

Виділення пасток неструктурного типу у межах північного борту Дніпровсько-Донецької западини за даними AVO-аналізу та сейсмічної інверсії

І.Л. Михалевич, П.М. Кузьменко, А.П. Тищенко, А.С. Вижва, С.А. Вижва, 2021

Київський державний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Надійшла 24 вересня 2020 р.

Пастки неструктурного типу в осадовому чохлі північного борту Дніпровсько-Донецької западини недостатньо вивчені сейсмічними методами у зв'язку з багатьма факторами, серед яких складна геологічна будова та не досить висока якість вхідних геолого-геофізичних даних минулих років. На підставі дослідження пружних динамічних характеристик методами AVO-аналізу та пружної (еластичної) сейсмічної інверсії продемонстровано виділення літологічно екранованого газонасиченого об'єкта. Проаналізовано акустичні та пружні властивості у свердловинах з кросдипольною реальною та синтезованою акустикой. На основі співвідношень V_p/V_s та акустичного імпедансу виділено газонасичені інтервали. За результатами AVO-досліджень у межах північного борту западини у товщі продуктивних горизонтів московського ярусу отримано позитивну відповідь на питання стосовно коректності AVO-аналізу в межах його родовищ. Визначальними геологічними факторами, що впливають на результат під час застосування AVO-аналізу на більшості газоконденсатних родовищ північного борту западини, є ефективні товщини, глибини залягання, літологія, пористість та якість вхідних сейсмічних даних і даних геофізичних досліджень свердловин. Унаслідок незначних ефективних товщин, низьких значень пористості, значних глибин залягання продуктивних пластів, що є типовим для північного борту западини, більшість газонасичених інтервалів не ідентифікуються в хвильовому полі за динамічними характеристиками сейсмічного сигналу. Усі проаналізовані сейсмічні аномалії мали ефективні товщини від 6 до 20 м. У межах родовищ північного борту западини змодельовано AVO-аномалії II класу. Поряд з позитивним досвідом виділення динамічно контрастних об'єктів у хвильовому полі наведено узагальнені для північного борту зокрема та всієї Дніпровсько-Донецької западини в цілому обмеження застосування методів AVO-аналізу та пружної сейсмічної інверсії.

Ключові слова: AVO-аналіз, сейсмічна інверсія, літологічна пастка, кросдипольна акустика, північний борт Дніпровсько-Донецької западини.

Вступ. На сьогодні неструктурного типу пастки в осадовому чохлі північного борту Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) недостатньо глибоко вивчені сейсмічними методами. Як зазначено у статті [Кривошеєв та ін., 2019], у добре вивченому нафтогазозносному басейні України — ДДЗ неструктурні пастки мають стати основою пошуків родовищ нафти й газу на ближню й середню перспективу.

Дослідження динамічних характеристик сейсмічного хвильового поля до підсумовування сейсмограм спільної серединної точки (варіант престек) є ефективним інстру-

ментом ідентифікації потенційного вуглеводневого насичення перспективних об'єктів різного типу, зокрема літологічного. Одними із досить ефективних інструментів є методи AVO-аналізу (Amplitude Versus Offset) [Rutherford, Williams, 1989] та пружної (еластичної) сейсмічної інверсії. Мета такого аналізу — отримання якісно нової інформації із сейсмічних сигналів, яка характеризує фізичні властивості порід, а також літологію, пористість і характер насичення флюїдами. На відміну від традиційних сейсмічних параметрів (швидкостей, акустичної жорсткості геологічного середовища, амплі-

літуд, частот та інших трансформант хвильового поля) AVO-аналіз передбачає вивчення амплітуд залежно від віддалі джерело—приймач, тобто їх залежність від кута падіння хвилі на межу відбиття по вхідних сейсмотрасах.

Основою теоретичних передумов AVO-аналізу є рівняння Цюпрітца, які справедливі для плоскої хвилі та описують зміни їх коефіцієнтів відбиття залежно від кута падіння [Zoeppritz, 1919]. Зміни амплітудних аномалій в сейсмічному полі пов'язані зі значними змінами відношення коефіцієнта Пуассона і виникають, якщо газонасичені породи заміщуються водонасиченими. Властивості гірських порід, насичених газом чи нафтою, відображаються в амплітудах відбитих хвиль від таких порід. У світовій практиці дуже багато випадків, коли AVO-аналіз давав нестійкі та неоднозначні результати. Відомо, що ефективність цієї методики залежить від ступеня впливу багатьох ускладнювальних чинників, зокрема, таких як напрямленість джерел і приймачів, а також їх груп; тонка шаруватість геологічного розрізу, що викликає небажані ефекти інтерференції та призводить до зміни форми та амплітуди відбитого імпульсу з віддаленням джерело—приймач. Одним із критичних факторів, що вносить негативний ефект в AVO-характеристики, є наявність фону регулярних та нерегулярних хвиль-завад. Також дуже критично слід ставитись до обробки сейсмічних даних, особливо до виконання обробки в режимі збереження/контролювання амплітуд сигналу.

У цій статті висвітлено позитивний досвід вивчення та аналізу пружних динамічних характеристик престек сейсмічних даних з виділенням літологічно екранованого газонасиченого об'єкта за результатами AVO-аналізу та пружної інверсії. Разом із позитивним досвідом виділення динамічно контрастних об'єктів у хвильовому полі наведено узагальнені для північного борту зокрема та всієї ДДЗ у цілому обмеження застосування методів AVO-аналізу та пружної сейсмічної інверсії.

Нижче свідомо винесено перелік дискусійних питань, а саме узагальнених обме-

жень застосування AVO-аналізу в межах північного борту ДДЗ з метою зорієнтувати читача на тому, що зазначений метод має великі обмеження. Без розуміння перелічених нижче особливостей застосування AVO-аналізу не матиме геологічного змісту.

Узагальнені обмеження AVO-аналізу в межах північного борту ДДЗ такі.

- Недостатня якість вхідних геолого-геофізичних даних минулих років: урахування впливу зон малих швидкостей — неідентичність умов збудження—приймання, обробка сейсмічних даних не в режимі контролювання амплітуд сейсмічного сигналу; недостатня якість даних геофізичних досліджень свердловин (ГДС) минулих років.

- Малі ефективні товщини газонасичених пластів, що лежать за межами роздільності класичної сейсмозвідки зазвичай створюють інтерференційну картину в комплексі з іншими відбиттями.

- Значні глибини залягання поряд з малими ефективними товщинами (орієнтовно менше 10 м) створюють одне з основних обмежень застосування AVO-аналізу.

- Низькопористі газонасичені пісковики не є контрастними на сейсмограмах, і навпаки, високопористі потужні водонасичені пісковики із залишковим газонасиченням можуть створювати амплітудні аномалії.

- Малі контрасти акустичної жорсткості газонасичених низькопористих пісковиків, які майже не відрізняються від вмісних порід, формують AVO-аномалії II класу.

- На підставі досліджень AVO-аналіз дає більш однозначні результати у відкладах московського ярусу середнього карбону і менш однозначні у відкладах башкирського ярусу і нижче.

- Газонасичені товщі здебільшого лежать у межах значень співвідношень V_p/V_s 1,4—1,62 одиниць.

Проте можуть бути інші варіанти, які аналізуються окремо (рис. 1).

AVO-дослідження в межах газового родовища в товщах продуктивних горизонтів М-2 та М-3 дає відповідь на питання коректності AVO-аналізу в межах газоконденсатних родовищ північного борту ДДЗ.

Вхідними даними були матеріали 3D сейс-

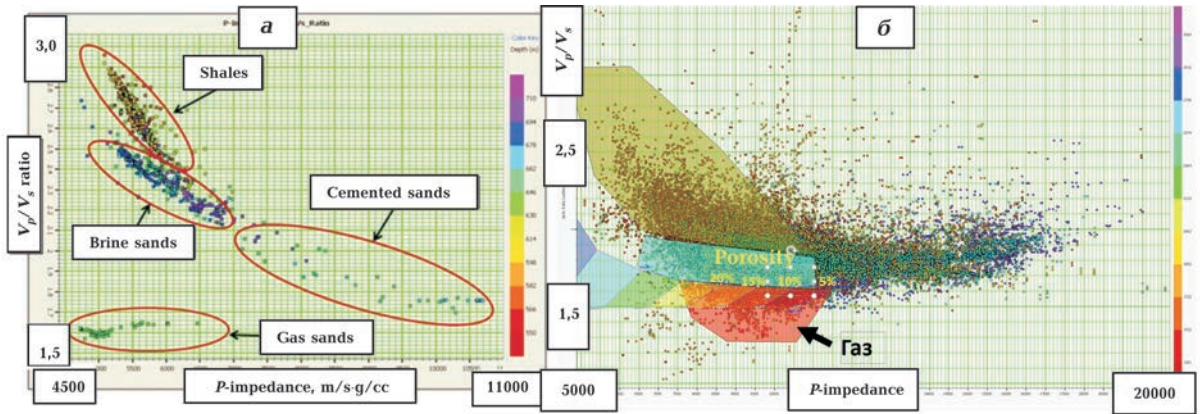


Рис. 1. Кросплоти співвідношень акустичного імпедансу та V_p/V_s : а — за даними [Russell, 2013]; б — на основі реальних даних свердловин, для яких зареєстрована крива кросдипольного акустичного каротажу в межах деяких газових родовищ північного борту ДДЗ. Пояснення у тексті.

Fig. 1. Crossplots showing acoustic impedance and V_p/V_s ratio: а — based on literature sources; б — based on real data from the field located in the DDD.

мічних досліджень, проведених вітчизняною компанією протягом 2011—2012 рр. Їх обробку виконала зарубіжна компанія у 2014 р. у режимі контролювання амплітуд для розв'язання задач AVO-аналізу. Деякі аспекти цього підходу описані у статті [Продайвода, Кузьменко, 2010]. Такий тип обробки дав змогу забезпечити вивчення співвідношення амплітуд та отримати наведені нижче результати.

Як зазначено вище, досліджено криві ГДС у свердловинах, в яких існує реальна кросдипольна акустика (зареєстрована крива S-хвилі), що вкрай необхідно для застосування методів динамічного престоку-аналізу. Однак для свердловин, в яких відсутні криві S-хвилі, генерують криві S-хвилі із заміщенням флюїду на підставі рівнянь Біота—Гассмана [Russell, 2013]. Рис. 2 ілюструє генерування кривої S-хвилі, мо-

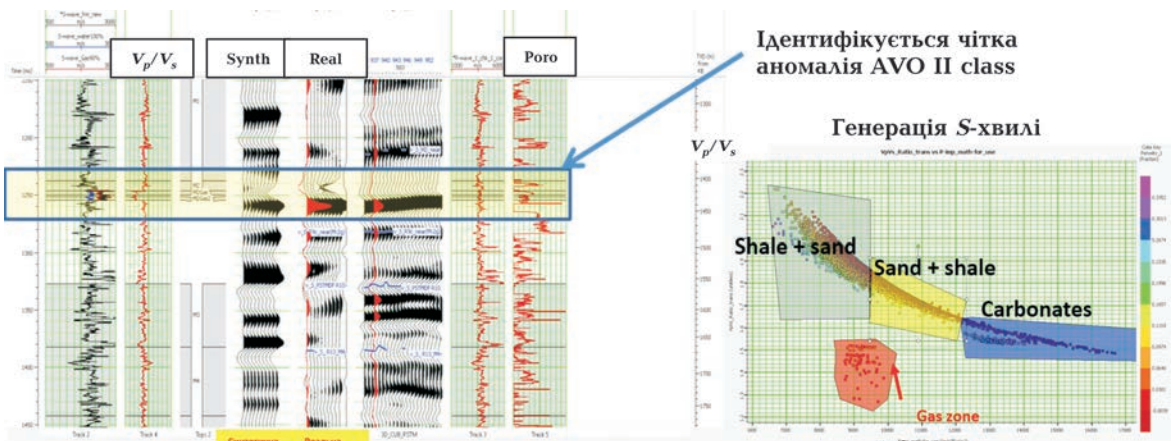


Рис. 2. Моделювання синтетичної сейсмограми: а — порівняння її з реальною в межах підтвердженого газонасиченого інтервалу у відкладах московського ярусу; б — виділення газонасиченої зони за результатами кросплотингу P -імпедансу vs V_p/V_s .

Fig. 2. Synthetic log simulation and its comparison with a real data-based log within the boundaries of confirmed gas-saturated interval in the Moscovian deposits (а); a gas-charged zone can be identified based on results of crossplotting the P -impedance vs V_p/V_s ratios (б).

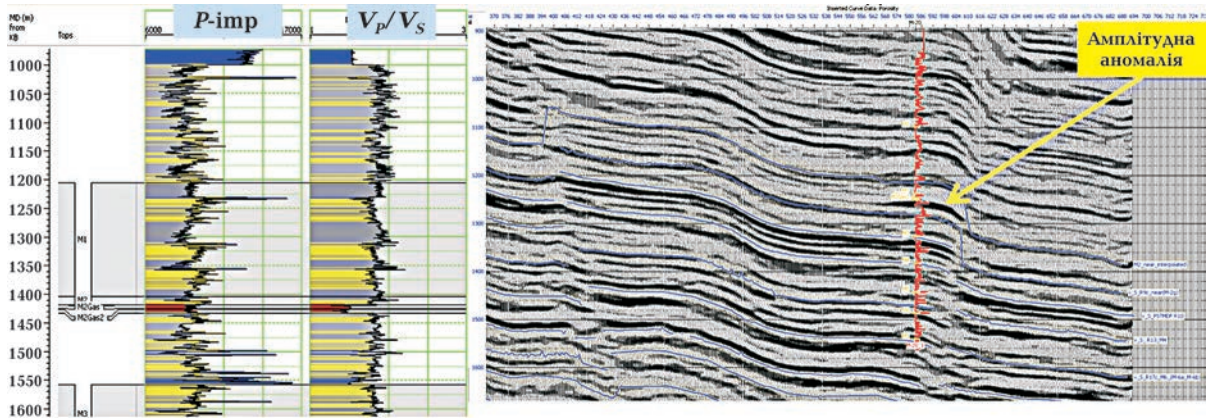


Рис. 3. Кольорокодовані значення з кросплоту на кривих (а) та сейсмічний розріз з аномалією типу «яскрава пляма» (б), що є AVO-аномалією II класу.

Fig. 3. Color-coded values interpolated to the crossplot curves (a) and to the seismic section, showing a «bright spot» anomaly (b), the AVO-anomaly is of II class.

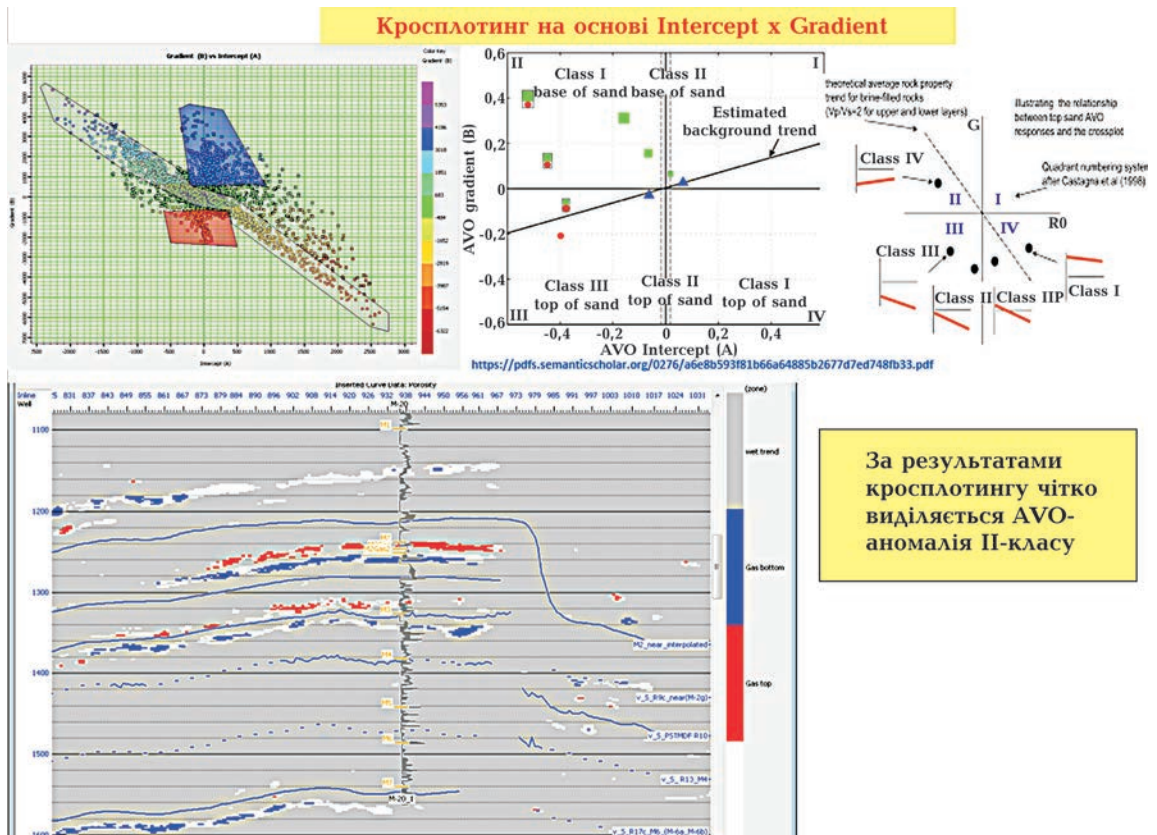


Рис. 4. Кросплотинг AVO-аномалій дає додаткові підтвердження того, що аномалія типу «яскрава пляма» є AVO-аномалією II класу.

Fig. 4. Crossplotting of the AVO-anomalies provides additional confirmation that the «bright spot» anomaly represents the II class AVO-anomaly.

делювання синтетичної сейсмограми і порівняння її з реальною в межах підтвердженого випробуваннями та експлуатацією газонасиченого інтервалу у відкладах московського ярусу середнього карбону. Сейсмічний відгук характеризується AVO-аномалією II класу. На рис. 2 бачимо, що за результатами кросплатингу P -імпедансу vs V_P/V_S виділяється газонасичена зона, яка відображена на кривих методів ГДС. На рис. 3 показано сейсмічний розріз із сейсмічною аномалією типу «яскрава пляма» [Rost, 2006; Hart, 2011] у відкладах московського ярусу, яка розбурена зі стабільними промисловими припливами газу. Цей поклад тектонічно екранований та літологічно обмежений. Усі досліджені сейсміч-

ні аномалії мають ефективні товщини від 6 до 20 м.

Наступний крок — кросплатинг (рис. 4), згідно з [Castagna, Swan, 1997; Zhang et al., 2012], на основі сейсмічних кубів інтерсепту та градієнта. Підтверджується, що амплітудна аномалія є AVO-аномалією II класу, згідно з класифікацією за [Rutherford, Williams, 1989].

Одними з класичних інструментів дослідження динамічних аномалій за престекданими є побудова розрізів коефіцієнтів Пуассона (AVO-атрибут є корисним саме для AVO-аномалій II класу), розрізів Інтерсепт/Градієнт та результату престек пружної інверсії — куба співвідношень V_P/V_S (рис. 5).

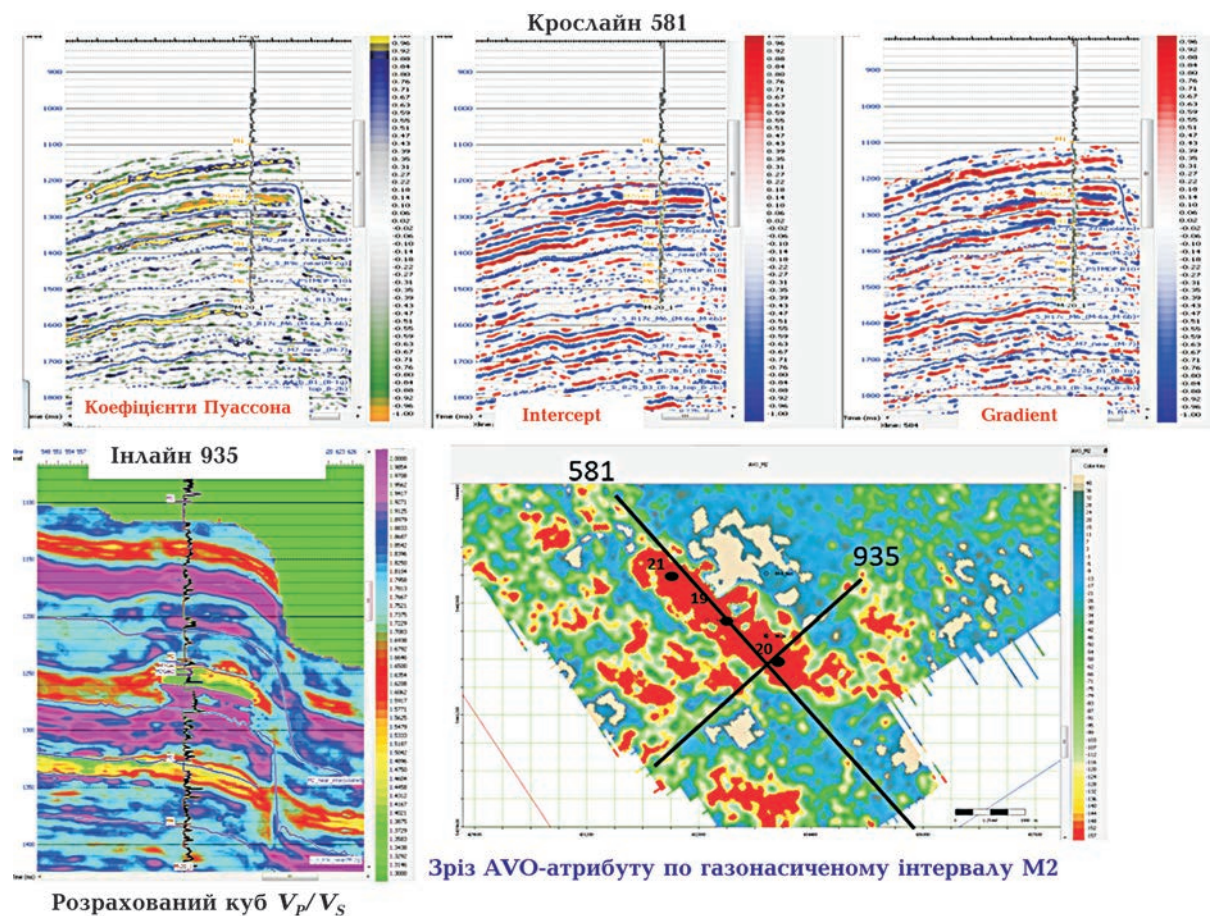


Рис. 5. Розрізи коефіцієнтів Пуассона (а), Інтерсепт/Градієнт (б, в), розрахований куб V_P/V_S (г), карта розподілу AVO-атрибуту за горизонтом у товщі продуктивного інтервалу (д).

Fig. 5. Sections showing Poisson's ratio (a), Intercept/Gradient (b, c) and V_P/V_S ratio (g). AVO-attribute distribution map over the horizon within the producing interval (d).

Отримані результати ставлять передумови для подальшого застосування AVO-аналізу та пружної інверсії для пошуків і розвідки родовищ вуглеводнів неструктурного типу.

На рис. 6, 7 реалізовано виконання задач з чіткішим оконтуренням AVO-аномалії у продуктивному горизонті М-3 московських відкладів. На рис. 6 показано AVO-атрибут: добуток інтерсепта та градієнта (Product AxB). Карта розподілу Product AxB у товщі М-3 з продуктивними свердловинами М-2, М-21, які підтверджені випробуваннями, показана на рис. 7. З даних зображень можна зробити висновок щодо достатньої однозначної ідентифікації газонасичених товщ методами престока-аналізу.

Висновки. Проаналізовано акустичні та пружні властивості у свердловинах з крос-дипольною реальною та синтезованою акустикой на підставі співвідношень V_p/V_s та акустичного імпедансу. Чітко виділяються

газонасичені інтервали, які лежать у межах 1,4—1,58 одиниць.

На основі AVO-досліджень у межах родовища північного борту ДДЗ в товщі продуктивних горизонтів московського ярусу отримано позитивну відповідь на питання: «Чи працює взагалі коректно AVO-аналіз у межах родовищ північного борту ДДЗ?».

Ключовими для застосування AVO-аналізу на більшості газоконденсатних родовищ північного борту ДДЗ є ефективні товщини, глибини залягання, літологія, пористість та якість вхідних сейсмічних даних і даних ГДС. Зважаючи на незначні ефективні товщини, низькі значення пористості, значні глибини залягання продуктивних пластів, що є типовим для північного борту ДДЗ, більшість газонасичених інтервалів не ідентифікуються у хвильовому полі за динамічними характеристиками сейсмічного сигналу. У такому разі основним під час вибору місцеположення для бурін-

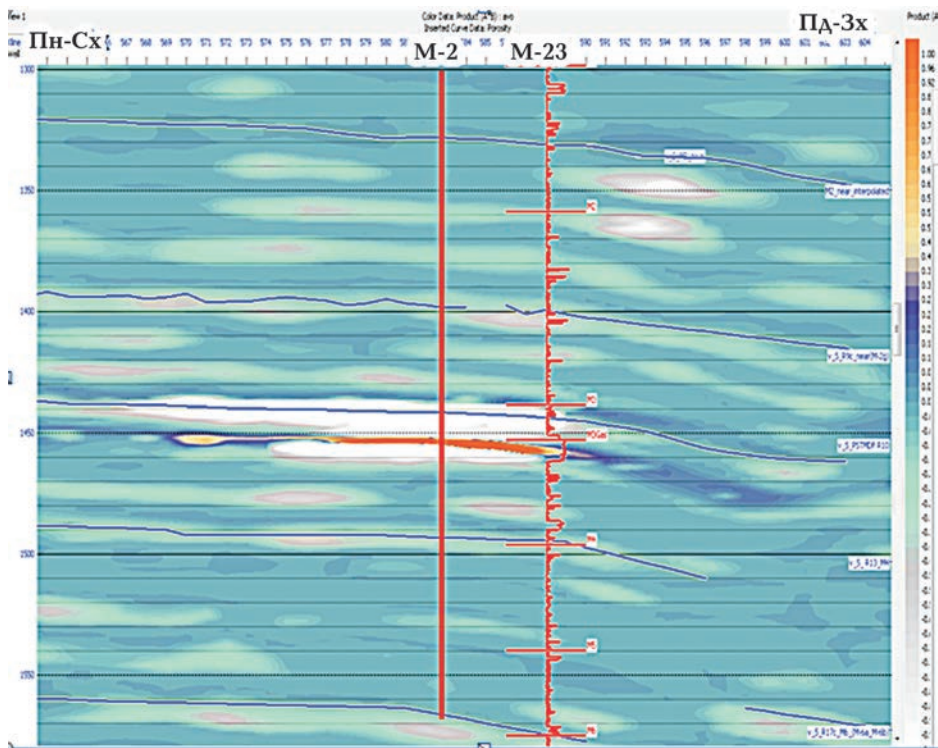


Рис. 6. Розріз розподілу AVO-атрибуту Product AxB.

Fig. 6. Section showing distribution of AVO-attribute ProductAxB.

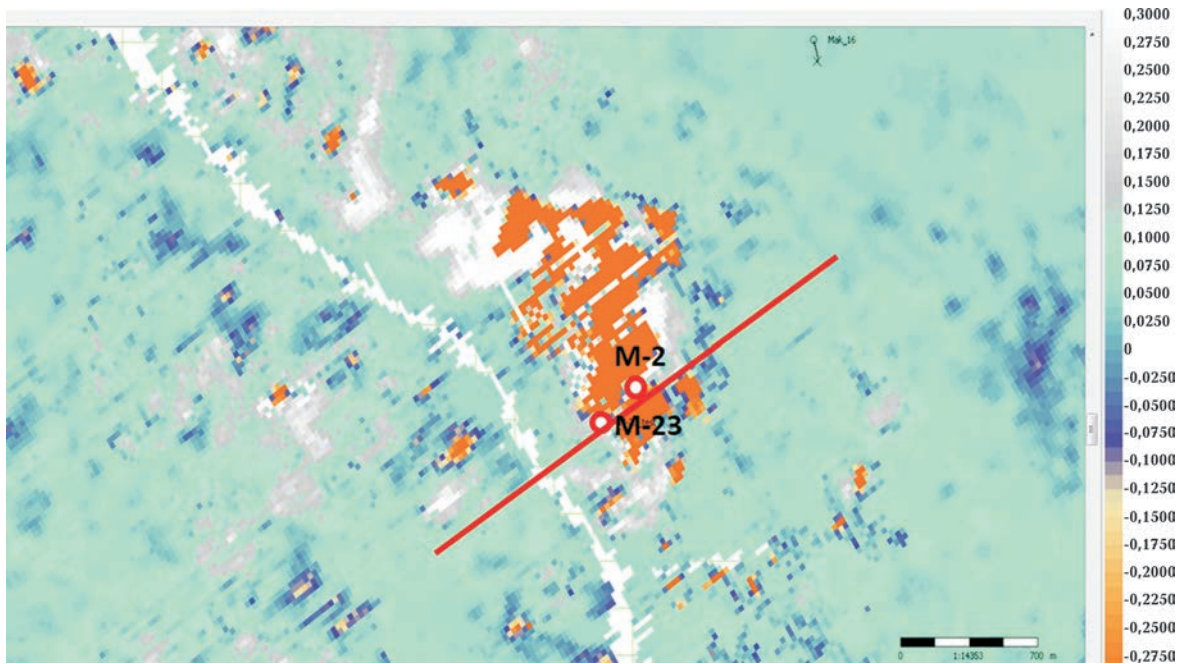


Рис. 7. Карта розподілу AVO-атрибуту Product AxB.

Fig. 7. Map showing distribution of AVO-attribute ProductAxB.

ня нових свердловин є структурний фактор. Усі проаналізовані сейсмічні аномалії мали ефективні товщини від 6 до 20 м.

У межах родовищ північного борту ДДЗ моделюють AVO-аномалії II класу.

Отримані результати ставлять передумови щодо перспектив застосування AVO-аналізу та пружної інверсії для пошуків і розвідки родовищ вуглеводнів неструктурного типу.

Список літератури

- Кривошеев В.Т., Макогон В.В., Іванова Є.З. Основний резерв прискороеного ефективного відкриття родовищ нафти і газу в Україні. *Мінеральні ресурси України*. 2019. № 1. С. 31—37.
- Продайвода Г.Т., Кузьменко П.М. AVO-аналіз та інверсія сейсмічних даних, як спосіб підвищення ефективності морської сейсморозвідки при пошуках нафти і газу. *Геоінформатика*. 2010. № 1. С. 25—36.
- Castagna, J.P., & Swan, H.W. (1997). Principles of AVO crossplotting. *The Leading Edge*, 17, 337—342. <https://doi.org/10.1190/1.1437626>.
- Hart, B.S. (2011). *An Introduction to Seismic Interpretation*. Publisher American Association of Petroleum Geologists. AAPG Datapages, 215 p.
- Rost, S. (2006). Amplitude Variation with Offset AVO and Direct Hydrocarbon Indicators DHI. Retrieved from http://homepages.see.leeds.ac.uk/~earsro/Lecture_files/16-DHI_3.pdf.
- Russell, B. (2013). A Gassmann-consistent rock physics template. *CSEG Recorder*, 38(06).
- Rutherford, S.R., & Williams, R.H. (1989). Amplitude-versus-offset variations in gas sands. *Geophysics*, 54(6), 680—688. <https://doi.org/10.1190/1.1442696>.
- Zhang, Z., McConnell, D.R., & Han, D. (2012). *Geofizический журнал* № 2, Т. 43, 2021

AVO cross plot analysis in unconsolidated sediments containing gas hydrate and free gas: Green Canyon 955, Gulf of Mexico. SEG Technical Program Expanded Abstracts (pp. 1—5).

<http://dx.doi.org/10.1190/segam2012-1104.1>. Zoeppritz, K. (1919). On the reflection and propagation of seismic waves. In *Erdbebenwellen VIII B* (pp. 66—84). Göttinger Nachrichten.

Identification of nonstructural type traps within the limits of northern side of Dnieper-Donets Depression according to the data of AVO analysis and seismic inversion

I.L. Mikhalevich, P.M. Kuzmenko, A.P. Tishchenko, A.S. Vyzhva, S.A. Vyzhva, 2021

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Nonstructural type traps in the sedimentary cover of the northern side of the Dnieper-Donets depression are poorly studied by seismic methods due to many factors among which are the following: complicated geological structure and not so high quality of given data of geological-geophysical studies of last years. Identification of lithologically screened gas-saturated object has been demonstrated based on the studies of elastic dynamic characteristics by the methods of AVO-analysis and elastic seismic inversion. Acoustic and elastic properties have been analyzed in the wells with cross-dipole real and synthesized acoustics. Gas-saturated intervals have been identified based on the ratios V_p/V_s and acoustic impedance. According to AVO-studies within the northern side of DDD in the stratum of productive horizons of the moscovian horizon a positive answer has been obtained to the question «if AVO analysis works correctly in general within the limits of the northern side of DDD deposits». Determining factors that influence on the result during the application of AVO-analysis at the most part of gas condensate field of the northern side of DDD are effective thicknesses, depths of occurrence, lithology, porosity and quality of given seismic data and data from geophysical surveys of wells. Taking into account minor effective thicknesses, small values of porosity, significant depths of occurrence of productive layers typical for the northern side of DDD, the majority of gas-saturated intervals are not at all identified in the wave field by dynamic characteristics of seismic signal. All the seismic anomalies analyzed had effective thicknesses from 6 to 20 m. Within the limits of deposits of the northern side of DDD, AVO-anomalies of the 2nd class are modeled. Along with positive experience of identification of dynamically contrasting objects in the wave field limitations to use methods of AVO-analysis and elastic seismic inversion are generalized for the northern side shown in particular and the whole Dnieper-Donets depression.

Key words: AVO-analysis, seismic inversion, lithologic trap, cross-dipole acoustic, Northern side of DDD.

References

- Krivosheev, V.T., Makohon, V.V., & Ivanova, E.Z. (2019). The main reserve for accelerated effective discovery of oil-and-gas fields in Ukraine. *Mineralni resursy Ukrayiny*, (1), 31—37 (in Ukrainian).
- Prodayvoda, H.T., Kuzmenko, P.M. (2010). AVO-analysis and inversion of seismic data as a way to improve the efficiency of marine seismic exploration in the search for oil-and-gas. *Geoinformatika*, (1), 25—36 (in Ukrainian).

- Castagna, J.P., & Swan, H.W. (1997). Principles of AVO crossplotting. *The Leading Edge*, 17, 337—342. <https://doi.org/10.1190/1.1437626>.
- Hart, B.S. (2011). *An Introduction to Seismic Interpretation*. Publisher American Association of Petroleum Geologists. AAPG Datapages, 215 p.
- Rost, S. (2006). Amplitude Variation with Offset AVO and Direct Hydrocarbon Indicators DHI. Retrieved from http://homepages.see.leeds.ac.uk/~earsro/Lecture_files/16-DHI_3.pdf.
- Russell, B. (2013). A Gassmann-consistent rock physics template. *CSEG Recorder*, 38(06).
- Rutherford, S.R., & Williams, R.H. (1989). Amplitude-versus-offset variations in gas sands. *Geophysics*, 54(6), 680—688. <https://doi.org/10.1190/1.1442696>.
- Zhang, Z., McConnell, D.R., & Han, D. (2012). AVO cross plot analysis in unconsolidated sediments containing gas hydrate and free gas: Green Canyon 955, Gulf of Mexico. SEG Technical Program Expanded Abstracts (pp. 1—5). <http://dx.doi.org/10.1190/segam2012-1104.1>.
- Zoeppritz, K. (1919). On the reflection and propagation of seismic waves. In *Erdbebenwellen VIII B* (pp. 66—84). Göttinger Nachrichten.

Выделение ловушек неструктурного типа в пределах северного борта Донецко-Днепровской впадины по данным AVO-анализа и сейсмической инверсии

**И.А. Михалевич, П.М. Кузьменко, А.П. Тищенко, А.С. Выжва,
С.А. Выжва, 2021**

Киевский государственный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

Ловушки неструктурного типа в осадочном чехле северного борта Днепровско-Донецкой впадины недостаточно изучены сейсмическими методами в связи со многими факторами, среди которых сложное геологическое строение и недостаточно высокое качество входных геолого-геофизических данных прошлых лет. На основе исследования упругих динамических характеристик методами AVO-анализа и упругой (эластичной) сейсмической инверсии продемонстрировано выделение литологически экранированного газонасыщенного объекта. Проанализированы акустические и упругие свойства в скважинах с кроссдипольной реальной и синтезированной акустикой. На основе соотношений V_P/V_S и акустического импеданса выделены газонасыщенные интервалы. По результатам AVO-исследований в пределах северного борта впадины в толще продуктивных горизонтов московского яруса получен положительный ответ на вопрос о корректности AVO-анализа в пределах его месторождений. На результат при применении AVO-анализа на большинстве газоконденсатных месторождений северного борта впадины влияют такие геологические факторы, как эффективные толщины, глубины залегания, литология, пористость и качество входных сейсмических данных и данных геофизических исследований скважин. Несмотря на незначительные эффективные толщины, низкие значения пористости, значительные глубины залегания продуктивных пластов, типичные для северного борта впадины, большинство газонасыщенных интервалов не идентифицируются в волновом поле по динамическим характеристикам сейсмического сигнала. Все проанализированные сейсмические аномалии имели эффективные толщины от 6 до 20 м. В рамках месторождений северного борта впадины моделируются AVO-аномалии II класса. Наряду с положительным опытом выделения динамично контрастных объектов в волновом поле приведены обобщенные для северного борта в частности и всей Днепровско-Донецкой впадины в целом ограничения применения методов AVO-анализа и упругой сейсмической инверсии.

Ключевые слова: AVO-анализ, сейсмическая инверсия, литологическая ловушка, кроссдипольная акустика, северный борт Днепровско-Донецкой впадины.