

ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

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
І. Соловійов, ген. директор,
E-mail: i.solovyov@geounit.com.ua
В. Круглик, пров. геолог,
E-mail: v.kruglyk@gmail.com
Г. Лісний, д-р геол. наук, доц., заст. ген. директора,
E-mail: g.lisny@geounit.com.ua
ТОВ "ГЕОЮНІТ", пр. С. Бандери, 9, м. Київ, 04073, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕРАКТИВНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ ГЕОЛОГІЧНИХ ТІЛ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКЛАДІВ ГАЗУ НА СХОДІ УКРАЇНИ

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

Розглянуто можливості виділення геологічних тіл з певними фізичними та фільтраційно-ємнісними властивостями на основі класифікації за набором сейсмічних атрибутів. Така класифікація базується на використанні комп'ютерних технологій з паралельними обчисленнями на графічних процесорах. Висока швидкість паралельних обчислень забезпечує можливість інтерактивної класифікації та отримання результатів практично у реальному часі. Водночас застосування графічних процесорів дозволяє реалізувати технології інтерактивної класифікації не тільки на обчислювальних кластерах, але і на персональних комп'ютерах.

Показано геологічну ефективність технології інтерактивної класифікації. Їх застосування дозволяє виявляти геологічні тіла з певними фізичними властивостями на основі комп'ютерного аналізу тривимірних масивів сейсмічних даних, зокрема сейсмічних зображень та масивів сейсмічних атрибутів. Важливо відмітити, що комп'ютерні технології інтерактивної класифікації тривимірних сейсмічних даних не тільки забезпечують високу швидкість визначення просторового положення та властивостей геологічних тіл, але і дозволяють реалізувати принципову можливість такого визначення. Традиційні підходи до виявлення та класифікації геологічних тіл базуються на послідовному аналізі розрізів тривимірних сейсмічних даних. У цьому випадку розв'язання задачі виявлення та класифікації геологічних тіл часто стикається з принциповими проблемами через складність візуальної оцінки тривимірних геологічних об'єктів на основі аналізу послідовності двовірних розрізів масивів сейсмічних даних.

Авторами запропоновано зручний підхід до систематизації способів інтерактивної класифікації геологічних тіл за одним та кількома сейсмічними атрибутами. Відомі технології яскравої плями та AVO розглядаються як елементи послідовності способів інтерактивної класифікації з використанням різної кількості сейсмічних атрибутів.

За даними об'ємної сейсморозвідки, проведеної на площах сходу України, виконано класифікацію геологічних тіл за одним та двома сейсмічними атрибутами. Знайдено та проаналізовано об'єкти, що є перспективними щодо наявності в них вуглеводнів. Зроблено висновок про доцільність класифікації за декількома параметрами, що створює передумови для реалізації більш досконалих та різнобічних підходів до виявлення геологічних тіл із заданими фізичними властивостями.

Ключові слова: сейсмічне зображення, сейсмічна інверсія, інтерактивна класифікація, сейсмічні атрибути, geobody, прямі індикатори вуглеводнів.

Вступ. Успішність пошуків та розвідки родовищ нафти і газу безпосередньо пов'язана з використанням прямих сейсмічних індикаторів наявності вуглеводнів. Актуальність такого підходу зумовлена збільшенням значення літологічних пасток вуглеводнів у загальному об'ємі видобутку нафти і газу. Про це свідчить також збільшення кількості публікацій, в яких цей напрям сейсморозвідувальних досліджень розглядається на основі сучасних технологічних рішень (Forrest et al., 2010; Rudolph and Goulding, 2017; Roden and Chen, 2017; Вижва та ін., 2018).

Використання тривимірних сейсмічних даних для виявлення та аналізу прямих індикаторів вуглеводнів передбачає визначення об'ємних розподілів їх значень. Традиційні підходи до аналізу тривимірних масивів сейсмічних зображень та атрибутів через їх двовірні розрізи втрачає достовірність через збільшення впливу суб'єктивного фактору. Рішення цієї проблеми можна отримати через використання технології інтерактивної класифікації хвильових полів та сейсмічних атрибутів. Така технологія дозволяє знаходити об'ємні об'єкти, що характеризуються певними діапазонами зміни значень їх характеристик. Важливим окремим випадком застосування технології об'ємної класифікації є виявлення аномалій AVO, що характеризуються певними діапазонами змін атрибутів AVO.

У даній роботі розглянуто результати застосування технології об'ємної класифікації особливостей сейсмічних полів та атрибутів для південно-східної частини північного борту Дніпровсько-Донецької западини.

Принципи об'ємної класифікації. Моделювання резервуарів вуглеводнів передбачає виділення в їх межах пасток нафти або газу. Під час комп'ютерного моделювання резервуари подаються набором комірок, що асоціюються з певними фізичними характеристиками або сейсмічними атрибутами. Фізичними характеристиками можуть бути огинаюча сейсмічного сигналу, акустичний імпеданс, пористість тощо. Набір зв'язаних комірок будемо називати geobody (геологічне тіло). Процедура визначення geobody полягає у знаходженні зв'язаних комірок, що відповідають заданим діапазонам змін фізичних характеристик. Важливим елементом виявлення геологічних тіл є врахування їх фізичного об'єму, адже дуже малі тіла не становлять практичного інтересу.

Для виділення геологічних тіл у моделях резервуарів застосовувалися різні підходи та технології. Наприклад, у роботі (Hoshen and Kopelman, 1976) запропоновано спосіб виділення геологічних тіл за допомогою принципів кластерного аналізу. Процес обчислень за цією технологією виконувався за допомогою CPU (центрального процесора) та вимагав багато обчислювального часу. Алгоритм, започаткований у роботі (Deutsch, 1998) передбачав сканування тривимірної сітки комірок геологічної моделі окремо уздовж напрямків X, Y, Z . У результаті сканування виділялися зв'язані комірки, що задовольняли заданий діапазон значень атрибутів. Відповідні обчислювальні програми також були реалізовані на CPU, що призводило до істотних витрат обчислювального часу.

Не зупиняючись на детальному огляді різних способів класифікації геологічних тіл або geobody-аналізу, зазначимо, що вивчення резервуарів вуглеводнів, як правило, стикається з наявністю багатьох невідомих параметрів. Нормальним вважається також створення декількох альтернативних моделей для одного резервуару вуглеводнів. Кожна з цих моделей представляє можливі розподіли параметрів резервуару. Водночас для кожної моделі необхідно виконати geobody-аналіз, що передбачає виявлення геологічних тіл, визначення їх розмірів, взаємного впливу та зв'язку із свердловинами тощо. Таким чином, дуже важливою задачею є прискорення чисельного аналізу за умови використання стандартної комп'ютерної техніки. Сьогодні така задача успішно розв'язана за допомогою паралельних обчислень на графічних картах (GPU). Наприклад, процес geobody у програмному пакеті Petrel (Schlumberger) дозволяє отримувати результати з виділення геологічних тіл майже у реальному часі. Для оптимізації обчислень розробники програмного забезпечення, як правило, надають рекомендації щодо необхідних технічних характеристик комп'ютерів. Щодо GPU такі рекомендації стосуються, в основному, необхідної кількості графічних процесорів для виконання обчислень. Сьогодні сучасні GPU містять декілька тисяч графічних процесорів. Це є достатнім для виконання обчислень у процесі geobody практично у реальному часі.

Класифікація геологічних тіл за одним сейсмічним атрибутом. Розглянемо ділянку в південно-східній частині Північного борту Дніпровсько-Донецької западини, що є перспективною на наявність вуглеводнів. У цій зоні можна виділити Південномакіївську площу, структурні пастки вуглеводнів якої приурочені до відкладів башкирського та московського ярусів середнього карбону. Ці пастки характеризуються незначними ресурсами вуглеводнів та відповідно слабо вираженим структурним фактором. За таких умов важливого значення набуває прогнозування покладів вуглеводнів за допомогою прямих сейсмічних індикаторів наявності нафти і газу в геологічному середовищі. Ефективним способом реалізації такого прогнозування є об'ємна класифікація сейсмічних атрибутів та пов'язаних із ними геологічних тіл з певними фізичними властивостями. Існуючі технології такої класифікації використовують різну кількість атрибутів.

Найпростішою є класифікація на основі одного сейсмічного атрибуту. Характерним її прикладом є виявлення підвищених значень огинаючої сейсмічних сигналів. Аномалії підвищених значень огинаючої сейсмічних сигналів відомі також як аномалії типу "яскравих плям". Ефективність технології "яскравих плям" зумовлена тим, що відбиття від пластів газонасиченої гірської породи або породи з низькими значеннями акустичного імпедансу характеризуються значно більшими амплітудами порівняно із хвилями, відбитими від пластів, насичених нафтою або водою.

Для виявлення перспективних на наявність вуглеводнів ділянок у даній роботі використано технологію об'ємної класифікації geobody, що входить до програмного пакету Petrel (Schlumberger). Обмежимо діапазон значень огинаючої сейсмічного сигналу лише великими значеннями. Отриманий результат показаний на рис. 1. Він дозволяє виявити об'ємні елементи геологічного розрізу, перспективні на наявність природного газу. Це зумовлено підвищеними значеннями коефіцієнтів відбиття на межі розділу газонасиченої та ущільненої гірської породи.

Однак підвищені значення коефіцієнтів відбиття можуть характеризувати також межі розділу гірських порід з іншими фізичними властивостями. Наприклад, підвищені значення огинаючої сейсмічного сигналу можуть бути приурочені до меж пластів карбонатів, вугілля, інтрузій тощо. Для підтвердження актуальності виділених тривимірних об'єктів щодо наявності у них природного газу необхідно залучити свердловинні дані.

На рис. 2 показаний один із геологічних об'єктів, виділений за допомогою технології geobody. Цей об'єкт приурочений до продуктивного пласта у відкладах башкирського ярусу середнього карбону. Свердловина, що його перетинає, підтверджує наявність у ньому природного газу. Це означає, що даний геологічний об'єкт з визначеною формою та об'ємом є пасткою вуглеводнів. Водночас інші геологічні об'єкти даної площі, що характеризуються аналогічними значеннями огинаючої сейсмічного сигналу, також можна вважати пастками вуглеводнів. Достовірність такого прогнозування для даної площі, що визначена за результатами буріння свердловин, становить близько 80 %.

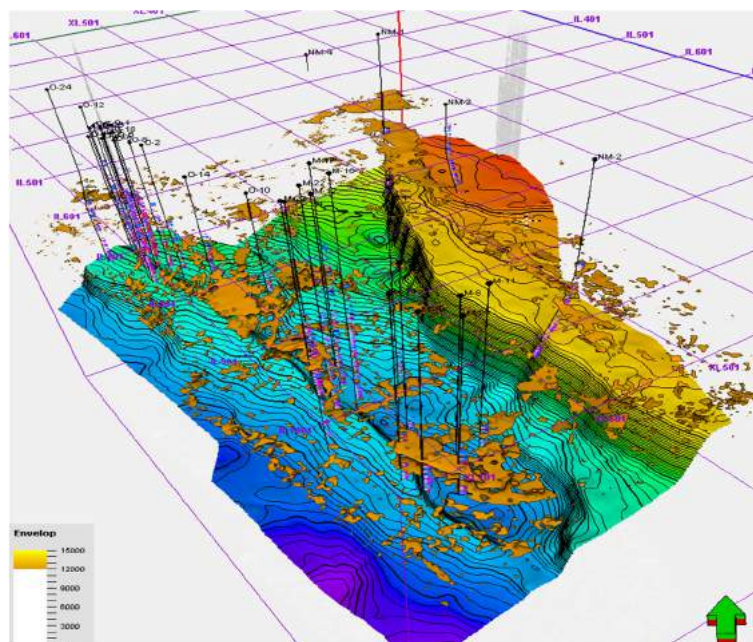


Рис. 1. Просторовий розподіл тривимірних геологічних об'єктів, що відповідають підвищеним значенням огинаючої сейсмічного сигналу

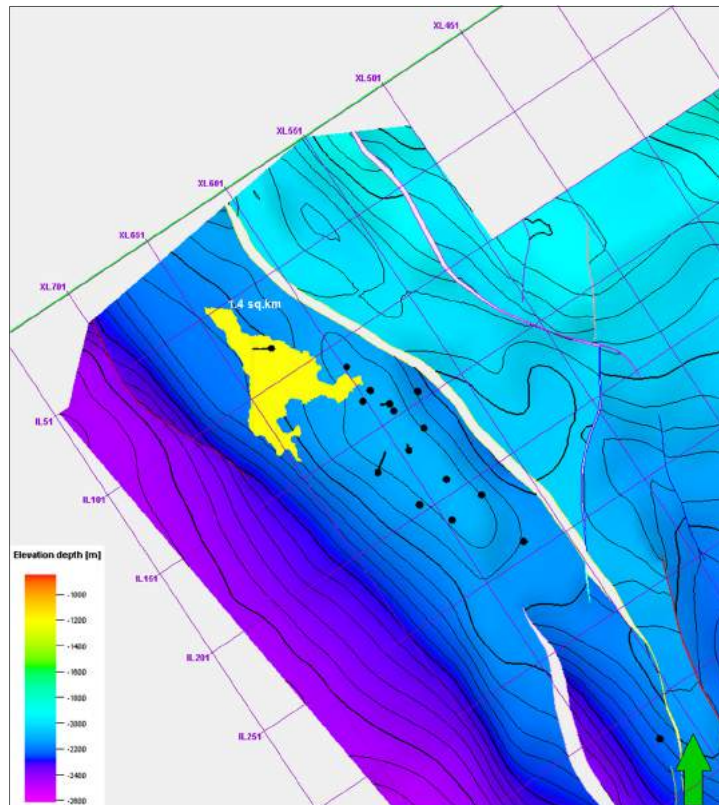


Рис. 2. Пастка вуглеводнів, що виділена у відкладах башкирського ярусу середнього карбону за допомогою технології geobody за критерієм підвищених значень огинаючої сейсмічного сигналу

Важливою характеристикою технології geobody є можливість виділяти тривимірні геологічні об'єкти, які складно, а інколи неможливо виявити через аналіз двовимірних розрізів об'ємних сейсмічних зображень або масивів сейсмічних атрибутів. Характерним прикладом таких геологічних об'єктів є флювіальні відклади, які відіграють значну роль у формуванні родовищ вуглеводнів і доволі поширені у світі. Це зумовлює відповідну увагу до вивчення флювіальних резервуарів, моделювання яких є широкою областю наукових досліджень. Значні варіації у розмірах таких резервуарів, їх неоднорідний характер та складні геометричні форми зумовлюють певні труднощі у побудові їх тривимірних моделей. Різноманітні технології фаціального моделювання використовуються для оптимізації розвідки родовищ флювіального типу. Однак певні алгоритмічні обмеження інколи призводять до надмірного спрощення моделей таких резервуарів. Це призводить до зменшення якості їх прогнозу. Наявність сучасної детальної сейсмічної та свердловинної інформації є передумовою для побудови достовірних моделей флювіальних резервуарів. У роботі (Vevle *et al.*, 2018) відзначається, що флювіальні та дельтові родовища є одними з найважливіших у світі. Вони набули практичного значення близько 30 років тому та залишаються актуальним дотепер. Багато великих родовищ представлені комбінацією різних річкових та дельтових відкладів. Однак, незважаючи на значний технологічний прогрес у галузі моделювання резервуарів вуглеводнів, проблеми вивчення флювіальних резервуарів у тривимірному поданні залишаються актуальними. Головною метою фаціального моделювання є отримання точного чисельного подання геологічної моделі резервуару, що використовується для подальшого його наповнення петрофізичними властивостями. Ефективним шляхом розв'язання цієї задачі є впровадження сучасних технологій аналізу сейсмічних та свердловинних даних.

Аналіз головних елементів флювіальних систем показує, що достовірність їх прогнозу залежить від детальної врахування неоднорідностей геологічного середовища. У загальному випадку флювіальні системи описуються композицією декількох фацій: руслових, дельтових, заплавних тощо. У результаті процесів осадконакопичення кожна з фацій утворює геологічні тіла, що мають особливі структурні моделі та відрізняються за фізичними властивостями гірських порід. Моделювання таких структур передбачає, перш за все, точне відтворення їх геометричних та фаціальних особливостей із врахуванням геологічних уявлень про родовище або площу, наявної геолого-геофізичної інформації, можливостей технологій, що використовуються, та відповідних програм об'ємного моделювання. Як приклад такого моделювання на рис. 3 показані стародавні руслові тіла у відкладах башкирського та московського ярусів середнього карбону. Такі руслові тіла є перспективними щодо наявності вуглеводнів у гірських породах, що їх складають. Прогнозні ресурси природного газу становлять приблизно 60 млн м³ для об'єкта у відкладах московського ярусу та 40 млн м³ у відкладах башкирського ярусу. У даному випадку традиційні підходи до виявлення таких геологічних тіл не дали позитивних результатів. Це пояснюється тим, що аналіз послідовності двовимірних розрізів сейсмічних зображень або масивів сейсмічних атрибутів не дає змогу прослідкувати напрями поширення руслових тіл через їх нерегулярну форму та відповідно невеликі розміри у розрізах об'ємного сейсмічного зображення або у розрізах тривимірних масивів сейсмічних атрибутів.

Класифікація геологічних тіл за набором сейсмічних атрибутів. Наведені вище приклади об'ємної класифікації передбачали використання одного сейсмічного атрибуту. Використання декількох атрибутів суттєво розширює можливості об'ємної класифікації. Характерним прикладом класифікації за двома параметрами або ат-

рибутами є технологія AVO. Вона дає змогу виділяти геологічні тіла, пов'язані зі змінами амплітуд сейсмічних хвиль залежно від відстані між їх джерелами та приймачами. У монографії (*Chopra and Castanga, 2014*) наведено вичерпні дані щодо класифікації аномалій AVO. Один з ефективних способів їх класифікації базується на аналізі кросплатів атрибутів AVO, а саме градієнта та інтерсепта. Ці атрибути визначають пряму лінію $R(\sin^2\theta)$, де θ – кут нахилу відбитого сейсмічного променя, R – амплітуда відбитої хвилі. З використанням цих позначень формула градієнта може бути записана у наступному вигляді: $G = \Delta R / \Delta \sin^2\theta$. А формула інтерсепта

набуває вигляду $I = R(0)$. Тобто фізичним змістом інтерсепта є амплітуда відбитої хвилі для нормального падіння. Визначення співвідношень між значеннями градієнта та інтерсепта дають можливість прогнозувати тип гірської породи, її фільтраційно-ємнісні властивості, а також тип флюїду що її насичує.

Поширена схема класифікації пісковиків за співвідношеннями значень градієнта та інтерсепта запропонована у роботі (*Rutherford and Williams, 1989; Castanga et al., 1998*), узагальнену класифікацію наведено в (табл. 1).

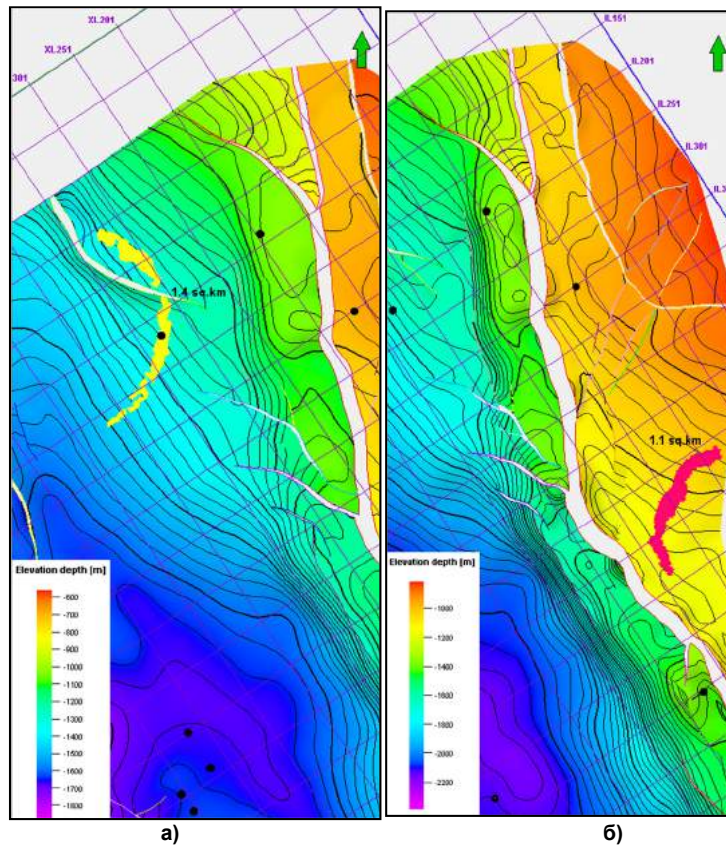


Рис. 3. Стародавні річкові долини, виявлені за допомогою технології geobody:

а) у відкладах московського ярусу середнього карбону; б) у відкладах башкирського ярусу середнього карбону

Таблиця 1

Характеристики класів AVO залежно від значень AVO атрибутів градієнта (G) та інтерсепта (I), де інтерсепту відповідає горизонтальна, а градієнту – вертикальна вісь на кросплоті

Клас	Відносний імпеданс	КвADRANT на кросплоті	Інтерсепт	Градiєнт
1	Пісковик з високим імпедансом	4	+	-
2 negative	Пісковик в умовах слабкої контрастності імпедансів	3	-	-
2 positive	Пісковик в умовах слабкої контрастності імпедансів	4	+	-
3	Пісковик з низьким імпедансом	3	-	-
4	Пісковик з низьким імпедансом	2	-	+

Для першого класу AVO коефіцієнт відбиття, а разом з ним і інтерсепт, є позитивним для нульового віддалення. Коефіцієнт відбиття зменшується разом зі збільшенням віддалення між джерелами та приймачами. Зміна знаку коефіцієнта відбиття призводить до появи темних плям на сейсмічних зображеннях, побудованих за відповідними кутковими наборами трас сейсмограм спільних джерел.

Другий клас характеризується слабкою контрастністю імпедансу на межах розділу пластів та різними знаками інтерсепта. Низька контрастність імпедансу відповідає малим значенням інтерсепта. Для класу 2 negative зміна полярності відбитих хвиль відсутня через від'ємне значення інтерсепта та градієнта. А для класу 2

positive відбувається зміна полярності відбитих хвиль разом із збільшенням віддалення між джерелами та приймачами.

Третій клас AVO визначається низьким імпедансом, але високою контрастністю імпедансу на границях розділу пластів. Від'ємні значення інтерсепта та градієнта свідчать про збільшення інтенсивності відбитих хвиль разом із збільшенням віддалення між джерелами та приймачами. Водночас коефіцієнт відбиття зберігає від'ємний знак. Цей клас AVO асоціюється з класичними аномаліями коефіцієнтів відбиття з великими негативними значеннями або аномаліями типу яскравих плям.

Четвертий клас AVO, описаний у роботі (*Castagna and Swan, 1997*), відповідає пісковикам із значними по

модулю негативними коефіцієнтами відбиття для нульових віддалень. Разом із збільшенням віддалень амплітуда відбитих хвиль слабо збільшується та зберігає від'ємний знак. Аномалії такого класу відповідають слабо консолідованим пісковикам, що залягають на невеликих глибинах, а також відносно м'яким пісковикам, що знаходяться між твердими гірськими породами, наприклад сланцями, алевролітами або карбонатами.

Класифікація геологічних тіл за допомогою AVO атрибутів не обмежується використанням кросплатів градієнта та інтерсепта. Це можуть бути також швидкості поздовжніх V_p та поперечних V_s хвиль тощо. Наприклад, класифікація за допомогою швидкостей V_p та V_s дозволяє вивчати властивості порових флюїдів та літологію (Foster et al., 1993; Verm and Hilterman, 1995; Foster et al., 1997; Castagna et al., 1998; Foster and Keys, 1999). У загальному випадку технологію AVO можна розглядати як окремий приклад об'ємної класифікації з використанням двох сейсмічних атрибутів. Отже, класифікація за допомогою декількох сейсмічних атрибутів є більш універсальною. Вона дозволяє прогнозувати набагато більше властивостей гірських порід порівняно з класифікацією на основі одного атрибуту.

Повертаючись до класифікації на основі AVO атрибутів інтерсепта та градієнта, розглянемо можливість виявлення за її допомогою геологічних тіл, перспективних на наявність вуглеводнів. Технологія об'ємної класифікації сейсмічних атрибутів geobody дозволяє вільно оперувати діапазонами зміни значень атрибутів. Для цього використовується двовимірний інтерактивний панель, на якій у графічний спосіб задаються області зміни значень атрибутів. У загальному випадку конфігурація областей зміни значень атрибутів може мати довільну форму. Гнучкий підхід до вибору областей зміни значень сейсмічних атрибутів дозволяє визначати нові класи аномалій AVO або уточнювати існуючі класи залежно від геологічних особливостей площі досліджень. Послідовність процедур об'ємної класифікації у цьому випадку виглядає

таким чином: завантаження в проект продуктивних свердловин, визначення продуктивних інтервалів та характеру насичення вуглеводнями, підбір областей зміни значень атрибутів, наприклад інтерсепта та градієнта, для досягнення збігу об'ємних геологічних тіл із зонами насичення гірських порід вуглеводнями, виділення нерозбурених геологічних тіл із заданими областями зміни значень сейсмічних атрибутів та достатніми для закладання нових свердловин ресурсами вуглеводнів.

На рис. 4 показано геологічне тіло, що виділено за допомогою атрибутів AVO інтерсепта та градієнта. Области можливих значень атрибутів показані у правій частині рисунку. Вони визначені шляхом ітерацій за критерієм максимальних розмірів та суцільної будови геологічних тіл. Априорними даними для початку ітераційного процесу було припущення про наявність у геологічному середовищі пісковиків з низьким та середнім імпедансом, які належать до другого та четвертого класів. Третій клас у даному випадку не розглядався у зв'язку з тим, що йому відповідають аномалії типу яскравих плям. Такі аномалії надійно виявляються шляхом класифікації за одним атрибутом. Приклади виявлення аномалій типу яскравих плям розглянуті вище.

Геологічне тіло, показане на рис. 4, відповідає відкладам московського ярусу середнього карбону. Його об'єм становить 85 млн м³ газу. Свердловини (рис. 4), що пробурені на розкриття цього об'єкта, підтвердили наявність у ньому промислових запасів природного газу.

Описаний вище підхід було застосовано для виділення геологічного тіла, показаного на рис. 5. Воно відповідає відкладам башкирського ярусу середнього карбону. Свердловини, пробурені на розкриття цього об'єкта, підтвердили наявність у ньому природного газу, запаси якого також оцінюються як промислові.

Розглянуті літологічні пастки вуглеводнів (геологічні тіла) були виділені за допомогою відповідного вибору діапазонів зміни значень тривимірних масивів інтерсепта та градієнта на двовимірних областях визначення цих AVO атрибутів, що також показані на рис. 4 та 5 відповідно.

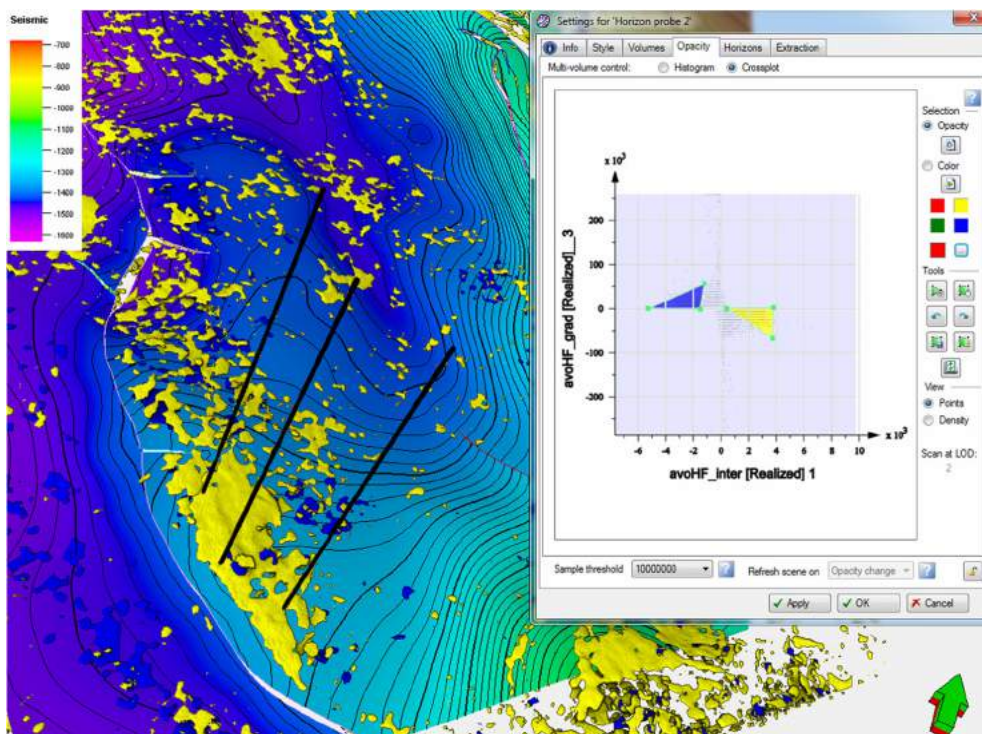


Рис. 4. Геологічне тіло у відкладах московського ярусу середнього карбону, що виявлено за допомогою технології geobody з використанням атрибутів інтерсепта та градієнта

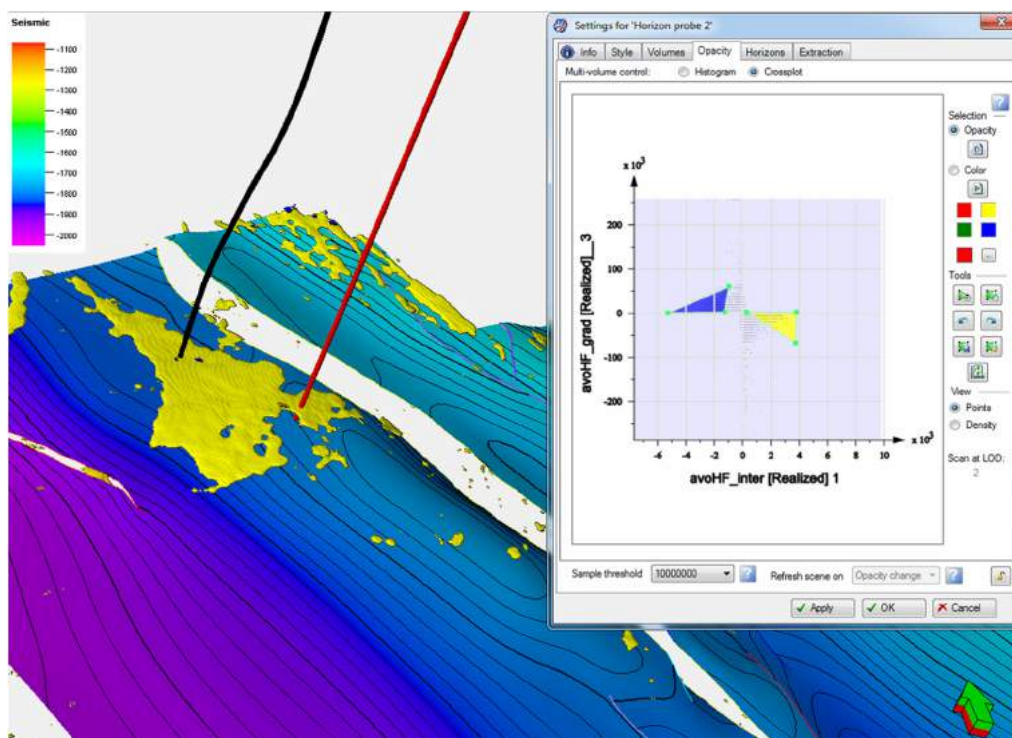


Рис. 5. Геологічне тіло у відкладах башкирського ярусу середнього карбону, що виявлено за допомогою технології геободу з використанням атрибутів інтерсепта та градієнта

Висновки. У роботі показано, що об'ємна комп'ютерна класифікація геологічних тіл за сейсмічними атрибутами є ефективним інструментом виявлення пасток вуглеводнів літологічного характеру. Така класифікація дозволяє отримати принципово нові результати під час аналізу тривимірних сейсмічних даних. Використання технології геободу, що реалізована у комп'ютерній платформі Petrel, дозволила впевнено визначити конфігурацію та положення перспективних на наявність вуглеводнів піщаних відкладів стародавніх річок. Буріння свердловин підтвердило наявність природного газу у цих відкладах. Традиційні підходи до виявлення та інтерпретації таких об'єктів на площі досліджень не дали позитивних результатів.

Класифікація за одним або декількома сейсмічними атрибутами дозволила узагальнити та систематизувати погляди на такі відомі технології інтерпретації сейсмічних атрибутів, як технологія "яскравої плями" та аналіз AVO. У цьому плані метод яскравої плями є прикладом класифікації за одним, а AVO аналіз – за декількома сейсмічними атрибутами. Алгоритм класифікації геологічних тіл за сейсмічними атрибутами та його комп'ютерну реалізацію геободу доцільно використовувати як для виявлення літологічних пасток вуглеводнів, так і для уточнення результатів традиційної інтерпретації тривимірних сейсмічних даних.

Наведено також результати виявлення літологічних пасток вуглеводнів на площах та родовищах сходу України за допомогою їх класифікації за одним та двома сейсмічними атрибутами. Знайдені геологічні тіла приурочені до відкладів московського та башкирського ярусів середнього карбону. Результати буріння свердловин підтвердили наявність природного газу у виявлених літологічних пастках.

Список використаних джерел

Вишва, С.А., Соловйов, І.В., Круглик, В.М., Лісний, Г.Д. (2018). Прогнозування зон підвищеної пористості у глинистих породах Сходу України. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 80, 28–33.
Castagna, J. P., Swan, H. W. (1997). Principles of AVO crossplotting. *The Leading Edge*, 16, 337–342.

Castagna, J. P., Swan, H. W., Foster, D. J. (1998). Framework for AVO gradient and intercept interpretation. *Geophysics*, 63, 948–956.

Chopra, S., Castagna, J.P. (2014). *AVO. SEG, Investigation in Geophysics Series*, 16, 288.

Deutsch, C.V. (1998). Fortran programs for calculating connectivity of three dimensional numerical models and for ranking multiple realizations. *Computers & Geosciences*, 24, 69.

Forrest, M., Roden, R., Holeywell, R. (2010). Risking seismic amplitude anomaly prospects based on database trends. *The Leading Edge*, 5, 936–940.

Foster, D.J., Smith, S.W., Dey-Sarkar, S., Swan, H.W. (1993). A closer look at hydrocarbon indicators. *63 Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, 731–733.

Foster, D.J., Keys, R.G., Reilly, J.M. (1997). Another perspective on AVO crossplotting. *The Leading Edge*, 16, 1233–1237.

Foster, D.J., Keys, R.G. (1999). Interpreting AVO responses. *69 Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, 748–751.

Hoshen, J., Kopelman, R. (1976). Percolation and cluster distribution. Cluster multiple labeling technique and critical concentration algorithm. *Physical Review*, 14, 3438–3445.

Roden, R., Chen, C.W. (2017). Interpretation of DHI characteristics with machine learning. *First Break*, 35, 55–63.

Rudolph, K.W., Goulding, F.J. (2017). Benchmarking exploration predictions and performance using 20+ yr of drilling results: One company's experience. *AAPG Bulletin*, 101, 161–176.

Rutherford, S.R., Williams, R. H. (1989). Amplitude-versus-offset variations in gas sands. *Geophysics*, 54, 680–688.

Velve, L.M., Scorstad, A., Vonnet, J. (2018). Recent developments in object modelling opens new era for characterization of fluvial reservoirs. *First Break*, 36, 85–89.

Verm, R., Hilterman, F. (1995). Lithology color-coded seismic sections: The calibration of AVO crossplotting to 280 AVO rock properties. *The Leading Edge*, 14, 847–853.

References

Castagna, J. P., Swan, H. W. (1997). Principles of AVO crossplotting. *The Leading Edge*, 16, 337–342.

Castagna, J. P., Swan, H. W., Foster, D. J. (1998). Framework for AVO gradient and intercept interpretation. *Geophysics*, 63, 948–956.

Chopra, S., Castagna, J.P. (2014). *AVO. SEG, Investigation in Geophysics Series*, 16, 288.

Deutsch, C.V. (1998). Fortran programs for calculating connectivity of three dimensional numerical models and for ranking multiple realizations. *Computers & Geosciences*, 24, 69.

Forrest, M., Roden, R., Holeywell, R. (2010). Risking seismic amplitude anomaly prospects based on database trends. *The Leading Edge*, 5, 936–940.

Foster, D.J., Keys, R.G. (1999). Interpreting AVO responses. *69 Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, 748–751.

Foster, D.J., Keys, R.G., Reilly, J.M. (1997). Another perspective on AVO crossplotting. *The Leading Edge*, 16, 1233–1237.

Foster, D.J., Smith, S.W., Dey-Sarkar, S., Swan, H.W. (1993). A closer look at hydrocarbon indicators. 63 *Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, 731–733.

Hoshen, J., Kopelman, R. (1976). Percolation and cluster distribution. Cluster multiple labeling technique and critical concentration algorithm. *Physical Review*, 14, 3438-3445.

Roden, R., Chen, C.W. (2017). Interpretation of DHI characteristics with machine learning. *First Break*, 35, 55-63.

Rudolph, K.W., Goulding, F.J. (2017). Benchmarking exploration predictions and performance using 20+ yr of drilling results: One company's experience. *AAPG Bulletin*, 101, 161-176.

Rutherford, S.R., Williams, R. H. (1989). Amplitude-versus-offset variations in gas sands. *Geophysics*, 54, 680–688.

Velve, L.M., Scorsad, A., Vonnet, J. (2018). Recent developments in object modelling opens new era for characterization of fluvial reservoirs. *First Break*, 36, 85-89.

Verm, R., Hilterman, F. (1995). Lithology color-coded seismic sections: The calibration of AVO crossplotting to 280 AVO rock properties. *The Leading Edge*, 14, 847–853.

Vyzhva, S.A., Solovyov, I.V., Kruhlyk, V.M, Lisny, G.D. (2018). Prediction of high porosity zones in clay rocks at the Eastern Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 80, 28-33. [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 14.11.18

S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: vsa@univ.kiev.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv
Institute of Geology, 90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine
I. Solovyov, Director general,
E-mail: i.solovyov@geounit.com.ua
V. Kruhlyk, Senior Geologist,
E-mail: v.kruglyk@gmail.com,
G. Lisny, Dr. Sci. (Geol.), Assoc. Prof., Deputy Director general,
E-mail: g.lisny@geounit.com.ua,
Geounit LLC, 9 Stepana Bandery Ave., Kyiv, 04073, Ukraine

USE OF THE TECHNOLOGY OF INTERACTIVE CLASSIFICATION OF GEOLOGICAL BODIES FOR GAS DEPOSITS FORECASTING IN EASTERN UKRAINE

The possibilities of allocation of geological bodies with certain physical and filtration-capacitive properties on the basis of classification by a set of seismic attributes are considered. This classification is based on the use of computer technology with parallel computing on graphic processors. High-speed parallel computing provides the ability to interactively classify and get results in real-time. At the same time, application of graphic processors allows to realize technologies of interactive classification not only on computing clusters, but also on personal computers.

Geological efficiency of technologies of interactive classification is shown. Their application allows to detect geological bodies with certain physical properties on the basis of computer analysis of three-dimensional arrays of seismic data, in particular seismic images and arrays of seismic attributes. It is important to note that computer technologies of the interactive classification of three-dimensional seismic data not only provide a high speed of determination of the spatial position and properties of geological bodies, but also allow to realize the fundamental possibility of such a definition. Traditional approaches to the identification and classification of geological bodies are based on a sequential analysis of sections of three-dimensional seismic data. In this case, the solution of the problem of the identification and classification of geological bodies often encounter the fundamental problems due to the complexity of the visual assessment of three-dimensional geological objects based on the analysis of the sequence of two-dimensional sections of the arrays of seismic data.

The authors propose a convenient approach to systematizing methods of interactive classification of geological bodies by one and several seismic attributes. The known technologies of bright spots and AVO are considered as elements of a sequence of methods of interactive classification using different numbers of seismic attributes.

According to the results of 3-D seismic survey carried out on the areas of the east of Ukraine, the classification of geological bodies using one and two seismic attributes was performed. Some objects with perspectives concerning presence of hydrocarbon were found and analyzed. The conclusion of classification expediency using several parameters is done. It creates preconditions for realization of more perfect and versatile approaches to the detection of geological bodies with given physical properties.

Keywords: seismic image, seismic inversion, interactive classification, seismic attributes, geobody, direct indicators of hydrocarbons.

C. Выхва, 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
И. Соловьев, ген. директор,
E-mail: i.solovyov@geounit.com.ua
В. Круглик, вед. геолог,
E-mail: v.kruglyk@gmail.com
Г. Лесной, д-р геол. наук, доц., зам. ген. директора,
E-mail: g.lisny@geounit.com.ua
ООО "ГЕОЮНИТ", пр. С. Бандеры, 9, г. Киев, 04073, Украина

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРАКТИВНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ТЕЛ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАЛЕЖЕЙ ГАЗА НА ВОСТОКЕ УКРАИНЫ

Рассмотрены возможности выделения геологических тел с определенными физическими и фильтрационно-емкостными свойствами на основе классификации по набору сейсмических атрибутов. Такая классификация базируется на использовании компьютерных технологий с параллельными вычислениями на графических процессорах. Высокая скорость параллельных вычислений обеспечивает возможность интерактивной классификации и получения результатов практически в реальном времени. В то же время использование графических процессоров позволяет реализовать технологии интерактивной классификации не только на вычислительных кластерах, но и на персональных компьютерах.

Показана геологическая эффективность технологий интерактивной классификации. Их использование позволяет выявлять геологические тела с определенными физическими свойствами на основе компьютерного анализа трехмерных массивов сейсмических данных, в том числе сейсмических изображений и массивов сейсмических атрибутов. Важно отметить, что компьютерные технологии интерактивной классификации трехмерных сейсмических данных не только обеспечивают высокую скорость определения пространственного положения и свойств геологических тел, но и позволяют реализовать принципиальную возможность такого определения. Традиционные подходы к выделению и классификации геологических тел базируются на последовательном анализе разрезов трехмерных сейсмических данных. В этом случае решение задачи выделения и классификации геологических тел часто сталкивается с принципиальными проблемами в связи со сложностью визуальной оценки трехмерных геологических объектов на основе анализа последовательности двухмерных разрезов массивов сейсмических данных.

Авторами предложен удобный подход к систематизации способов интерактивной классификации геологических тел по одному и нескольким сейсмическим атрибутам. Известные технологии яркого пятна и AVO рассматриваются как элементы последовательности способов интерактивной классификации с использованием различного количества сейсмических атрибутов.

По данным объемной сейсморазведки, проведенной на площадях востока Украины, выполнена классификация геологических тел по одному и двум сейсмическим атрибутам. Найдены и проанализированы объекты, перспективные в отношении содержания углеводородов. Сделан вывод о целесообразности классификации по нескольким параметрам, что создает предпосылки для реализации более совершенных и разносторонних подходов к выделению геологических тел с заданными физическими свойствами.

Ключевые слова: сейсмическое изображение, сейсмическая инверсия, интерактивная классификация, сейсмические атрибуты, прямые индикаторы углеводородов.