертикальних швидкостей необхідно використовувати дані свердловинних сейсмічних досліджень.

Методика та результати побудови моделі розподілу вертикальних швидкостей

Як відомо, дані сейсмокаротажу, які були отримані в різні роки різними авторами та за різними методиками (рис. 2), мають певні розбіжності з реальними швидкісними характеристиками. Це пов'язано з певною недосконалістю апаратури, різними методичними підходами та програмним забезпеченням тощо (рис. 3).

Для приведення даних сейсмокаротажу до єдиного рівня були застосовані такі методичні прийоми:

- приведення вертикальних годографів до спільної абсолютної відмітки;
- нормалізація інтервалів просторової дискретизації вертикальних годографів (рис. 4);
- створення електронної бази даних для подальшої обробки показників свердловинної сейсморозвідки.

Для створення моделі вертикальних швидкостей для центральної частини ДДз було використано дані 316 свердловин. Інформацію з 21-ї свердловини (приблизно 6,5%) було відбраковано як непридатну для подальшого використання.

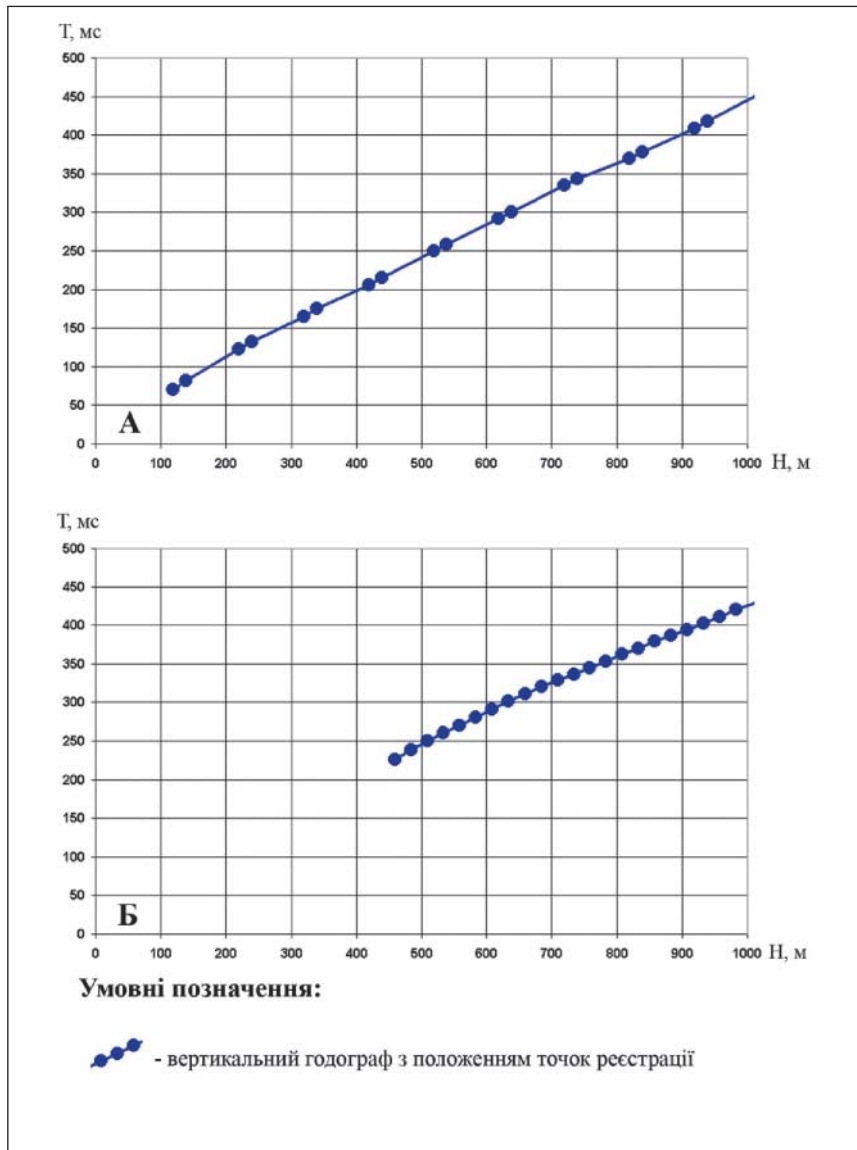


Рис. 2. Фрагмент вертикального годографа з положенням точок реєстрації в свердловинах № 50 Хрестищенська (А) і № 31 Хрестищенська (Б)

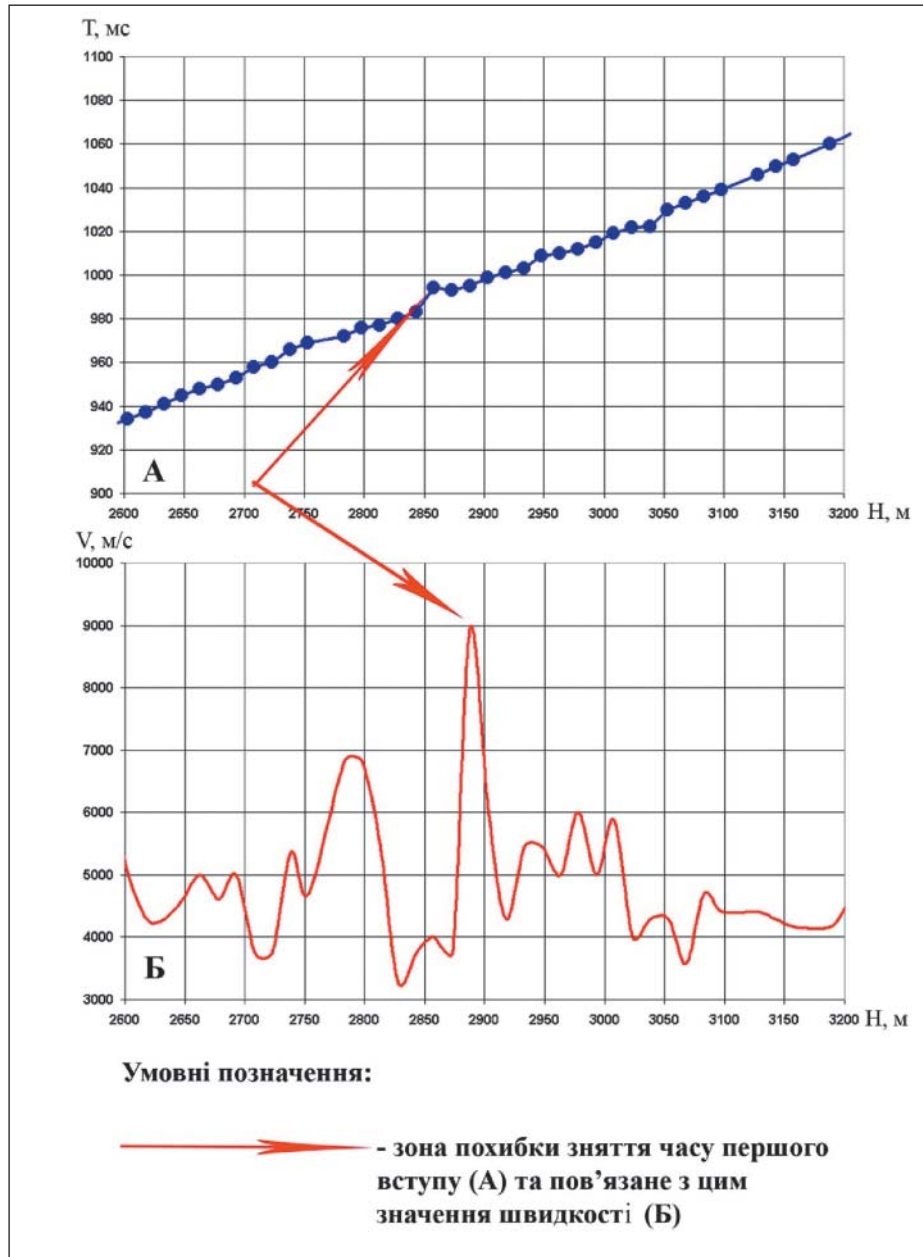


Рис. 3. Фрагмент вертикального годографа (А) та інтервальних швидкостей (Б) в свердловині № 7 Верхньоланівська до редагування

Середні та інтервальні швидкості розраховують-ся згідно загальноприйнятих формул. Для середньої швидкості використовується така формула:

$$v_{p_av} = \frac{H}{T_p}, \quad (3)$$

де v_{p_av} – середня швидкість для повздовжньої хвилі, H – вертикальна глибина від рівня приведення, T_p – час поширення поздовжньої хвилі уздовж вертикального напрямку.

Інтервальну швидкість обчислюють за такою формулою:

$$v_{int} = \frac{\Delta H}{\Delta T_p}, \quad (4)$$

де v_{int} – інтервальна швидкість для повздовжньої хвилі, ΔH – довжина інтервалу за вертикальним напрямком, ΔT_p – час поширення хвилі уздовж інтервалу.

На рис. 5 показано приклад таких розрахунків для свердловини № 101 Кобзівська.

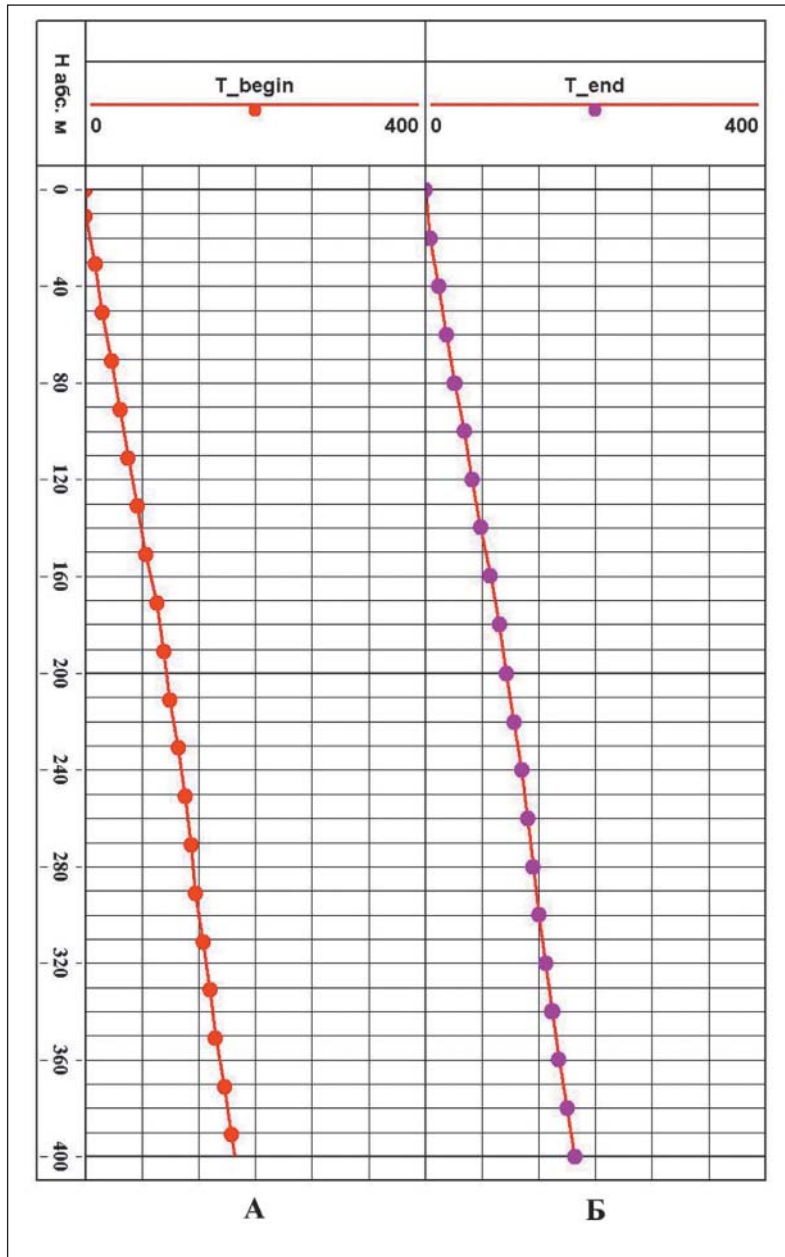


Рис. 4. Фрагмент вертикального годографа до редагування (А) і після редагування (Б) інтервалів просторової дискретизації

Традиційна технологія побудови моделі для пластових швидкостей є найбільш суб'єктивною. Тому для вирішення цієї задачі застосовано дещо інший підхід, який передбачає використання не вертикальних годографів, а інтервальних швидкостей, що розбиваються на пласти за алгоритмами, прийнятими у геофізичних дослідженнях свердловин (рис. 6, А). Після цього пластові швидкості розраховують за такою формулою:

$$v_p = \frac{\Delta H}{\Delta T_p}, \quad (5)$$

де v_p – пластова швидкість, ΔH – потужність пласта, ΔT_p – вертикальний час поширення хвилі в пласті.

За даними обчислених пластових швидкостей вирішується пряма задача – отримання вертикального годографа (рис. 6, Б), який порівнюється з реальним годографом (рис. 6, Б, В). У разі якісного збігу годографів процес закінчується, в іншому випадку модель корегується за допомогою розв'язання оберненої задачі за методом редукції годографа (рис. 6, Г) з візуальним (рис. 6, В) та статистичним (рис. 6, Д) контролем.

Побудову комп'ютерної моделі виконано з використанням програмного середовища Petrel.

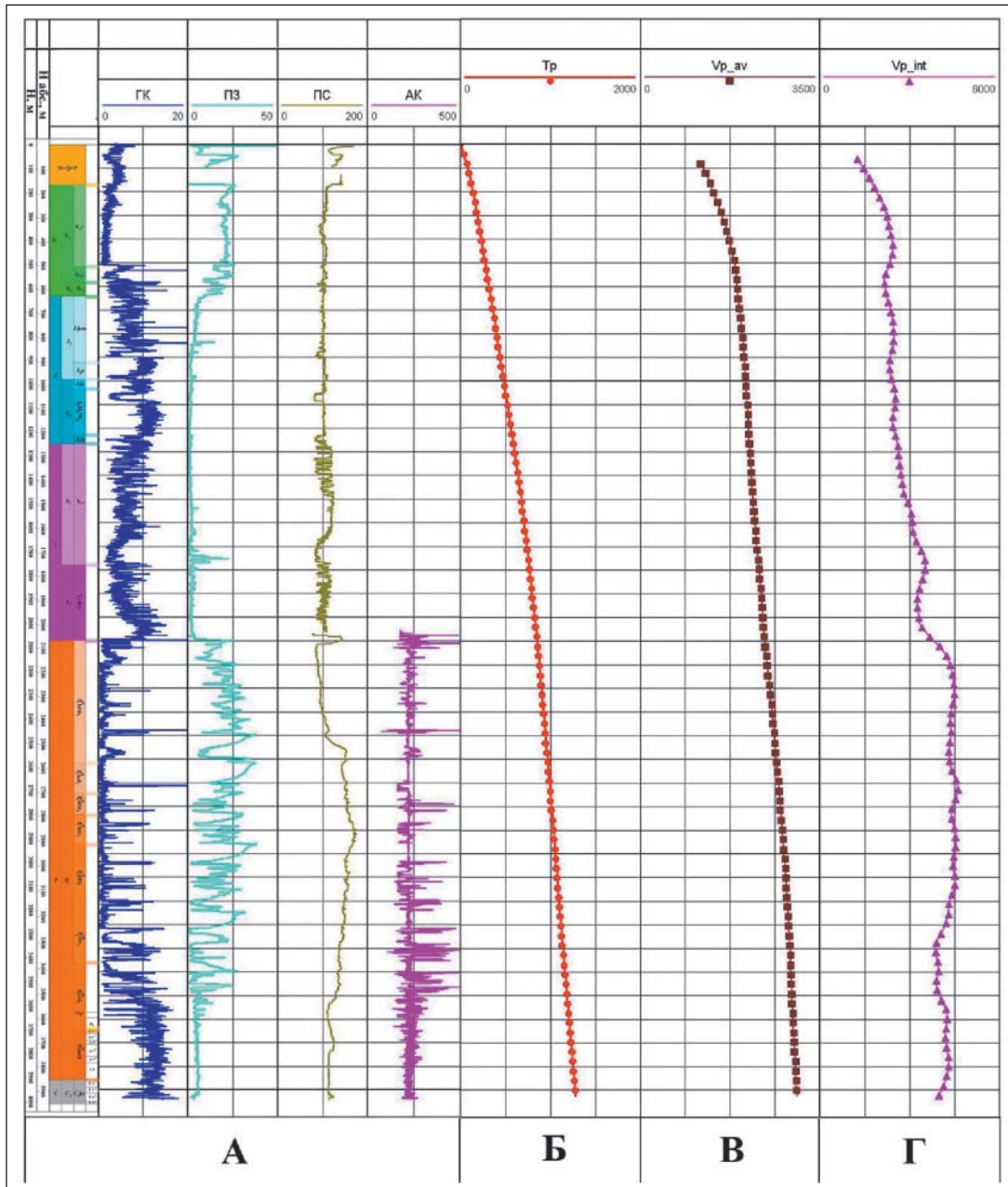


Рис. 5. Свердловина № 101 Кобзівська. Модель середніх та інтервальних швидкостей.
 А – геолого-геофізичні дані по свердловині; Б - вертикальний годограф; В – середні швидкості;
 Г – інтервальні швидкості

База даних моделі включає вихідні дані сейсмічних досліджень у свердловинах, масиви даних, що описують просторові розподіли значень середніх, інтервальних та пластових швидкостей. Це дозволяє синтезувати відповідні розподіли вертикальних швидкостей для заданої площі в межах центральної частини ДДз. У разі потреби для будь-якої точки поверхні геологічного середовища можуть бути синтезовані результати сейсмічних досліджень у віртуальній свердловині.

На рис. 7 показано горизонтальні зрізи набору даних для середніх швидкостей для різних глибин. Результати демонструють значні розбіжності в значеннях середніх швидкостей для північно-західної та південно-східної частин території досліджень. Разом зі збільшенням глибини зростають розбіжності. Середні вертикальні швидкості найчастіше використовуються в задачах обробки сейсморозвідувальної інформації. Разом із тим комп'ютерна модель розподілу вертикальних швидкостей містить

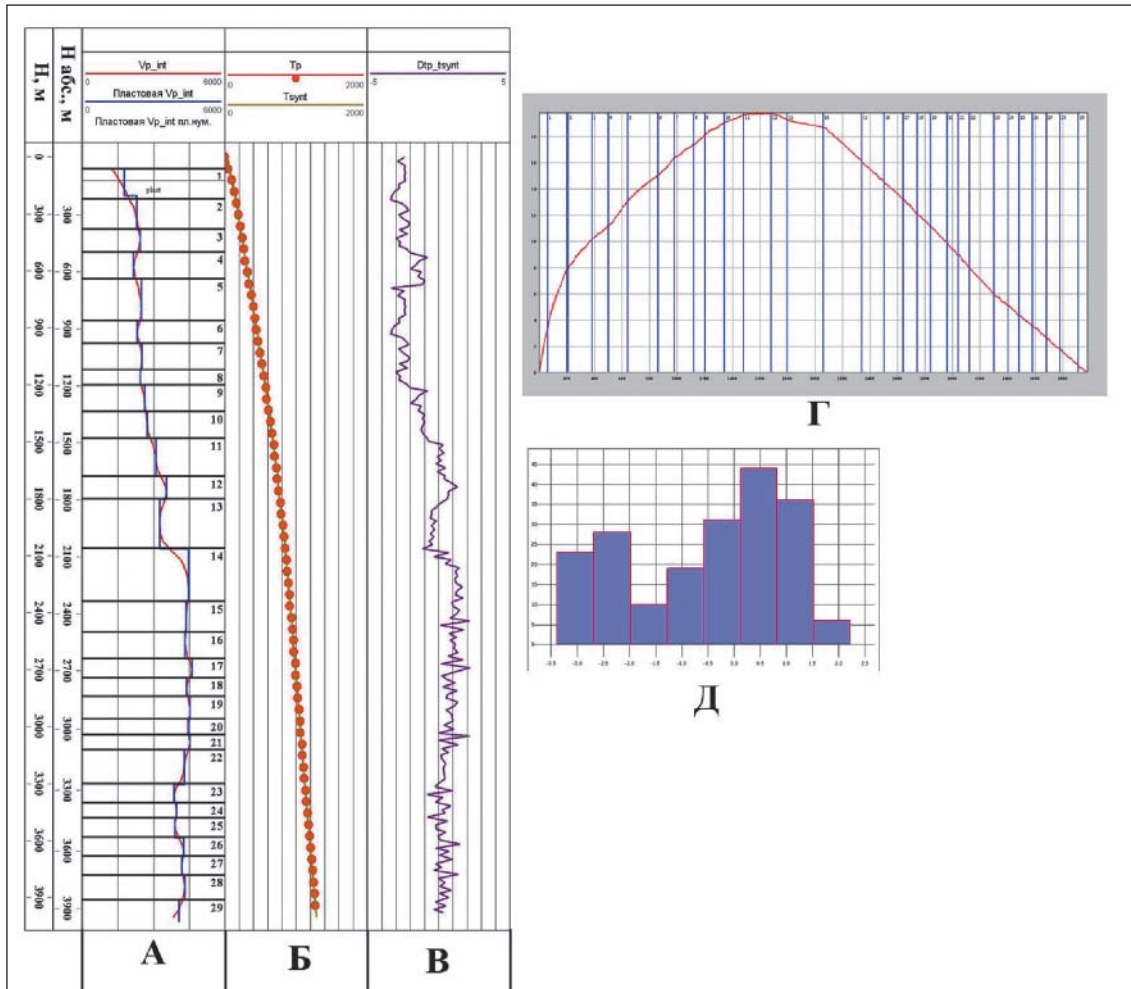


Рис. 6. Свердловина № 101 Кобзівська. Приклад побудови пластової моделі швидкостей

інформацію про розподіли інтервальних та пластових вертикальних швидкостей, які є актуальними для задач побудови сейсмічних зображень тощо. На рис. 8 показано горизонтальні зрізи наборів даних для інтервальних та пластових швидкостей відповідно. Всі розподіли значень швидкостей зберігаються в сучасних форматах для передачі в поширені пакети програм, передбачене їх безпосереднє використання в задачах обробки сейсморозвідувальної інформації.

Висновки

Створено комп'ютерну модель розподілу значень вертикальних швидкостей сейсмічних хвиль. Розподіли середніх, інтервальних та пластових швидкостей призначені для безпосереднього використання в задачах обробки сейсморозвідувальної інформації, зокрема, для побудови сейсмічних зображень. Використання моделі розподілу значень вертикальних швидкостей дає можливість позбутися обмежень, які пов'язані з використанням спектрів швидкостей спільної середньої точки

та перетворенням швидкостей спільної середньої точки на ефективні швидкості для геологічного середовища. Модель розподілу значень забезпечує також можливість використання глибинного масштабу для спектрів швидкостей та сейсмічних зображень без їх попередньої побудови в часовому масштабі; повну відповідність положення відбиваючих границь на спектрах і сейсмічних зображеннях існуючим глибинним моделям та свердловинним даним; можливість подальшого ускладнення анізотропної швидкісної моделі (наприклад, до моделі, що описується трьохвісним еліпсоїдом променевої швидкості або більш складними фігурами); а також вибіркочну інтерпретацію елементів геологічного розрізу, що характеризуються постійними значеннями анізотропії швидкостей, з використанням технології анізотропної декомпозиції сейсмічних зображень. Отримані результати також дозволяють ефективно реалізувати технологію автоматичного визначення моделі розподілу значень сейсмічних або горизонтальних швидкостей за даними поверхневих сейсморозвідувальних досліджень [3].

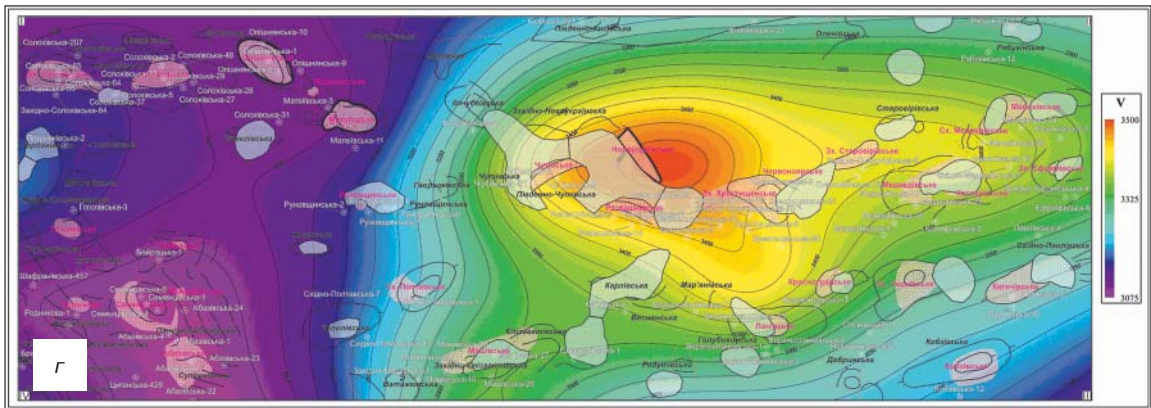
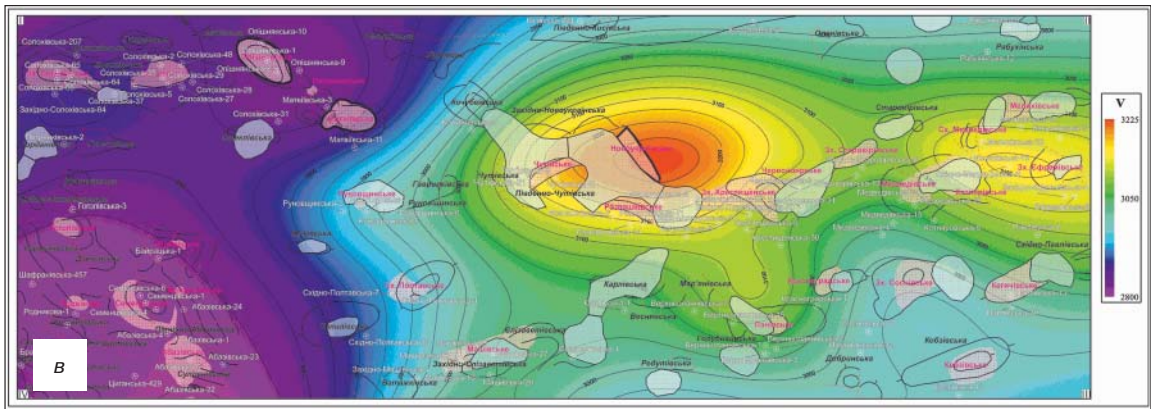
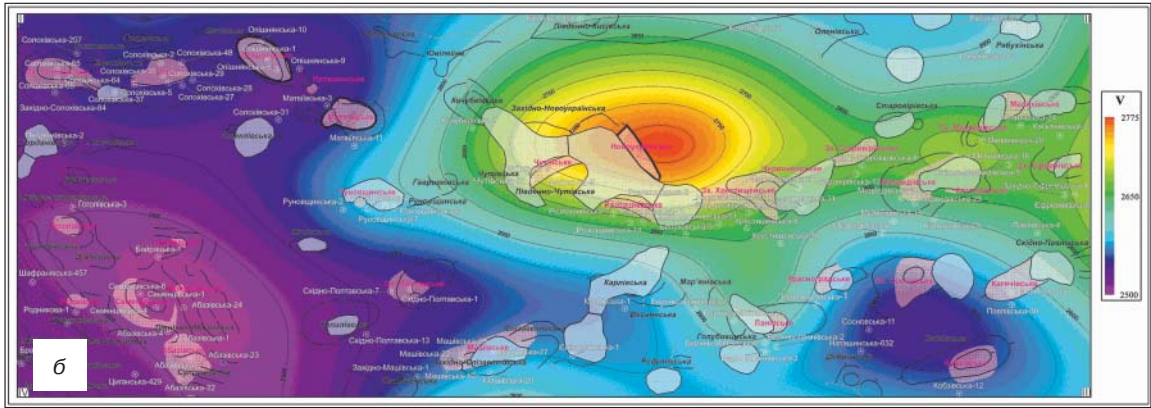
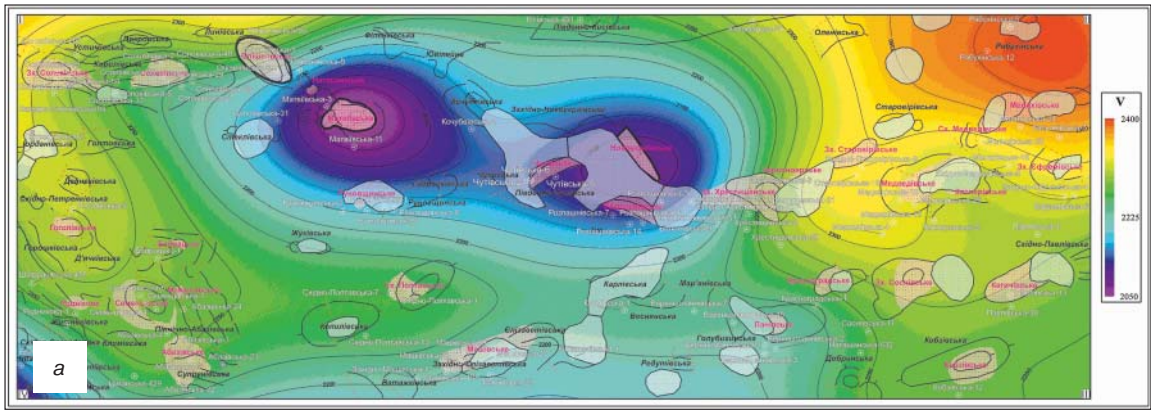


Рис.7

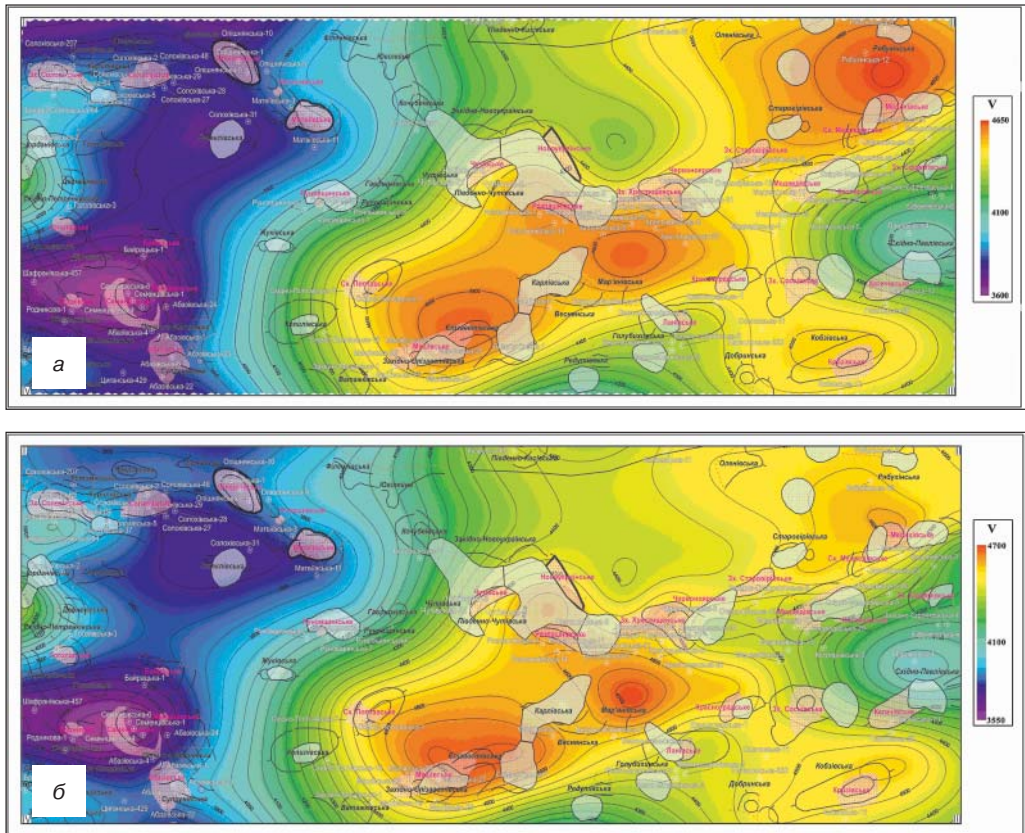


Рис.8.

1. Лісний Г.Д. Дослідження похибок сейсмічних зображень криволінійних границь в анізотропних середовищах // Вісн. Київ. ун-ту. Сер. Геологія. – 1992. – № 7. – С. 40–48.

2. Лісний Г.Д. Використання моделі анізотропного середовища для аналізу сейсмічних зображень геологічних об'єктів // К.: ВПЦ «Київський університет». – 2002. – 137 с.

3. Лісний Г.Д. Анізотропна декомпозиція сейсмічних зображень // Геолог України. – 2012. – № 1-2 (37-38). – С. 94–103.

4. Тимошин Ю.В., Лесной Г.Д., Кискина Н.Т. Мнимый источник сейсмических волн в анизотропной среде // Вестн. Киев. ун-та. Сер. Геология. – 1990. – № 9. – С. 37–43.

5. Тимошин Ю.В., Лісний Г.Д. Аналіз похибок сейсмічних зображень анізотропного середовища, побудованих з використанням неточної індикатриси променевої швидкості // Вісн. Київ. ун-ту. Сер. Геологія. – 1992. – № 7. – С. 31–40.

6. Grechka V. Application of Seismic Anisotropy in the Oil and Gas Industry. EAGE // Publication bv. – Houten. – 2009.