

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

КП.НЗ-01.00.000 ПЗ

Група НЗФ-22-1

Аврамишин Олександр

Святославович

2026 р.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Міністерство освіти і науки України

Факультет природничих наук
Кафедра нафтогазової геофізики

Аврамишин Олександр Святославович
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 550.835

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Оцінка ефективності використання AVO-атрибутів при пошуках газових

(назва роботи)
покладів

Нафтогазова геофізика
(назва освітньої програми)

103 «Науки про Землю»
(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач освітнього ступеня Аврамишин О.С
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Розловська Світлана Євгеніївна, к.геол.н., доцент
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
в. о. завідувача кафедри

доцент С. М. Багрій
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

м. Івано-Франківськ — 2026 рік

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Факультет природничих наук

Кафедра нафтогазової геофізики

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 103 «Науки про Землю»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри НГГ

доц. Федорів В.В.

“ ” 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Аврамишину Олександр Святославовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оцінка ефективності використання AVO-атрибутів при пошуках газових покладів

Керівник роботи Розловська Світлана Євгеніївна

Затверджені наказом закладу вищої освіти від “07” квітня 2026 р. №165/7.

2. Строк подання студентом роботи 5 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи Завдання на бакалаврську роботу. Геолого-геофізичні дані з вивчення Субботінської площі. Спеціалізована література.

4. Зміст розрахунково– пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1) Вступ

2) Загальна геолого-геофізична характеристика

3) Пряма задача AVO-аналізу

4) Оцінка ефективності використання AVO-атрибутів

5) Польові дослідження та обробка матеріалів.

6) Висновки. Перелік використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Презентація бакалаврської роботи в обсязі 14 слайдів

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 07 квітня 2026 р.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ п/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Формулювання мети і завдання роботи	07.04.2026–13.04.2026	виконано
2.	Аналіз джерел і вихідних даних	14.04.2026–22.04.2026	виконано
3.	Опрацювання теоретичних основ АВО-аналізу. Написання розділу 1	23.04.2026–04.05.2026	виконано
4.	Опрацювання петрофізичних основ інтерпретації АВО-аномалій. Написання розділу 2	05.05.2026–16.05.2026	виконано
5.	Практичне застосування аво-аналізу при пошуках газових покладів на родовищі Субботіна. Написання розділу 3	17.05.2026–28.05.2026	виконано
6.	Написання висновків та переліку посилань на джерела.	29.05.2026–01.06.2026	виконано
7.	Оформлення пояснювальної записки, підготовка презентації та графічного матеріалу до захисту.	02.06.2026–05.06.2026	виконано

Студент

(підпис)

Аврамишин О.С

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Розловська С.Є.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота : 54ст., 20 рис.,1 табл.

Тема бакалаврської роботи - Оцінка ефективності використання AVO-атрибутів при пошуках газових покладів.

Метою є визначення оцінки ефективності використання AVO-атрибутів при геофізичних роботах.

У першому розділі інформується про теоретичні та методичні основи AVO-аналізу.

Другий розділ містить обґрунтування літологічної інтерпретації, прогнозу фільтраційно-ємнісних параметрів колекторів, сучасний стан застосування та перспективи розвитку AVO-аналізу.

В третьому розділі наведені приклади практичного застосування даного аналізу, геологічна та літолого-стратиграфічна характеристики, дані по цьому аналізу і загальні результати, що отримані в результаті обробки.

AVO-АНАЛІЗ, AVO-АТРИБУТ, AVO-АНОМАЛІЯ, СУББОТІНСЬКЕ РОДОВИЩЕ, ГАЗОВИЙ ПОКЛАД

ABSTRACT

Bachelor's thesis: 54 pages, 20 figures, 1 table.

The topic of the bachelor's thesis is 'Assessment of the effectiveness of AVO attributes in the search for gas deposits'.

The aim is to assess the effectiveness of AVO attributes in geophysical surveys.

The first chapter provides information on the theoretical and methodological foundations of AVO analysis.

The second chapter contains a justification of lithological interpretation, a forecast of the permeability and porosity parameters of reservoirs, the current state of application and prospects for the development of AVO analysis.

The third chapter presents examples of the practical application of this analysis, geological and lithostratigraphic characteristics, data on this analysis, and the general results obtained from the processing.

AVO ANALYSIS, AVO ATTRIBUTE, AVO ANOMALY,
SUBBOTINSKE FIELD, GAS DEPOSIT

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ AVO-АНАЛІЗУ	10
1.1 Теоретичні основи AVO-аналізу.....	10
1.2 Пряма задача AVO-аналізу	11
1.3 Основні атрибути AVO-аналізу.....	13
1.4 Класифікація AVO-аномалій	16
2 ПЕТРОФІЗИЧНІ ОСНОВИ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ AVO-АНОМАЛІЙ.....	21
2.1 Інтеграція AVO-аналізу з геофізичними та петрофізичними даними.....	21
2.2 Прогноз літології та фільтраційно-ємнісних параметрів колекторів	23
2.3 Методологія оцінювання достовірності результатів інтерпретації AVO-аналізу.....	28
2.4 Сучасний стан застосування AVO-аналізу при дослідженні газових покладів	30
2.5 Перспективи розвитку AVO-аналізу	32
3 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ AVO-АНАЛІЗУ ПРИ ПОШУКАХ ГАЗОВИХ ПОКЛАДІВ НА РОДОВИЩІ СУББОТІНА	34
3.1 Геологічна характеристика родовища Субботіна.....	34
3.1.1 Літолого-стратиграфічна характеристика родовища	35
3.1.2 Тектонічна будова площі.....	38
3.2 Результати обробки та інтерпретації даних морської сейсмозв'язки	41
3.3 Аналіз AVO-атрибутів.....	47
ВИСНОВКИ.....	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	53

ВСТУП

У сучасних умовах пошук і розвідка родовищ вуглеводнів потребують більш точних і ефективних методів інтерпретації сейсмічних даних. Звичайні підходи, які базуються тільки на структурному аналізі, не завжди дозволяють достовірно визначити характер насичення порід, тому все більшого значення набувають динамічні методи інтерпретації.

Одним із таких методів є AVO-аналіз (Amplitude Versus Offset), який базується на дослідженні зміни амплітуди відбитих сейсмічних хвиль залежно від відстані між джерелом і приймачем. Цей підхід дає змогу отримати додаткову інформацію про фізичні властивості гірських порід, зокрема їх літологію, пористість та характер флюїдонасичення.

Актуальність теми полягає в тому, що AVO-аналіз дозволяє підвищити ефективність геологорозвідувальних робіт, зменшити ризики буріння непродуктивних свердловин і, відповідно, знизити економічні витрати. Особливо це важливо при пошуках газових покладів, де прямі ознаки можуть бути слабо вираженими або неоднозначними.

Сучасний розвиток сейсморозвідки спрямований не тільки на визначення геометрії структур, але й на дослідження фізичних властивостей середовища. Як зазначається у навчальному посібнику, динамічна інтерпретація базується на аналізі інтенсивності, форми та часу поширення сейсмічних хвиль. Саме ці параметри лежать в основі AVO-аналізу.

Метою даної роботи є оцінка ефективності використання AVO-атрибутів при пошуках газових покладів. Для досягнення цієї мети необхідно розглянути теоретичні основи методу, дослідити петрофізичні передумови формування AVO-аномалій, а також проаналізувати практичні результати застосування методу на конкретному родовищі.

Завдання дослідження:

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

1. Дослідити теоретичні основи AVO-аналізу.

2. Проаналізувати петрофізичні засади інтерпретації AVO-аномалій при пошуках вуглеводневих покладів.
3. Проаналізувати особливості геологічної будови родовища Субботіна.
4. Провести аналіз AVO-атрибутів сейсмічних даних, отриманих на родовищі.

Об'єктом дослідження є газонасні колектори пліоценового комплексу родовища Субботіна та їх сейсмічне відображення у хвильовому полі.

Предметом дослідження є методика застосування AVO-аналізу, інтерпретація AVO-атрибутів та їх використання для прогнозу газонасичення колекторів.

Практичне значення роботи полягає у дослідженні можливостей застосування AVO-аналізу для прогнозу газонасичених колекторів та підвищення достовірності геофізичної інтерпретації при пошуках покладів вуглеводнів. Отримані результати можуть бути використані при подальших геолого-геофізичних дослідженнях шельфових родовищ Чорного моря.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ AVO-АНАЛІЗУ

1.1 Теоретичні основи AVO-аналізу

Сейсморозвідка є одним з основних методів дослідження геологічного середовища при пошуках родовищ нафти і газу. Її основою є вивчення поширення пружних хвиль у надрах Землі та аналіз сигналів, які відбиваються від геологічних меж.[3]

Пружні хвилі виникають під дією штучних джерел і поширюються в середовищі, передаючи збурення від одних частинок до інших. При цьому самі частинки здійснюють коливальні рухи, але не переміщуються разом із хвилею. Швидкість поширення хвиль визначається пружними властивостями середовища та його густиною .

У сейсморозвідці прийнято розрізняти кінематичні та динамічні параметри хвиль. Кінематичні параметри (час приходу хвиль, швидкість) використовуються для побудови геометрії підземних структур. Водночас динамічні параметри (амплітуда, форма сигналу, енергія) несуть інформацію про фізичні властивості порід.[3]

Зміна амплітуди відбитої хвилі залежно від кута падіння є однією з основних характеристик сейсмічного відгуку та широко використовується при інтерпретації сейсмічних даних [6].

Саме динамічні характеристики лежать в основі AVO-аналізу. Ідея методу полягає в тому, що амплітуда відбитої хвилі змінюється залежно від кута падіння (або відстані між джерелом і приймачем). Ця зміна пов'язана з контрастом акустичних і пружних властивостей на межі розділу порід.

Якщо говорити простіше, то різні типи порід (наприклад, водонасичені та газонасичені колектори) по-різному впливають на форму і амплітуду відбитого сигналу. Саме це дозволяє використовувати AVO-атрибути для прогнозу нафтогазоносності.

Розвиток AVO-аналізу став можливим завдяки поєднанню теоретичних

досліджень поширення хвиль, чисельного моделювання та практичних спостережень. Сучасні методи обробки сейсмічних даних дозволяють виділяти і аналізувати навіть незначні зміни амплітуд, що значно підвищує інформативність методу.[2]

1.2 Пряма задача AVO-аналізу

Пряма задача AVO-аналізу полягає у встановленні залежності амплітуди відбитої сейсмічної хвилі від кута падіння або відстані між джерелом і приймачем. Тобто, якщо відомі фізичні властивості середовища (швидкості поздовжніх і поперечних хвиль, густина), необхідно визначити, як саме буде змінюватися амплітуда відбитого сигналу.[2]

В основі цієї задачі лежать закономірності відбиття і заломлення пружних хвиль на межі двох середовищ. Коли хвиля досягає межі з різними пружними властивостями, частина енергії відбивається, а частина проходить далі. При цьому величина відбитої амплітуди залежить не тільки від контрасту акустичних властивостей, але й від кута падіння хвилі.

На відміну від нормального падіння, де коефіцієнт відбиття визначається відносно просто, при похилому падінні ситуація ускладнюється. В цьому випадку виникає залежність від декількох параметрів одночасно: швидкостей поздовжніх і поперечних хвиль, густини та кута падіння. Саме ця залежність і використовується в AVO-аналізі (рисунок 1.1) [2].

В області незначних кутів падіння (до 30°) поведінка коефіцієнтів відбиття Р-хвиль істотно залежить від співвідношення швидкостей V_P/V_S (або коефіцієнтів Пуассона) покриваючої та підстеляючої товщ. За умови, що значення V_P/V_S для обох середовищ близькі, то коефіцієнти відбиття в цьому діапазоні кутів близькі до коефіцієнтів відбиття для нормального падіння. Однак, якщо V_P/V_S для двох контактуючих середовищ різні, то поведінка коефіцієнта відбиття може відрізнятися від випадку для нормального

падіння. На рисунку 1.1 наведено графіки для моделей, в яких змінюються лише відношення V_{p2}/V_{s2} (або коефіцієнти Пуассона) підстеляючого середовища. Для підстеляючого середовища ефект зміни коефіцієнта Пуассона ν_1 може спричинити різке зростання або зменшення коефіцієнта відбиття при незначних кутах падіння. Він стає більш виразним у міру того, як контраст швидкостей стає меншим. Подібні ефекти спостерігаються, якщо відношення V_{p2}/V_{s2} для нижнього середовища сталі, але змінюються для верхнього.

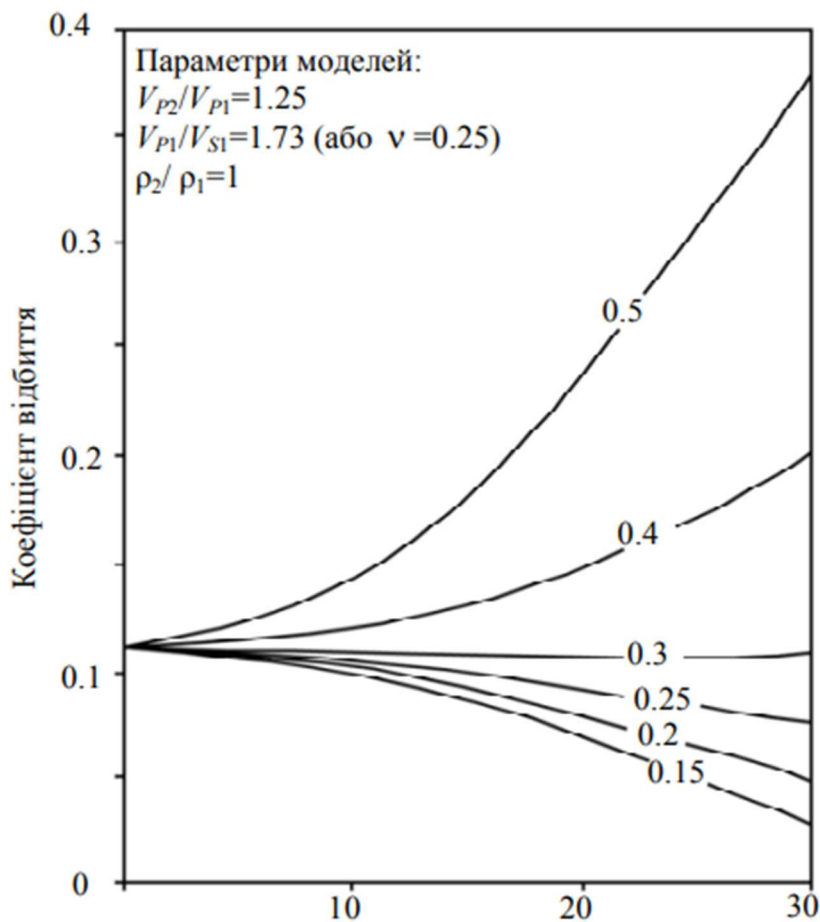


Рисунок 1.1 - Залежність коефіцієнта відбиття (R_p) Р-хвилі від кута падіння на межу для моделей, які відрізняються лише відношенням V_{p2}/V_{s2} (або коефіцієнтом Пуассона) підстеляючого шару [2]

Отже, пряма задача AVO-аналізу дає можливість змодельовати очікувану поведінку сейсмічного сигналу для різних геологічних умов. Це важливо для подальшого порівняння з реальними даними та їх інтерпретації.

1.3 Основні атрибути AVO-аналізу

AVO-аналіз взагалі базується на використанні спеціальних параметрів — атрибутів, які описують зміну амплітуди відбитого сигналу з відстанню або кутом. Ці атрибути дозволяють у зручній формі аналізувати складні залежності і робити геологічні висновки.

Найпростішим і водночас важливим атрибутом є значення амплітуди при малих кутах падіння, яке фактично відповідає коефіцієнту відбиття при нормальному падінні хвилі. Цей параметр визначається, перш за все, різницею акустичних властивостей середовищ і дозволяє оцінити контраст між шарами.[2]

Разом з цим велике значення має характер зміни амплітуди зі збільшенням кута падіння. Ця зміна відображає вплив не тільки поздовжніх хвиль, але й поперечних, а також залежить від густини порід. Саме тому аналіз цієї залежності дає можливість отримати додаткову інформацію про фізичні властивості середовища, яку неможливо визначити лише за значенням амплітуди при нульовому зміщенні.[2]

У практиці інтерпретації ці два параметри часто розглядаються разом, оскільки їх поєднання дозволяє більш надійно розрізняти різні типи порід і характер їх насичення. Наприклад, однакові значення амплітуди при малих кутах можуть відповідати різним геологічним умовам, але їх поведінка при збільшенні кута падіння буде відрізнятися.

Крім цього, для підвищення інформативності використовуються різні комбінації базових атрибутів. Такі узагальнені параметри дозволяють підсилити корисні аномалії та зменшити вплив випадкових факторів.

Зокрема, вони часто застосовуються для виділення зон, які можуть бути пов'язані з наявністю вуглеводнів.

Важливим етапом аналізу є також побудова графічних залежностей між різними атрибутами. Це дає можливість виділяти характерні області, що відповідають певним типам порід або флюїдонасичення.

У результаті такий підхід дозволяє перейти від простого спостереження змін амплітуди до більш обґрунтованих геологічних висновків.[2]

Таким чином, AVO-атрибути є ключовим інструментом динамічної інтерпретації сейсмічних даних і відіграють важливу роль при оцінці перспектив нафтогазоносності досліджуваних об'єктів. З тих, що найчастіше застосовуються можемо виділити:

1) А-атрибут – атрибут, який називають AVO-інтерцептом, котрий є (з точністю до сталого множника) коефіцієнтом відбиття R_0 .

2) В-атрибут – атрибут, який називають AVO-градієнтом, котрий з точністю до сталого множника являє собою величину G , тобто, тангенс кута нахилу прямої, яка осереднює залежність $R(\sin^2 \theta)$ у заданому діапазоні кутів θ (рисунок 1.2).

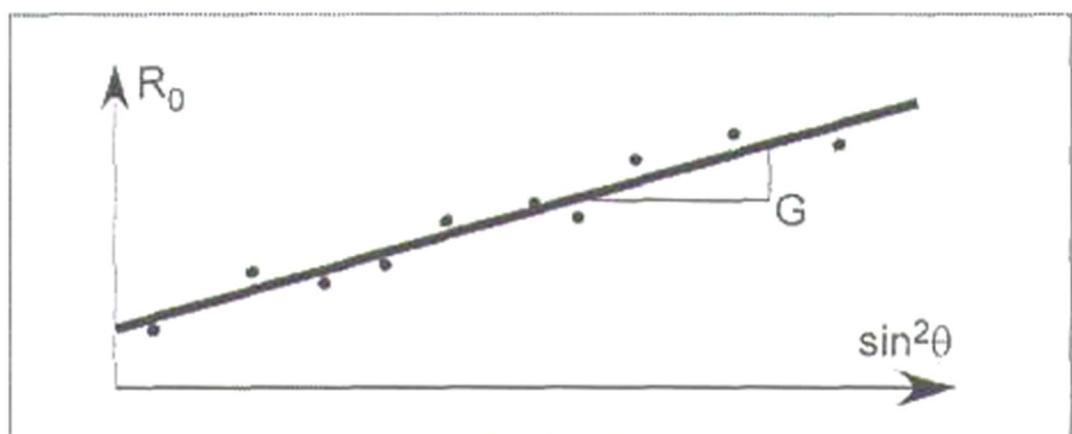


Рисунок 1.2 – Визначення AVO-градієнта за залежністю коефіцієнта відбиття від $\sin^2 \theta$

3) Атрибут добутку ($A \times B$) – атрибут, який характеризує відбиваючі властивості шаруватого геологічного середовища при поширенні поздовжніх хвиль.

4) Атрибут різниці ($A - B$ або інші комбінації) $PR = \Delta V_P / V_P - \Delta V_S / V_S$ – флюїд-фактор допомагає розділяти різні типи середовищ і підвищує чутливість до змін фізичних властивостей.[2]

Аналіз інтерцепта та градієнта дозволяє оцінювати зміну пружних властивостей середовища та є одним із основних підходів при інтерпретації AVO-аномалій [5].

Для газонасичених піщаних колекторів часто характерні AVO-аномалії класу III, при яких амплітуда відбиття зростає зі збільшенням офсету. Такі аномалії зазвичай пов'язані зі зниженням акустичного імпедансу продуктивного пласта відносно перекривних глинистих порід. Для них характерні від'ємні значення інтерцепта та градієнта, що є типовою ознакою газонасичення. У класичних роботах з AVO-аналізу зазначається, що саме аномалії класу III найкраще проявляються на сейсмічних даних і часто є найбільш надійними індикаторами наявності газу в піщаних колекторах[4].

Кожну пару сейсмічних атрибутів AVO-аналізу можна представити у формі кросплота. Відбиття від підшви колектора у випадку зростання модуля пружності зміщуються в бік збільшення G і R_0 на величину, яка пропорційна збільшенню модуля пружності при водонасиченні, коли відбувається заміщення води нафтою і викликає значно менше спадання модуля пружності, ніж заміщення газом (рисунок 1.3).

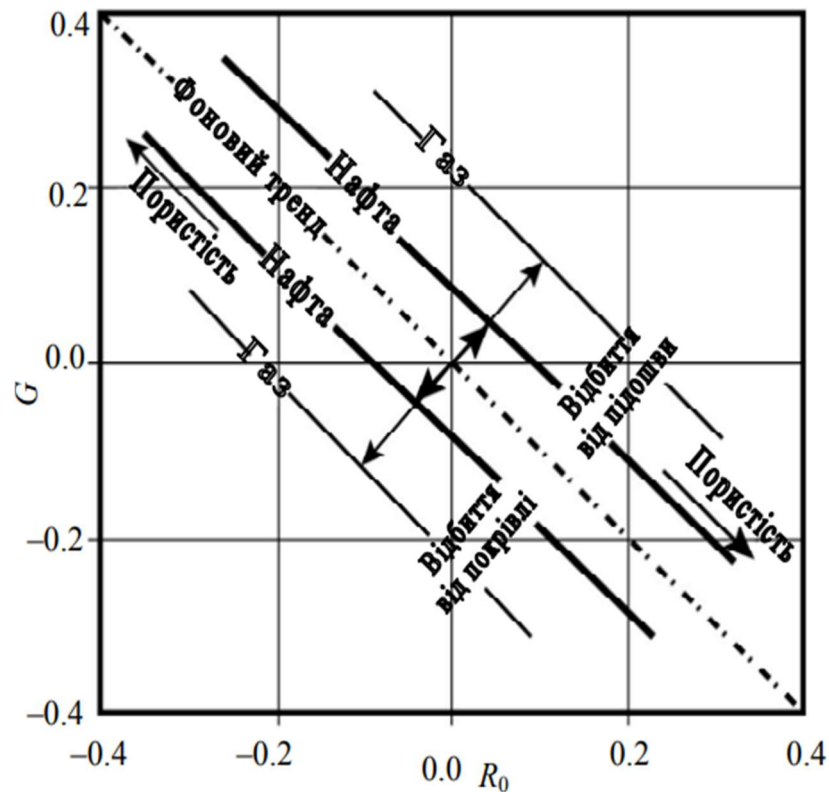


Рисунок 1.3 - Вплив ефекту зменшення акустичної жорсткості породи-колектора на атрибути R_0 і G (стрілками показано флюїдні вектори) [2]

1.4 Класифікація AVO-аномалій

Щоб було простіше аналізувати результати AVO-аналізу, всі можливі варіанти зміни амплітуди з кутом умовно поділили на кілька типів. Така класифікація допомагає швидше зрозуміти, з чим ми маємо справу – наприклад, це може бути газонасичений колектор або просто зміна літології. Суть у тому, що при різних геологічних умовах амплітуда відбитої хвилі поводить по-різному. В одних випадках вона зменшується з відстанню, в інших – навпаки зростає, або навіть змінює знак. Саме ці відмінності і лягли в основу поділу на класи (рисунок 1.4) [2].

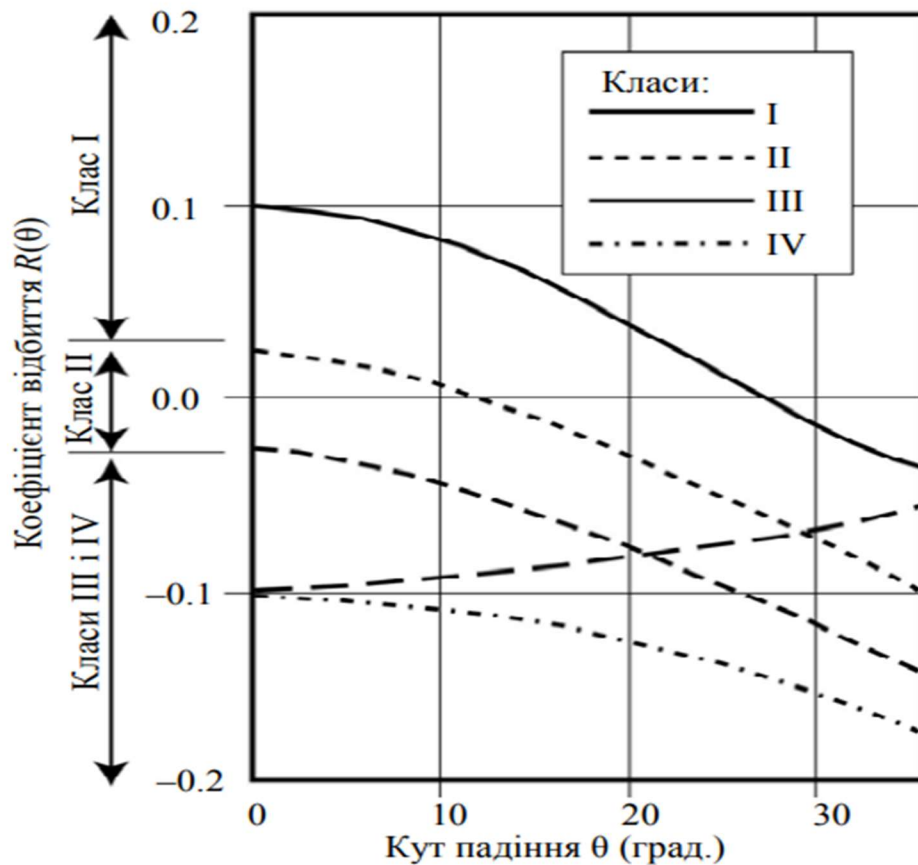


Рисунок 1.4 – Коефіцієнти відбиття плоских хвиль від покрівлі газонасиченого піщаного колектора залежно від співвідношення акустичних імпедансів колектора і глинистої покрівлі та класифікація AVO-аномалій [2]

Перший тип зазвичай спостерігається в більш глибоких і щільних породах. Тут амплітуда спочатку досить велика, але зі збільшенням кута поступово зменшується.

Другий тип є більш “перехідним” — на малих кутах сигнал слабкий, а далі може змінювати свій характер, тому його складніше інтерпретувати однозначно.

Третій тип вважається одним із найважливіших, особливо при пошуках газу. У цьому випадку амплітуда з відстанню не зменшується, а навпаки стає більш вираженою. Саме така поведінка часто пов’язана з газонасиченими пісками, тому на неї звертають особливу увагу.[2]

Четвертий тип зустрічається рідше і виглядає трохи інакше: при малих кутах амплітуда може бути додатною, але далі вона зменшується.

Варто розуміти, що така класифікація є досить умовною. На практиці на форму AVO-відгуку впливає багато факторів: склад порід, їх структура, глибина залягання та інші особливості середовища. Тому робити висновки лише на основі одного типу аномалії не зовсім правильно. Зазвичай AVO-аналіз використовують разом з іншими методами, наприклад, з даними геофізичних досліджень свердловин або результатами інверсії. Це дозволяє отримати більш надійну і повну картину для нас як для геофізиків.[2]

Також існує розділення на чотири класи, які тяжіють до різних ділянок на кросплоті (рисунок 1.5). Виділені класи наведено в таблиці 1.1.

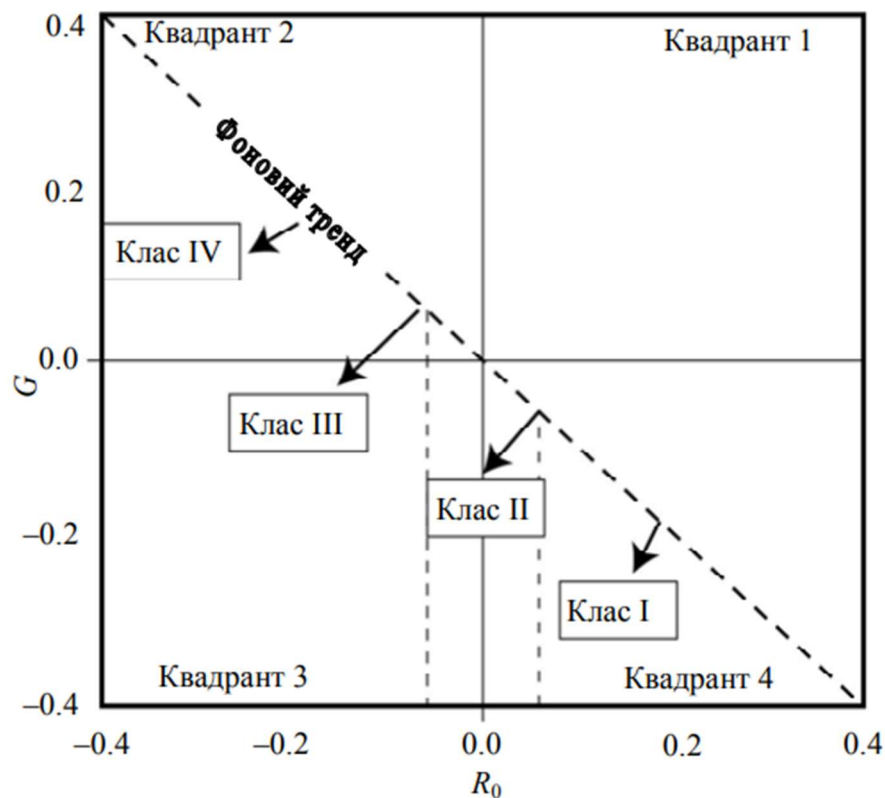


Рисунок 1.5 – Класифікація аномалій, обумовлених зменшенням акустичної жорсткості породи-колектора при відбитті хвилі від його покрівлі (стрілками показано флюїдні вектори) [2]

Таблиця 1.1 Зміна ключових параметрів при 4-ступеневій AVO-класифікації

Клас	Акустичний імпеданс	Квадрант кросплота	A_0	G	Характер зміни амплітуди відбиття при зміні кута θ
I	Вищий, ніж у покрівлі пласта	4	+	-	Зменшується
II	Приблизно такий самий, як і у покрівлі	2,3 і 4	+/-	-	Зменшується/ зростає, може змінювати знак
III	Нижчий, ніж у покрівлі	3	-	-	Зростає
IV	Нижчий, ніж у покрівлі	2	-	+	Зменшується

Висновки по розділу 1:

У першому розділі було розглянуто теоретичні та методичні основи AVO-аналізу як одного з важливих методів динамічної інтерпретації сейсмічних даних. Встановлено, що на відміну від звичайної структурної інтерпретації, яка переважно описує геометрію відбивних горизонтів, AVO-аналіз дає можливість оцінювати зміну амплітуди відбитої хвилі залежно від відстані між джерелом і приймачем або кута падіння хвилі.

Показано, що фізичною основою AVO-аналізу є залежність коефіцієнта відбиття від пружних властивостей середовища.

Розглянуто пряму задачу AVO-аналізу, яка полягає у моделюванні

очікуваної зміни амплітуди відбитої хвилі за відомими фізичними параметрами геологічного середовища. Такий підхід є важливим для подальшого порівняння модельних результатів із реальними сейсмічними даними та для перевірки можливих геологічних інтерпретацій

Визначено основні AVO-атрибути, серед яких найбільше практичне значення мають інтерцепт, градієнт, їх добуток, різницеві атрибути та флюїдні параметри.

Таким чином, AVO-аналіз є ефективним інструментом для підвищення достовірності пошуків газових покладів, однак його результати повинні розглядатися в комплексі з іншими методами. Теоретичні положення, розглянуті в першому розділі, є основою для подальшого аналізу сучасних технологій комп'ютерного моделювання, інтеграції даних та практичного застосування AVO-атрибутів у нафтогазовій геофізиці.

2 ПЕТРОФІЗИЧНІ ОСНОВИ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ AVO-АНОМАЛІЙ

2.1 Інтеграція AVO-аналізу з геофізичними та петрофізичними даними

AVO-аналіз не можна розглядати як повністю самостійний метод, який сам по собі дає остаточну відповідь щодо наявності газового покладу. Його ефективність різко зростає тоді, коли результати AVO зіставляються з іншими даними: матеріалами геофізичних досліджень свердловин, результатами сейсмічної інверсії, літолого-стратиграфічною інформацією, даними буріння та петрофізичними моделями.[2]

Основна причина такої необхідності полягає в неоднозначності сейсмічного сигналу. Подібна зміна амплітуди з офсетом може виникати як через газонасичення, так і через зміну літології, ущільнення порід, тріщинуватість, тонкошаруватість або помилки обробки. Тому сучасна інтерпретація AVO-атрибутів має бути комплексною.

Найбільш важливими джерелами додаткової інформації є свердловинні дані. До них належать акустичний каротаж, густинний каротаж, нейтронний каротаж, гамма-каротаж, електричні методи, дані випробування пластів і результати вивчення керна. Саме свердловинні дані дають змогу прив'язати сейсмічну аномалію до реальних властивостей порід.[10]

Наприклад, якщо на сейсмічному розрізі спостерігається зона з AVO-аномалією класу III, це може бути ознакою газонасиченого піщаного колектора. Але для підтвердження потрібно перевірити, чи відповідає ця зона піщаній літології, чи має пласт достатню пористість, чи спостерігається підвищений електричний опір, а також чи зменшується співвідношення V_p/V_s . Без такої перевірки висновки про газонасичення буде попереднім.[2]

Важливим інструментом інтеграції є сейсмічна інверсія. Її завдання полягає у перетворенні сейсмічного хвильового поля у кількісні параметри

середовища. У класичному варіанті інверсія дозволяє отримати акустичний імпеданс, а при використанні передстекової інверсії – також S-імпеданс, густину, співвідношення V_p/V_s , λ_r , μ_r та інші пружно-петрофізичні параметри.[2, 13]

У сучасних дослідженнях передстекова інверсія часто використовується разом із AVO-атрибути для розділення газонасичених і водонасичених пісковиків.

Для практичного AVO-аналізу часто застосовують такі інтегровані параметри:

1. Акустичний імпеданс.

Він визначається як добуток швидкості поздовжньої хвилі на густину. Різне зменшення акустичного імпедансу може бути пов'язане з менш щільним або газонасиченим колектором.[2]

2. S-імпеданс.

Цей параметр краще відображає скелет породи, тому його використовують для розділення літологічного і флюїдного ефектів.[16]

3. Співвідношення V_p/V_s .

Для газонасичених пластів воно часто зменшується, тому є важливим індикатором флюїдонасичення.[2]

4. λ_r та μ_r .

Параметр λ_r більш чутливий до флюїду, а μ_r — до жорсткості скелета породи. Їх спільний аналіз допомагає розрізняти газонасичені піски, водонасичені піски та глинисті породи.[11]

5. Флюїдний фактор

Флюїдний фактор використовується для виділення відхилень від нормального тренду водонасичених порід. У джерелі [2] зазначається, що при розрахунку таких атрибутів важливим є вибір коефіцієнтів і трендів для водонасичених піщано-глинистих порід, оскільки саме вони впливають на інтерпретацію флюїдного фактора.

У практиці інтерпретації AVO-результати часто подають у вигляді

кросплогів. Наприклад, використовують графік “інтерцепт-градієнт”, “акустичний імпеданс- V_p/V_s ”, “ $\lambda\rho$ - $\mu\rho$ ”. На таких графіках різні типи порід і різні варіанти насичення можуть утворювати окремі області. Якщо газонасичені пісковики мають достатньо відмінні пружні властивості, вони можуть бути виділені як окрема група точок.[2, 9]

Проте тут є важливе обмеження. Якщо різниця між газонасиченим і водонасиченим колектором мала, або якщо дані мають низьке співвідношення сигнал/шум, кросплог може бути нечітким. У такому випадку інтерпретатор повинен використовувати не один атрибут, а сукупність ознак.[2]

Таким чином, сучасний AVO-аналіз є частиною комплексної геофізичної інтерпретації. Він дає найкращі результати тоді, коли його поєднують із сейсмічною інверсією, свердловинними даними, петрофізичним моделюванням і геологічною інформацією. Саме такий підхід дозволяє підвищити достовірність прогнозу газових покладів.

2.3 Прогноз літології та фільтраційно-ємнісних параметрів колекторів

Визначення величини V_p/V_s для порід різної літології є надзвичайно важливим завдяки тому, що саме відхилення експериментальних сейсмічних даних від встановлених літологічних "фонових" відношень і допомагають при прогнозуванні покладів вуглеводнів сейсмічними методами. Узагальнення числових результатів вимірювань швидкостей V_p і V_s сейсмічними методами, методами акустичного каротажу і лабораторними методами свідчить про те, що для різних літологічних різниць V_s майже лінійно пов'язана з V_p зоні швидкостей. На рисунку 2.1 зображено діаграму залежності між швидкістю V_p і V_s за даними акустичного каротажу для аргіліто-глинистих і карбонатних порід. Дані для чистих вапняків розміщені

дуже близько до лінії вапняків, а дані для пісковиків і глинистих сланців поблизу аргіліто-глинистої лінії. Водночас доломіти й породи зі змішаною літологією займають проміжне положення між лініями вапняків і аргіліто-глинистих порід. Як видно з рисунку 2.1, при високих значеннях V_p породи різної літології краще розрізняють за величиною V_p/V_s . Водночас у цій області можуть виникнути труднощі при розрізненні високошвидкісних глинистих сланців і вапняків. У породах із високими швидкостями різниця V_p/V_s між газо- і водонасиченими породами дуже мала. Для порід із низькою швидкістю V_p різниця між газо- і водонасиченими породами буде відносно більшою. Тому дослідження AVO даватимуть кращі результати в розрізах із низькою швидкістю. [2].

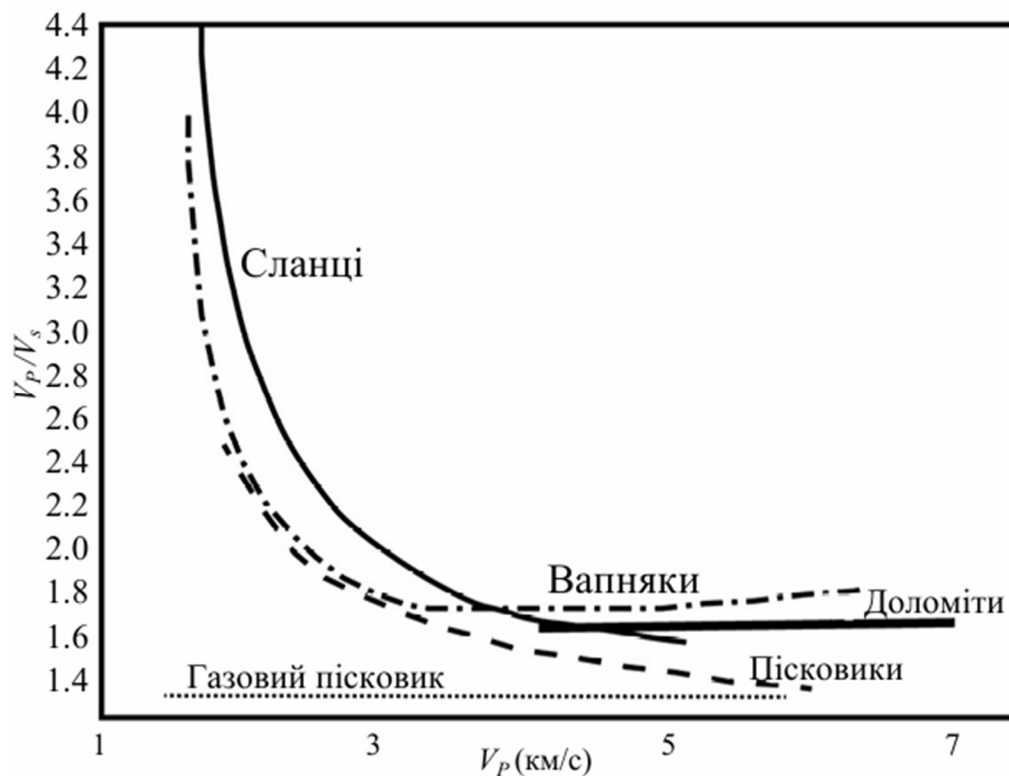


Рисунок 2.1 – Залежність V_p/V_s від V_p для порід різної літології

Прогноз пористості, проникності і характеру насичення – це те, що в кінцевому підсумку цікавить геофізика: чи є в пласті газ і скільки його там.

Найбільш характерна сейсмічна ознака газових пісковиків – AVO-аномалія класу III: від'ємний інтерцепт і від'ємний градієнт, тобто амплітуда на дальніх офсетах зростає за абсолютною величиною.

Проте тут є важливе застереження. Яскрава амплітудна аномалія – ще не гарантія газу. Вугілля, вулканічні тіла, ущільнені карбонати, різкі зміни літології — все це може давати схожий ефект. Тому кожну виявлену AVO-аномалію перевіряють за кількома незалежними критеріями. Один з таких критеріїв – поведінка V_p/V_s . Для газу це відношення зменшується значно помітніше ніж для нафти чи води. Структурна карта показує, де є підняття, але AVO-аналіз у поєднанні з інверсією може дати відповідь на питання: що там всередині? Якщо зниження V_p/V_s підтверджується і за AVO-атрибутами, і за каротажними даними у свердловині — це суттєво посилює інтерпретацію. Якщо ж аномалія є, а V_p/V_s не реагує — варто шукати інше пояснення [2, 10].

При збільшенні пористості швидкості P- і S-хвиль зменшуються. Найчастіше при вивченні залежності між швидкістю P коефіцієнтом пористості pV і K користуються добре відомим емпіричним рівнянням Віллі – Трегорі або "рівнянням середнього часу", яке використовують під час аналізу даних акустичного каротажу для визначення коефіцієнта пористості.

Це рівняння не має ніякого фізичного обґрунтування і його простота та надійність при дослідженні грануляційних порід-колекторів сприяла його широкому застосуванню.

Рівняння має такий вигляд

$$\frac{1}{V_p} = \frac{(1 - K_p)}{V_t} + \frac{K_p}{K_\phi},$$

де V_t , V_ϕ – швидкості поздовжніх хвиль відповідно у твердому скелеті і флюїді; K_p – коефіцієнт пористості породи.

Зв'язок між пружними властивостями породи і її фільтраційно-

ємнісними параметрами не є простим. Пористість, проникність, глинистість, ступінь ущільнення, тип цементу – все це впливає на швидкості V_p і V_s та на густину. Причому різні чинники можуть давати схожий ефект на сейсмічному записі, що і ускладнює інтерпретацію.[2,11]

Комплексна інтерпретація сейсмічних даних та петрофізичних параметрів дозволяє більш надійно оцінювати колекторські властивості порід і прогнозувати можливе газонасичення [7].

А для газових колекторів найбільш характерне зниження швидкості поздовжньої хвилі. Газ – один із найбільш «помітних» флюїдів з точки зору AVO. Він сильно знижує швидкість V_p , майже не впливає на V_s , і тому різко змінює співвідношення пружних характеристик. Саме ця чутливість і робить AVO-аналіз особливо корисним при пошуках газових покладів.[2, 9]

Газ у порох помітно зменшує стисливий модуль породи, тому V_p падає, акустичний імпеданс знижується, а V_p/V_s зменшується. Поперечна хвиля при цьому майже не реагує на флюїд – вона залежить переважно від жорсткості скелета. Саме ця різниця і лежить в основі флюїдного аналізу.[2, 9]

Один із найпростіших кількісних підходів – карти акустичного імпедансу з постстекової інверсії. Зони зниженого імпедансу можуть бути пов'язані або з менш ущільненими породами, або з газоносними колекторами. [10]

Передстекова інверсія дає значно детальнішу картину. Вона дозволяє отримати не тільки P-імпеданс, але й S-імпеданс, V_p/V_s , λ_p і μ_p . Якщо P-імпеданс знижений, а S-імпеданс залишається стабільним – це сильний аргумент на користь флюїдного ефекту, а не просто зміни літології.[16]

Останніми роками суттєво розширилось використання машинного навчання для прогнозу колекторських властивостей. Нейронні мережі здатні обробляти великі набори атрибутів і знаходити між ними складні залежності. Ансамблі нейронних мереж дозволяють не тільки прогнозувати пористість, але й оцінювати невизначеність цього прогнозу – що в геологічних задачах є принципово важливим.[14]

Проте є принципове обмеження: AVO-аномалія не є прямим вимірюванням пористості чи насичення. Це непряма ознака, яку потрібно інтерпретувати з урахуванням геологічного контексту і свердловинних матеріалів. Без цього кількісний прогноз залишатиметься занадто невизначеним.[2, 11]

На рисунку 2.2 показано залежність швидкості поздовжніх хвиль від коефіцієнта водонасичення для нафто- і газонасичених пісків на різних глибинах.

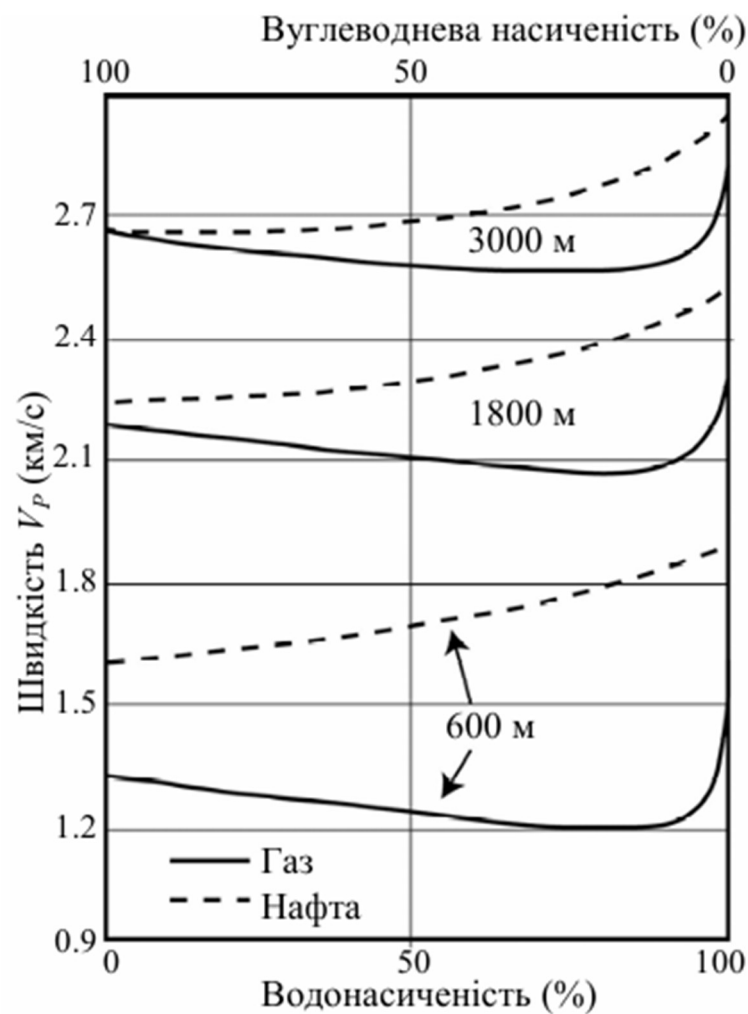


Рисунок 2.2 – Залежність швидкості поздовжніх хвиль від коефіцієнта водонасичення для нафто- і газонасичених пісків на різних глибинах

2.3 Методологія оцінювання достовірності результатів інтерпретації AVO-аналізу

Наскільки можна довіряти виявленій аномалії – це питання, яке при AVO-аналізі треба ставити постійно. Аномалія може бути реальною ознакою газоносності, артефактом обробки, літологічною зміною або ефектом тонкого пласта. Розрізнити ці варіанти – головне завдання при оцінці достовірності.[2]

Якість вихідних сейсмічних даних – перший і найважливіший фактор. Якщо при обробці амплітуди відкоректовані недбало або кратні хвилі не придушені – результати AVO-аналізу будуть спотворені. Залишкові кінематичні зсуви особливо небезпечні: вони можуть імітувати AVO-ефект там, де його насправді немає.[2]

Принципово важливим є збереження амплітуд. Для AVO не можна застосовувати інтенсивне автоматичне регулювання підсилення або агресивне вирівнювання – ці процедури знищують саме ту інформацію, яка потрібна для аналізу залежності від кута.[2]

У методах AVO-аналізу й інверсії надзвичайно важливим є оцінювання точності і достовірності результатів інтерпретації. Формально процес інтерпретації включає два етапи: 1) власне інверсію, тобто перетворення сейсмічних записів в оцінки сейсмічних властивостей геологічного середовища; 2) перехід за допомогою апарата кросплатів і нейронних мереж до геологічних категорій – літології, характеру насичення, пористості, ефективної потужності тощо. Рівень формалізації цих двох етапів значно відрізняється, а кількість сейсмічних і геологічних параметрів дуже велика і не чітко визначена; як сейсмічні, так і геологічні параметри сильно корелюють між собою. Крім того, відносні похибки сейсмічних і геологічних параметрів на порядок вищі за оцінки кінематичних параметрів, які використовуються при структурних побудовах. Формально в AVO аналізі апріорне оцінювання достовірності амплітудної інверсії та результатів

геологічної інтерпретації реалізується у двох варіантах [2].

Перший зводиться до оцінювання коефіцієнта кореляції між тією чи іншою парою параметрів безпосередньо за їхніми кросплотами. Зрозуміло, що коефіцієнти кореляції дають точну міру ступеня зв'язку між параметрами та довірчі інтервали. Не з'ясовано лише, які саме чинники спричиняють розкид точок: 1) об'єктивні варіації цільового параметра – пористості або ступеня доломітизації або ефективної потужності; 2) похибка оцінок імпедансу. Очевидно, що певною мірою такі оцінки характеризують достовірність побудованої моделі, але питання про можливі шляхи її покращення є відкритим. Зокрема, модель можна покращити подальшим фаціальним розмежуванням або використанням інших наборів сейсмічних параметрів [2].

Другий варіант значно інформативніший і базується на виборі детерміністичної ефективної моделі геологічного середовища і цілеспрямованому дослідженні реакції акустичної та пружної інверсій. Це дослідження виконують варіацією параметрів і пружної інверсії, підбираючи варіанти параметрів апріорної моделі. Такий підхід включає п'ять послідовних процедур:

1. Побудову апріорної ефективної сейсмоакустичної моделі для типового розрізу цільового інтервалу з відомою літологією і даними акустичного каротажу; вибір детермінованої ефективної моделі геологічного середовища; підбір числових значень пружних модулів цих моделей, які задовольняють ефективну сейсмоакустичну модель розрізу.

2. Збурення геологічних параметрів апріорної ефективної сейсмоакустичної моделі (зміна літології, пористості, флюїдонасичення тощо) у діапазоні, який очікується на території досліджень.

3. Побудова синтетичних сейсмограм для серії збурених кривих імпедансів сейсмоакустичної моделі; обробка синтетичних даних за тими самими технологіями, яка застосовується до реальних даних.

4. Статистичний аналіз одержаних результатів (математичні

сподівання, дисперсія) із метою оцінювання відхилень одержаних оцінок від відповідних значень збуреної ефективної сейсмоакустичної моделі. Одержані характеристики і є кількісними оцінками ступеня достовірності отриманих результатів, тобто варіацій геологічних параметрів.

5. Обробка реальних даних й оцінювання з використанням кросплатів коефіцієнтів кореляції в межах виділених сейсмофацій, певного насичення, пористості відображають впливи випадкових похибок сейсміки. Результати пунктів 4 і 5 спільно характеризують ступінь невизначеності геологічної інтерпретації результатів [2].

Для оцінки достовірності застосовуються кросплоти атрибутів. Якщо на графіках «інтерцепт-градієнт» або « $\lambda\rho$ - $\mu\rho$ » точки продуктивного горизонту утворюють окрему групу – це підвищує довіру до результату. Якщо вони розмиті і перекриваються з іншими зонами – інтерпретація стає неоднозначною.[11, 12]

Сучасна тенденція – оцінювати не тільки сам прогноз, але і його невизначеність. Байєсівська інверсія замість одного «найкращого» рішення дає набір можливих моделей середовища, що дозволяє оцінити діапазон можливих значень пружних параметрів.

Найбільш надійна перевірка результатів AVO-аналізу – це зіставлення з даними пробуреної свердловини: якщо аномалія підтверджується каротажем і результатами випробування вважаємо, що метод спрацював.[10,11]

2.4 Сучасний стан застосування AVO-аналізу при дослідженні газових покладів

За останні роки AVO-аналіз помітно розвинувся та став більш комплексним методом інтерпретації сейсмічних даних. Якщо раніше основну увагу приділяли побудові кутових сум, розрахунку інтерцепта та градієнта і

візуальному аналізу кросплотів, то зараз усе частіше використовують передстекову інверсію та комплексний аналіз сейсмічних атрибутів [14, 16].

Одним із головних напрямів розвитку є поєднання AVO-аналізу з даними геофізичних досліджень свердловин та петрофізичними дослідженнями. Такий підхід дає більш точно прогнозувати властивості колекторів і зменшувати ризик помилкової інтерпретації [2, 8].

У сучасній практиці AVO-аналіз рідко застосовується окремо. Найчастіше його використовують разом із передстековою інверсією, яка дає отримувати параметри акустичного імпедансу, густини та співвідношення V_p/V_s [16]. Це допомагає краще оцінювати можливе газонасичення колекторів.

Важливе значення має також пружний імпеданс. Цей метод дозволяє більш детально аналізувати зміну пружних властивостей порід при різних кутах падіння хвиль і краще виявляти AVO-аномалії [14].

Інтеграція AVO-аналізу з даними ГДС використовується для побудови шаблону, який показує зміну пружних параметрів порід залежно від пористості, літології та насичення. Це дозволяє не лише виявити аномалію, а й пояснити її фізичну природу [9, 14, 16].

У сучасних дослідженнях AVO-аналіз часто поєднують з імпедансною інверсією та аналізом параметрів $\lambda\rho$ і $\mu\rho$. Такий підхід допомагає більш надійно розділяти газонасичені та водонасичені колектори [3, 9, 15].

Для перевірки достовірності результатів AVO-аналізу проводять зіставлення атрибутів із даними каротажу, синтетичними сейсмограмами та результатами інверсії. Важливе значення також має якість вихідних сейсмічних даних і правильне збереження амплітуд під час обробки [2, 8].

Таким чином, сучасний AVO-аналіз є ефективним методом прогнозу газонасичених колекторів. Найкращі результати досягаються при комплексному використанні AVO-атрибутів, інверсії, петрофізичних досліджень та даних ГДС.

2.5 Перспективи розвитку AVO-аналізу

Подальший розвиток AVO-аналізу пов'язаний із кількома напрямками, які вже намітились і будуть визначати практику найближчих років.

Перший – глибша інтеграція з передстековою інверсією. AVO-атрибути все частіше будуть розглядатися не як окремі карти, а як вхідні дані для кількісної моделі колектора.[16]

Другий – фізично обмежені нейронні мережі, що поєднують гнучкість машинного навчання із законами хвильової фізики. Це особливо важливо для AVO, де результат повинен бути не тільки статистично точним, але й фізично обґрунтованим.[16]

Третій напрям – ймовірнісна оцінка невизначеності. У сучасній геофізиці вже недостатньо просто сказати, що зона «ймовірно газонасна». Потрібно показати наскільки цей прогноз надійний і які ризики залишаються.

Четвертий напрям – 4D-сейсміка. Якщо класична 3D показує просторову будову, то 4D дозволяє відстежувати зміни в часі. Для родовищ, що вже розробляються, це дає можливість контролювати рух флюїдів і залишкове газонасичення.

Для України ці напрями є особливо актуальними. Багато нафтогазонасних районів, зокрема Причорноморсько-Кримська провінція і ділянки Дніпровсько-Донецької западини, мають складну геологічну будову і неоднорідні колектори. Класична структурна інтерпретація тут часто не дає достатньої інформації, тому розвиток методів динамічної інтерпретації, зокрема AVO-аналізу, є перспективним напрямом підвищення ефективності пошуків.[11]

Разом з тим слід враховувати і обмеження: для якісного AVO потрібні хороші сейсмічні дані, надійна швидкісна модель і свердловинна інформація. Без цього навіть найсучасніші алгоритми можуть дати хибний результат.[10]

Висновки до розділу 2

У другому розділі розглянуто сучасний стан використання комп'ютерного моделювання, інтеграційних підходів та інноваційних технологій в AVO-аналізі при пошуках газових покладів.

AVO-аналіз у сучасній сейсморозвідці вже не є ізольованим методом. Його ефективність значно підвищується при поєднанні з математичним моделюванням, петрофізичним аналізом, даними геофізичних досліджень свердловин та сейсмічною інверсією. Комп'ютерне моделювання дозволяє перевіряти різні варіанти геологічної будови та флюїдонасичення ще до остаточної інтерпретації реальних сейсмічних даних.

Особливо важливим є використання пружно-акустичних моделей, які враховують швидкості V_p і V_s , густину, акустичний імпеданс, V_p/V_s , $\lambda\rho$, $\mu\rho$ та інші параметри. Саме ці характеристики дають можливість відрізнити флюїдний ефект від літологічного.

За останні п'ять років AVO-аналіз став більш цифровим і комплексним. Значного поширення набули передстекова інверсія, машинне навчання, фізично обмежені нейронні мережі, хмарні обчислення, автоматична класифікація AVO-аномалій та ймовірнісна оцінка результатів. Це дозволяє швидше обробляти великі обсяги сейсмічної інформації та підвищувати достовірність прогнозу..

Головною перевагою сучасного AVO-аналізу є можливість перейти від якісного опису амплітуд до кількісної оцінки властивостей геологічного середовища. Головним обмеженням залишається залежність результатів від якості вихідних сейсмічних даних, правильності обробки, наявності свердловинної прив'язки та обґрунтованості петрофізичної моделі.

Таким чином, використання комп'ютерного моделювання, інтеграції даних та інноваційних технологій робить AVO-аналіз одним із важливих інструментів сучасного прогнозу газових покладів. Найбільшу ефективність він має не як окремий метод, а як частина комплексної системи геофізичної інтерпретації.

3 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ AVO-АНАЛІЗУ ПРИ ПОШУКАХ ГАЗОВИХ ПОКЛАДІВ НА РОДОВИЩІ СУББОТІНА

3.1 Геологічна характеристика родовища Субботіна

Родовище Субботіна розташоване в північно-західній частині шельфової зони Чорного моря (рисунок 3.1) та є одним із значущих газових об'єктів Причорноморсько-Кримської нафтогазоносної провінції. Геологічна позиція родовища визначається його приналежністю до структур шельфу, де зосереджена значна частина розвіданих газових ресурсів України. [2]



Рисунок 3.1 – Оглядова схема району досліджень [1, 2]

Площа характеризується відносно спокійним заляганням осадових порід при загальному похиленні шарів у бік глибоководної частини моря. Покриваючі відклади представлені переважно морськими та дельтовими утвореннями різного стратиграфічного діапазону. Ці особливості геологічної будови створюють умови, сприятливі для формування пасток структурно-стратиграфічного типу, в яких можливе накопичення вуглеводнів. [2,11]

Його глибина змінюється від 20 до 200 м, у межах структури Субботіна – від 40 до 50 м. Структуру Субботіна виявлено в 1976 році сейсморозвідкою методом спільної серединної точки (МССТ) і підготовлено до глибокого буріння у 2002 році.

У процесі геологічних досліджень вивчено палеоценовий, еоценовий, майкопський і середньоміоценовопліоценовий нафтогазоносні комплекси. Сейсмічні дослідження на прикерченському шельфі ведуть з 1957 року.

Геологічне вивчення родовища здійснювалося поетапно. На першому етапі проводилися регіональні геофізичні дослідження, спрямовані на з'ясування загальної будови осадового чохла та виявлення перспективних структур. На наступних етапах виконувалися детальні сейсмічні роботи методом відбитих хвиль (МВХ), а також морська сейсморозвідка 3D, яка дала змогу отримати об'ємну модель геологічного середовища. [2, 11]

Промислова газонасність родовища пов'язана з відкладами пліоценового і міоценового віку, зокрема з піщаними пластами продуктивної товщі. Покриваючими відкладами слугують глинисті утворення, що формують регіональний флюїдоупор. Відсутність у перекривних шарах значних фільтраційних вікон є необхідною умовою збереження покладу. [2]

3.1.1 Літолого-стратиграфічна характеристика родовища

Розріз осадового чохла родовища Субботіна включає відклади від палеогену до сучасного четвертинного комплексу. Нижня частина розрізу представлена більш давніми морськими та прибережно-морськими відкладами, які формувалися в умовах трансгресивних і регресивних циклів.

Верхня частина розрізу – переважно пліоценовими і пліоценово-четвертинними відкладами, серед яких виділяються піщані горизонти, що становлять геологічний інтерес як потенційні колектори (рисунок 3.2) [2]

Міоценові відклади на площі родовища представлені чергуванням глин, алевролітів і дрібнозернистих пісковиків. Цей комплекс формувався в умовах мілководного моря з циклічними змінами гідродинамічного режиму. Піщані прошарки міоценового комплексу мають обмежену регіональну витриманість і порівняно невелику товщину. [2, 11]

Пліоценовий розріз є найбільш продуктивним і краще вивченим. Він включає кілька стратиграфічних горизонтів, серед яких виокремлюються піщані пласти з підвищеними колекторськими властивостями. Ці пласти залягають у межах потужного глинисто-аргілітового комплексу, що забезпечує надійну ізоляцію покладів. Їх пористість за даними кернових досліджень та геофізичних методів становить орієнтовно 18–28%, а проникність – від декількох до кількох сотень мілідарсі. [2]

Четвертинні відклади на площі родовища представлені морськими мулами та глинами. Вони відіграють роль водопору для верхньої частини розрізу і суттєво не впливають на нафтогазоносний потенціал площі. Разом з тим четвертинні відклади несуть інформацію про сучасний режим осадконакопичення та можуть бути орієнтиром при інтерпретації сейсмічних горизонтів. [11]

Важливою особливістю літологічного розрізу є наявність маркувальних горизонтів – відносно витриманих у просторі відбивачів, які добре простежуються на сейсмічних розрізах. Ці горизонти є опорними при побудові геологічної моделі та прив'язці сейсмічних даних до свердловинної інформації. [2]

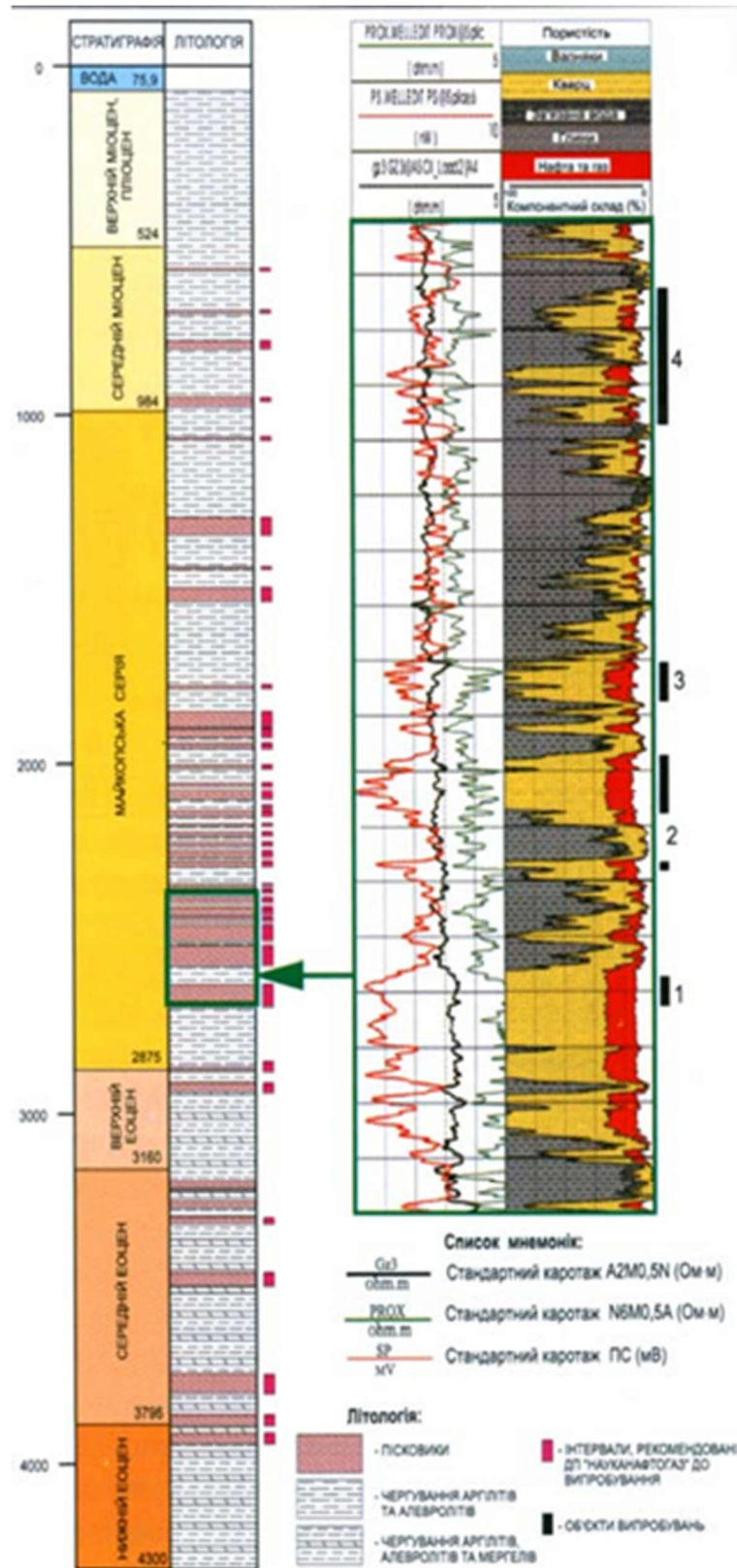


Рисунок 3.2 – Літостратиграфічний розріз свердловини Субботіна № 403 та геолого-геофізична характеристика продуктивної частини

3.1.2 Тектонічна будова площі

У тектонічному відношенні площа родовища Субботіна розташована в межах шельфової платформеної зони, яка відповідає продовженню Скіфської плити у напрямку Чорноморської западини.

Основні тектонічні елементи площі – підняття структурного плану, що утворилися внаслідок блокових переміщень фундаменту та диференційованих тектонічних рухів в осадовому чохлах. [2,11]

Головна газonosна структура на площі є антиклінальним підняттям, витягнутим у субширотному напрямку. Його розміри в плані — кілька кілометрів за довгою і кілька кілометрів за короткою осями. Амплітуда підняття за різними відбивальними горизонтами становить десятки метрів. Такі характеристики є типовими для родовищ шельфового типу (рисунок 3.3) [2].

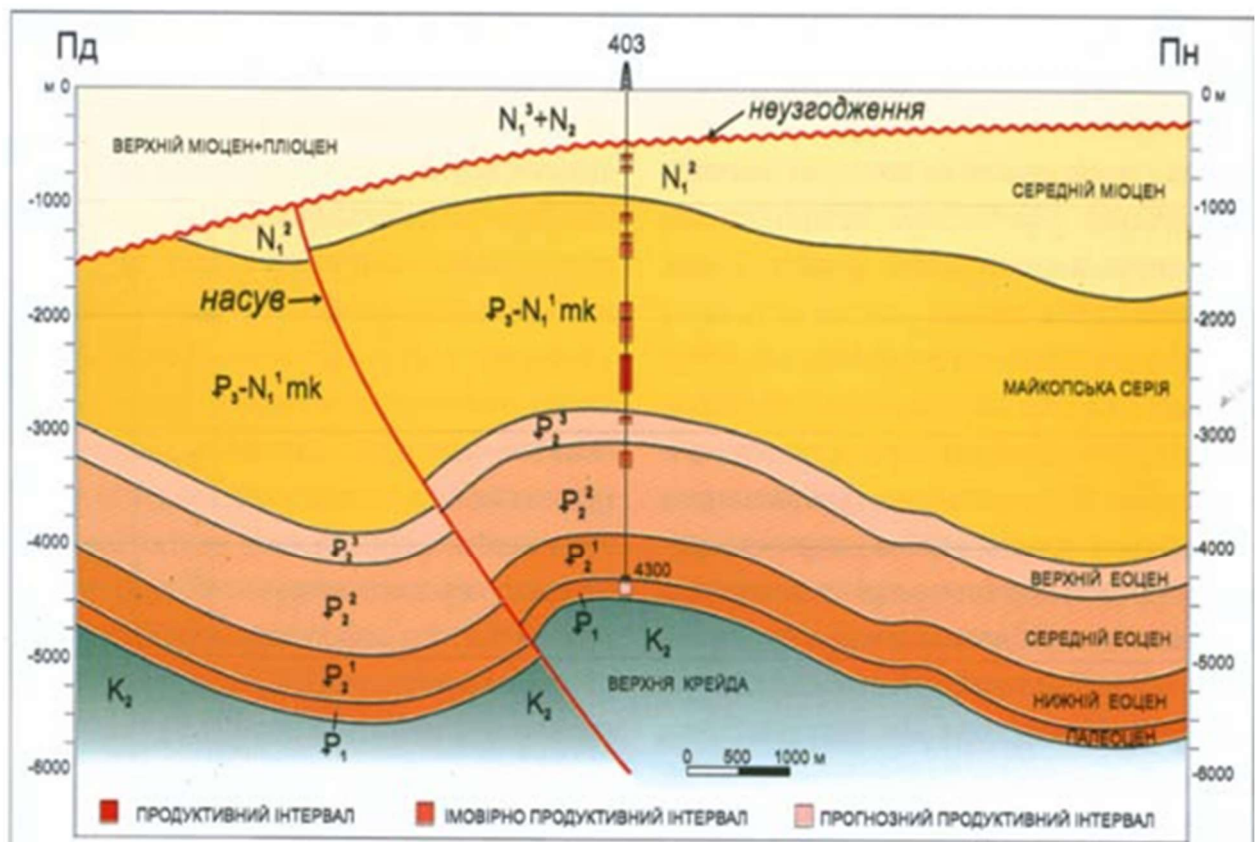


Рисунок 3.3 - Сейсмогеологічний розріз структури Субботіна по профілю 1

Тектонічна порушеність площі є помірною. На сейсмічних розрізах простежуються окремі розривні порушення переважно скидового типу, амплітуда яких не перевищує кількох десятків метрів. Ці порушення можуть мати значення для перерозподілу флюїдів у пастці, але в цілому не руйнують структурного контуру покладу. [2][11]

Особливістю тектонічної будови є також наявність зон суброзломної тріщинуватості, які фіксуються за характерними аномаліями когерентності та інших сейсмічних атрибутів. Ці зони слід враховувати при плануванні сейсмічних робіт і розміщенні видобувних свердловин. [2]

3.2 Результати обробки та інтерпретації даних морської сейсморозвідки

Геофізичне вивчення площі родовища Субботіна базується на матеріалах морської сейсморозвідки методом загального середнього відбивного пункту (ЗСВП). Польові роботи виконувалися за стандартною для морських умов технологією із застосуванням пневматичних джерел пружних хвиль і стрімерних приймальних систем. Кратність накопичення в отриманих матеріалах забезпечувала достатнє пригнічення кратних хвиль і підвищення відношення сигнал/шум. [2]

Обробка сейсмічних даних виконувалася за стандартним технологічним ланцюгом. Ключовими етапами були: попередня фільтрація, корекція статичних поправок, аналіз і корекція нормального кінематичного введення (NMO), редагування трас із видаленням шумових записів, пригнічення кратних хвиль та міграція. Особлива увага приділялася збереженню істинних амплітуд, оскільки ця вимога є принципово важливою для подальшого AVO-аналізу. [2]

Для забезпечення якісного AVO-аналізу сейсмічні дані не підлягали сильному вирівнюванню амплітуд та автоматичному регулюванню

підсилення (АРП). Натомість застосовувалася детермінована поправка за геометричне розходження хвиль та компенсація поглинання. Такий підхід дозволяє зберегти фізичну інформацію про зміну амплітуди з офсетом, яка є основою AVO-аналізу. [2]

За результатами обробки були отримані сейсмічні розрізи з достатньою роздільною здатністю для виділення основних відбивальних горизонтів. Особливо чітко простежуються відбивачі, що відповідають покрівлі і підшві основних піщаних пластів пліоценового комплексу. Ці горизонти є опорними для структурної і динамічної інтерпретації. [2, 11]

Для цілей AVO-аналізу з повного офсетного набору були сформовані ближні, середні та дальні кутові суми. Ближня сума формується з трас, що відповідають малим кутам падіння ($0-15^\circ$), середня - проміжним кутам ($15-30^\circ$), а дальня - великим кутам ($30-45^\circ$). Порівняння амплітуд на різних кутових сумах дає первинне уявлення про характер AVO-відгуку на досліджуваних горизонтах (рисунок 3.4) [2].

Якість вихідних даних оцінювалась за кількома критеріями: збереженістю амплітуд на дальніх офсетах, відсутністю залишкових кінематичних помилок після NMO-корекції, рівнем пригнічення кратних хвиль та відношенням сигнал/шум. У більшості зон площі якість даних була визнана достатньою для проведення AVO-аналізу. Окремі ділянки з погіршеною якістю були виключені з кількісної інтерпретації. [2]

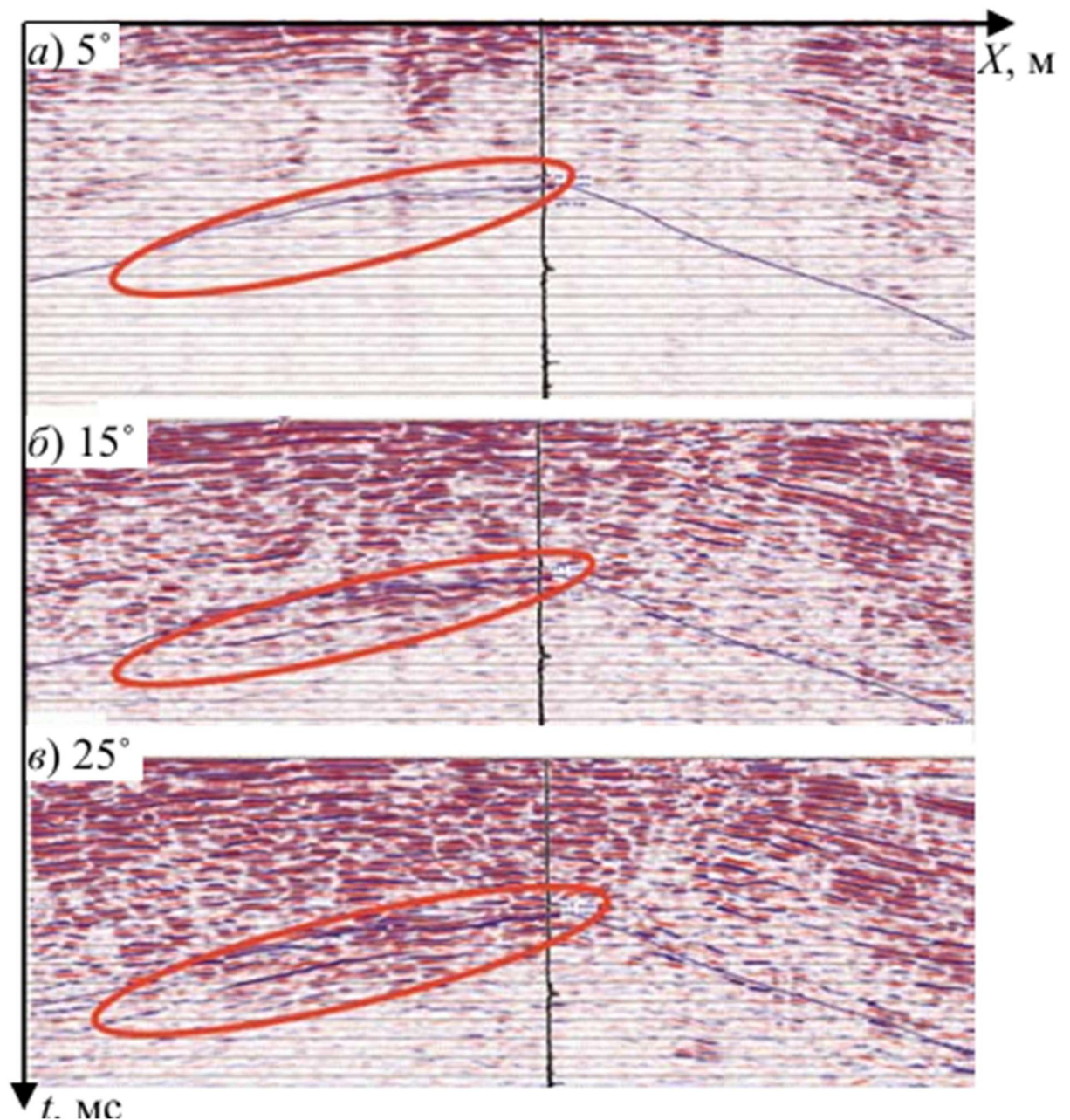


Рисунок 3.4 - Часові розрізи кутових сум уздовж профілю № 2 у діапазоні кутів падіння хвиль від 0 до 30°

3.3 Аналіз AVO-атрибутів

Центральним етапом практичного дослідження є аналіз AVO-атрибутів на площі родовища Субботіна. Для оцінювання типу флюїдонасиченості продуктивних гори зонтів майкопської товщі структури Субботіна за даними

AVO аналізу розглядалися часові розрізи добутку "інтерсепт×градієнт" та кросплоти із залученням даних свердловинних геофізичних досліджень. Фрагмент мігрованого часового розрізу за мігрованими сейсмограмами уздовж профілю № 2 показано на рисунку 3.5 [2].

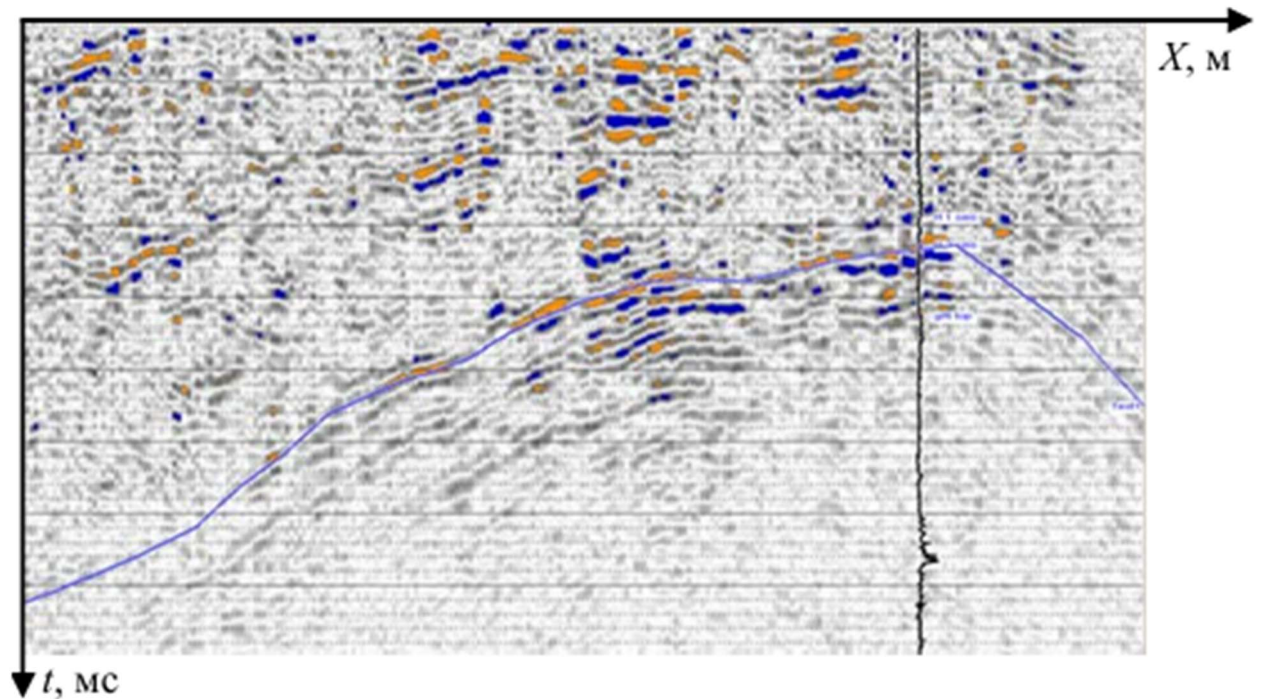


Рисунок 3.5 – Фрагмент мігрованого часового розрізу вздовж профілю № 2

На рисунках 3.6 і 3.7 окремо зображено розрізи інтерсепта A та градієнта G відповідно, а на рисунку 3.8 наведено часовий розріз добутку "інтерсепт×градієнт". Він характеризує сейсмічні хвилі з аномальними значеннями коефіцієнтів відбиття на нульовій відстані "джерело–приймач". Зростання амплітуди відбиття сейсмічної хвилі з віддаленням характеризується появою додаткового екстремуму в зареєстрованому сигналі. Зменшення абсолютної амплітуди відображається у від'ємних значеннях амплітуди на розрізі "інтерсепт×градієнт" [2].

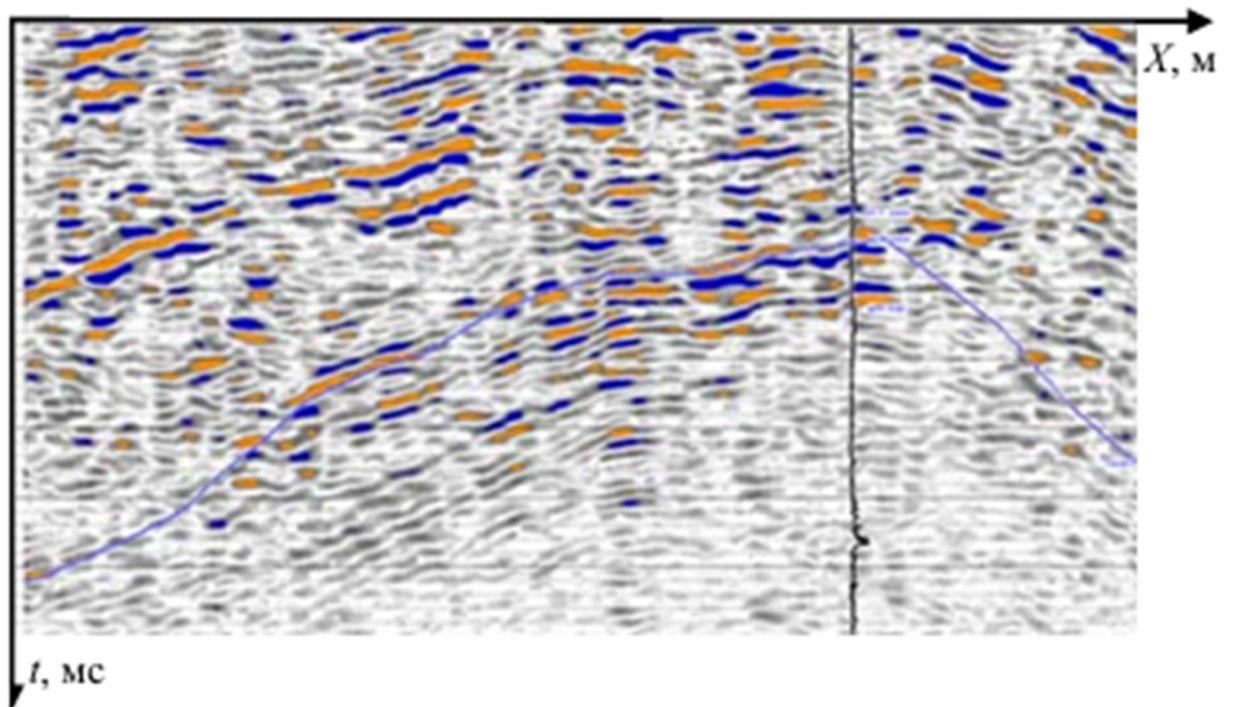


Рисунок 3.6 – Фрагмент часового розрізу інтерсепт А вздовж профілю № 2

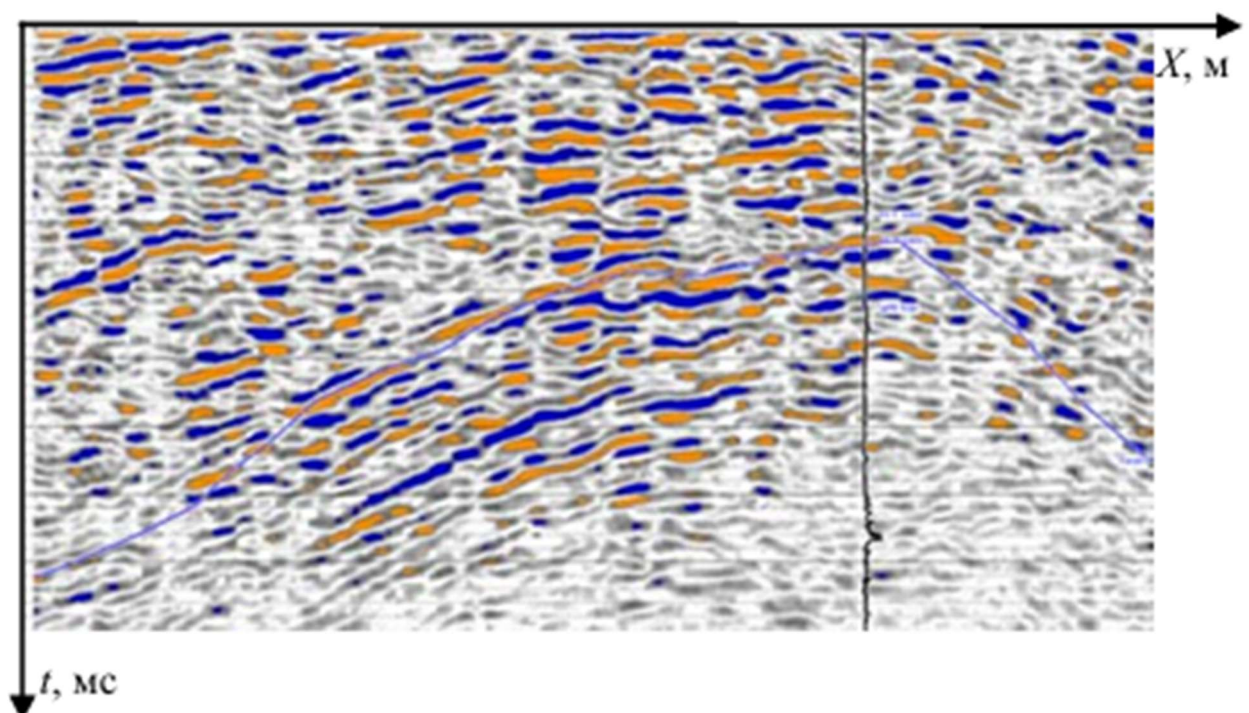


Рисунок 3.7 – Фрагмент часового розрізу градієнт G уздовж профілю № 2

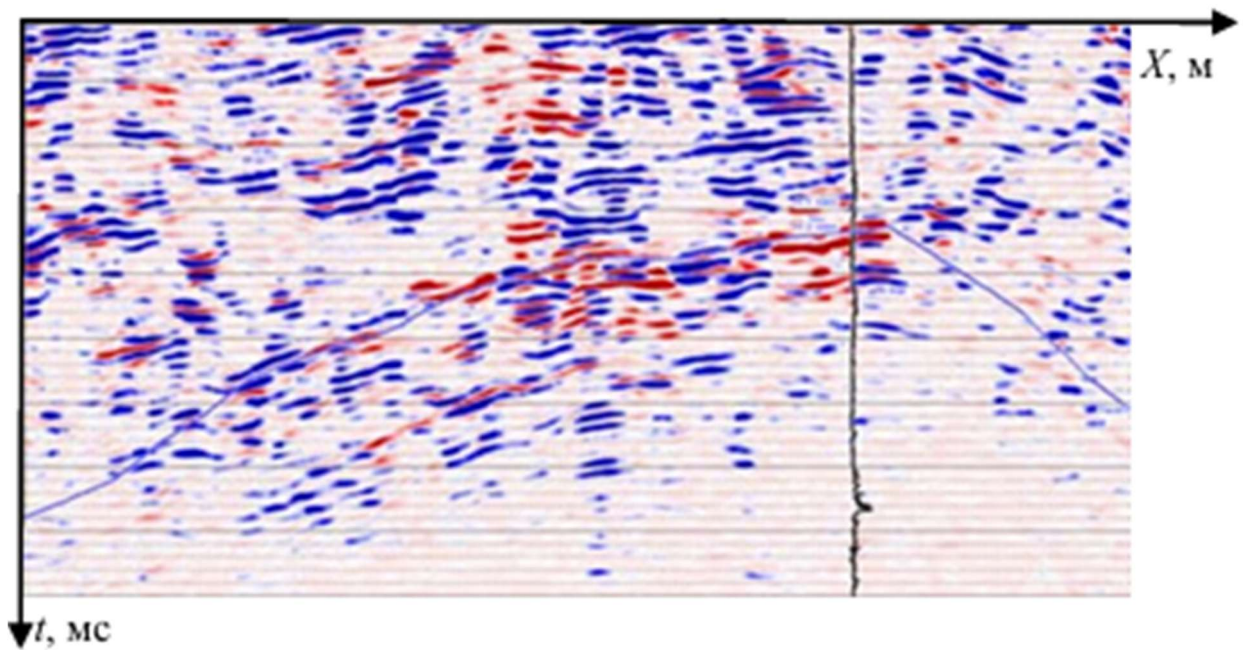


Рисунок 3.8 – Фрагмент часового розрізу добутку атрибутів $A \times G$ уздовж профілю № 2

Із метою детального аналізу сейсмічних даних уздовж фрагмента профілю № 2 побудовано кросплот (рисунок 3.9). Як видно з наведених даних, на ділянках, де проявляються незначні зміни амплітуд залежно від віддалення "джерело–приймач", значення градієнта близькі до нуля. Значення інтерсепта змінюються від додатних значень до від'ємних залежно від того, як поводить себе амплітуда. На кросплоті множини описаних вище значень дають лінійний тренд і таким чином чітко виділяється зона газонасичених порід. Одержані результати отримані за реальними даними і корелюються зі свердловинною інформацією.

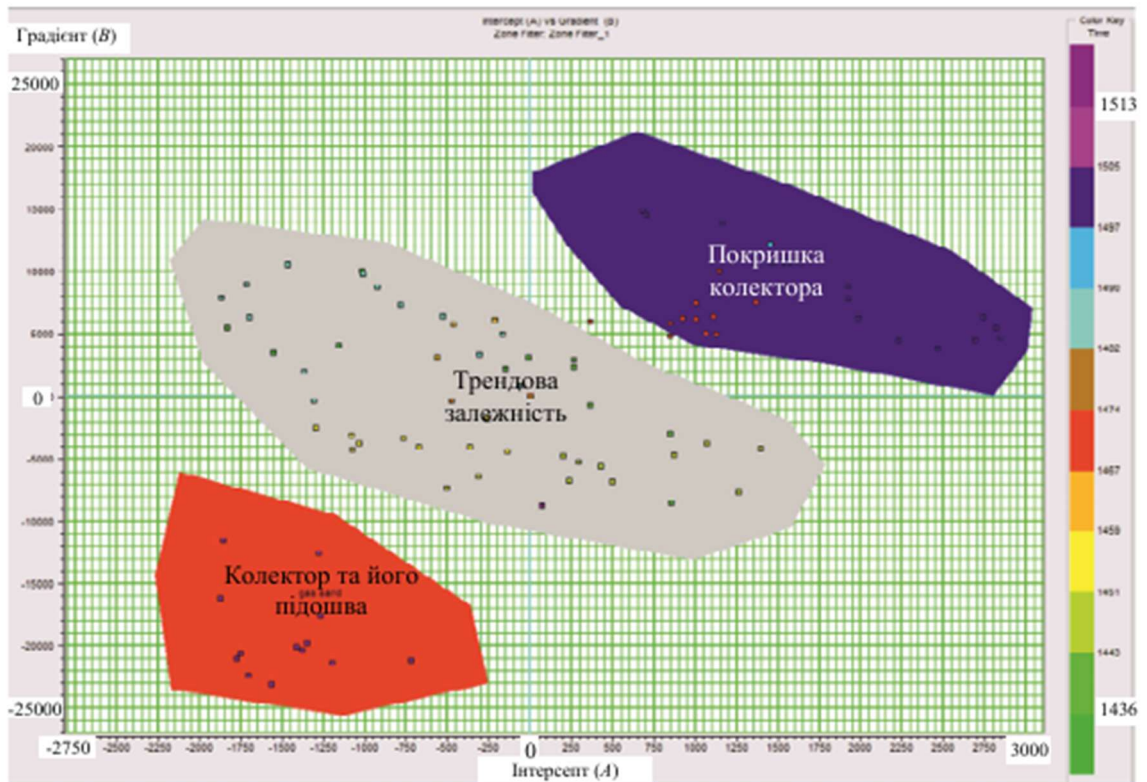


Рисунок 3.9 - Кросплот "інтерсепт-градієнт" уздовж сейсмічного профілю № 2 площі Субботіна

Результати AVO-аналізу в числовій формі винесено на реальний сейсмічний розріз (рисунок 3.10). Як бачимо, у межах інтервалу виявлено газонасичену товщу та спостерігаються ймовірні індикатори газонасиченості у верхній частині розрізу. Для незалежного підтвердження наявності аномалій на часових розрізах із використанням AVO-атрибутів "інтерсепт-градієнт" можна застосовувати спеціальний алгоритм, блок схеми якого зображено на рисунку 3.11. За допомогою цього алгоритму за даними AVO-аналізу (параметрів "інтерсепт-градієнт") можна ідентифікувати аномалії, зв'язані з літологією або покладами вуглеводнів. Причому амплітудних деструкцій на часовому розрізі "інтерсепта" не виявлено. Усі основні відбиваючі горизонти відображені і мають динамічні прояви, що ще раз свідчить про високу ефективність застосування розробленого алгоритму обробки [2].

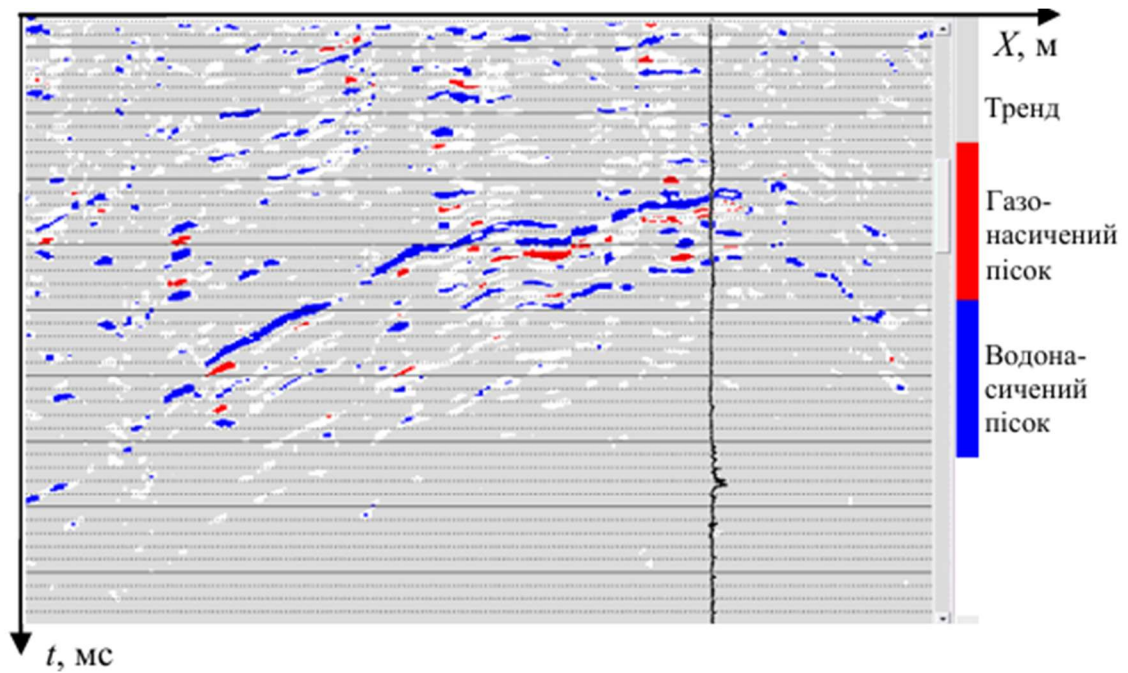


Рисунок 3.10 - Класифікація AVO-аномалій за сейсмічними даними "інтерсепт-градієнт" уздовж сейсмічного профілю № 2 площі Субботіна



Рисунок 3.11 - Блок-схема алгоритму для ідентифікації типу AVO-аномалій на часових розрізах ССТ

3.4 Результати зіставлення даних AVO-аналізу з даними ГДС

Заключним і вирішальним етапом практичного застосування AVO-аналізу є зіставлення отриманих сейсмічних атрибутів із даними геофізичних досліджень свердловин. Таке зіставлення дозволяє верифікувати результати динамічної інтерпретації та оцінити ступінь їхньої відповідності реальним фізичним властивостям розкритих порід. [2]

На площі родовища Субботіна наявні свердловинні матеріали, що охоплюють комплекс стандартних каротажних методів: акустичний каротаж (АК), густинний гамма-гамма каротаж (ГГК-Г), нейтронний каротаж (НК), гамма-каротаж (ГК), а також методи електричного каротажу (бічний каротаж, мікрозонди). Ці дані є базою для прив'язки сейсмічних горизонтів і побудови синтетичних сейсмограм. [2]

Синтетичні сейсмограми, побудовані на основі даних акустичного та густинного каротажу, підтверджують відповідність виявленого сейсмічного горизонту покрівлі продуктивного піщаного пласта. Характер сейсмічного запису на ближніх кутах добре відповідає прогнозованому коефіцієнту відбиття, розрахованому з каротажних даних. Це свідчить про якісну прив'язку даних і підтверджує правильність структурної і динамічної інтерпретації. [2]

За результатами каротажу у свердловині, що розкрила продуктивний пласт, зафіксовані такі характерні ознаки газонасиченого колектора: підвищений електричний опір за даними бічного каротажу; знижені значення нейтронного каротажу, що вказують на зниження водонасичення; характерна розбіжність кривих нейтронного і густинного каротажів, типова для газоносних порід; підвищені значення акустичного часу пробігу, що вказують на зниження швидкості поздовжньої хвилі. [2]

Ці каротажні ознаки цілком узгоджуються з результатами AVO-аналізу. Знижена швидкість V_p у газонасиченому пласті призводить до

зменшення акустичного імпедансу відносно перекривних глин, що пояснює від'ємний знак інтерцепту та від'ємний градієнт AVO-аномалії. Таким чином, спостерігається повне якісне та кількісне узгодження між сейсмічними і свердловинними даними. [2]

Максимально інформативними виявилися співвідношення V_P/V_S та пружні імпеданси, отримані при різних кутах падіння. Продуктивні газонасні горизонти добре виділяються на часових розрізах при кутах падіння хвилі від 20 до 30°. Як відомо, пониження співвідношення V_P/V_S та значна його диференціація при різних кутах падіння притаманна лише газонасиченим пісковикам. Однозначно наявність продуктивних колекторів підтверджує рисунок 3.12. Фактично такі результати слід вважати прямими ознаками вуглеводневого насичення [2].

На рисунку 3.13 наведено результати інверсії сейсмічних швидкостей у петрофізичні параметри, що узгоджуються з керновими дослідженнями, даними ГДС та результатами випробувань. Одержані оцінки коефіцієнтів глинистості та пористості, коефіцієнтів газо- і нафтонасиченості також свідчать про перспективність цього продуктивного горизонту [2].

Зіставлення просторового розподілу AVO-атрибутів із результатами каротажу дозволяє встановити межі газонасного покладу та оцінити ефективну товщину продуктивного пласта поза свердловинами. Ці дані є важливими для підрахунку запасів і оцінки перспектив родовища. [11]

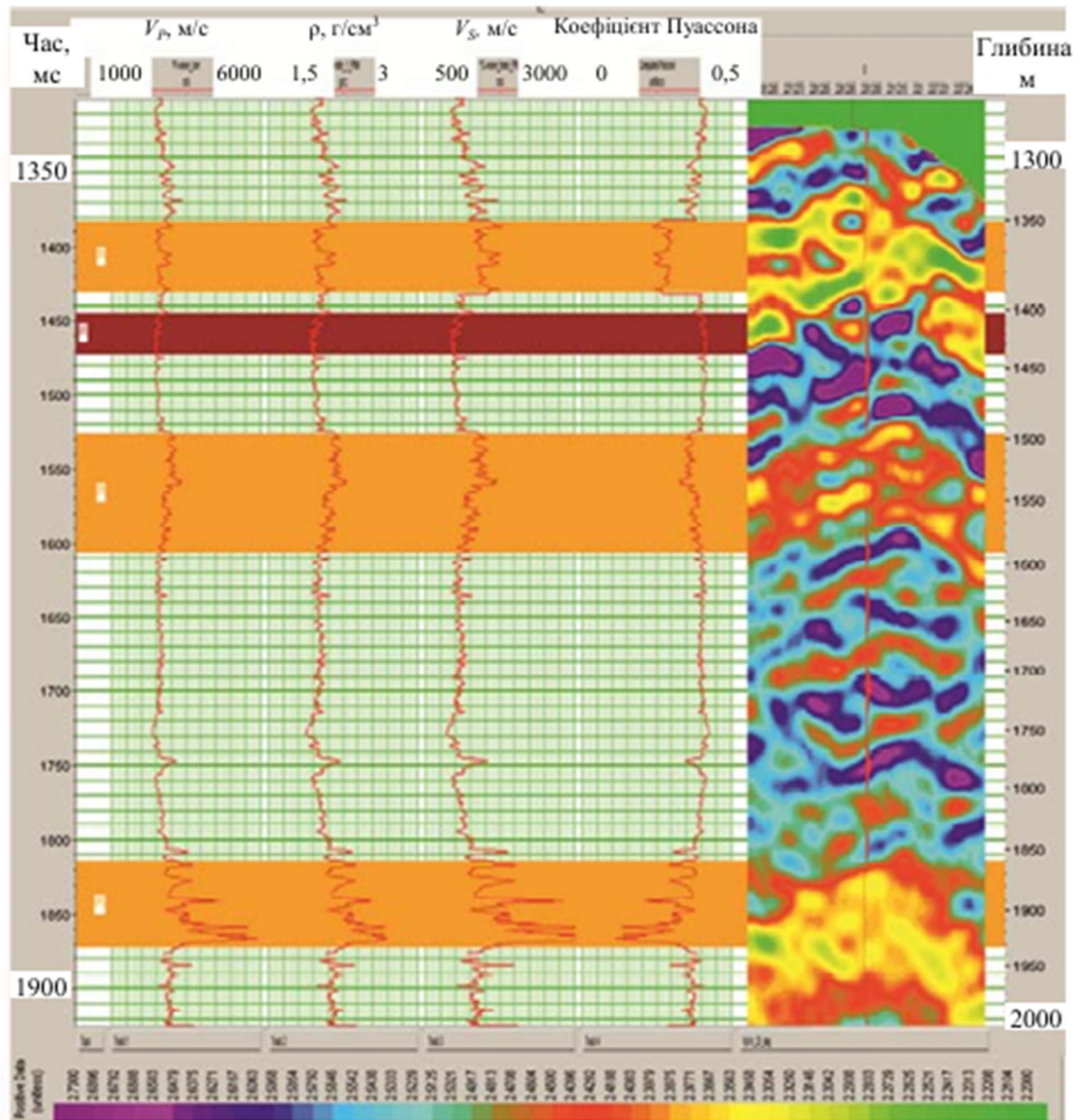


Рисунок 3.12 - Результати зіставлення даних пружної інверсії: співвідношення V_p/V_s при падінні хвилі під кутом 25° із даними ГДС по ймовірно перспективних ділянках (виділено кольором)

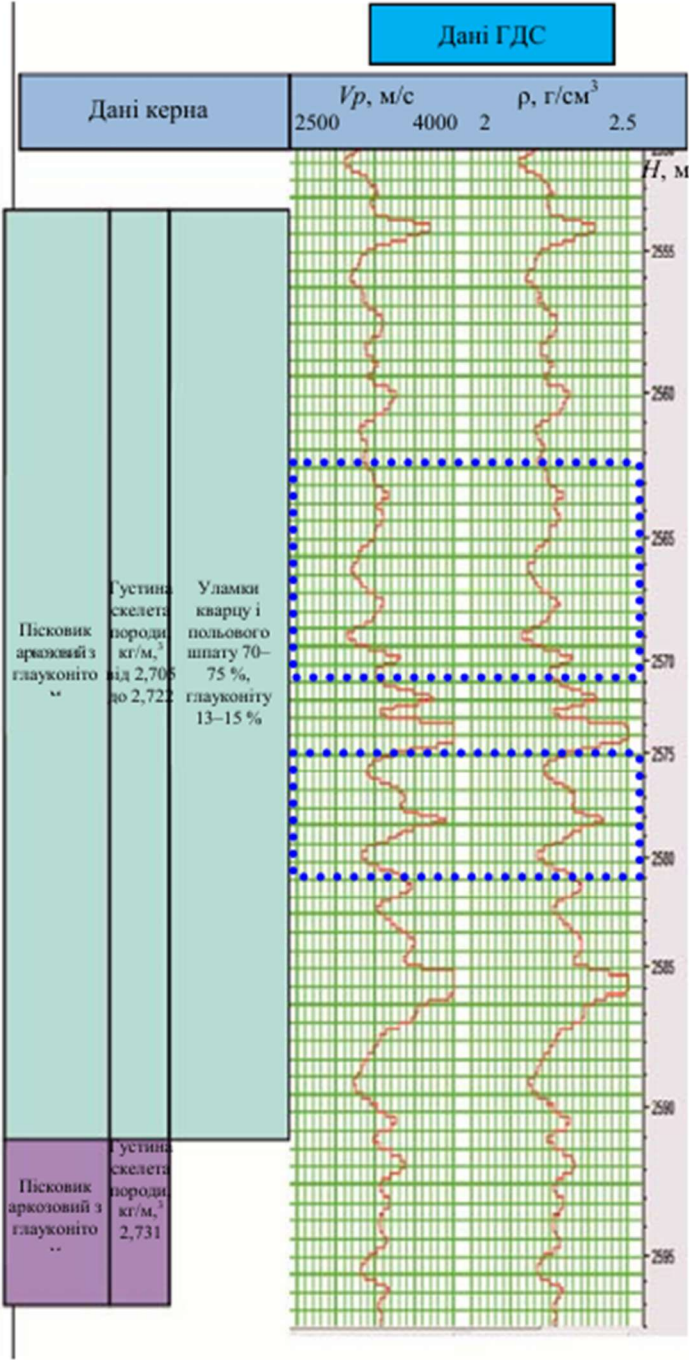


Рисунок 3.13 - Результати зіставлення даних інверсії сейсмічних швидкостей і густини (пунктиром виділено продуктивні інтервали)

Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано практичне застосування AVO-аналізу на площі родовища Субботіна з використанням даних морської сейсморозвідки та матеріалів геофізичних досліджень свердловин.

Геологічна характеристика родовища показала, що основні перспективи газоносності пов'язані з піщаними горизонтами пліоценового комплексу, ізольованими глинистими флюїдоупорами. Структурний план площі сформований антиклінальним підняттям з помірною тектонічною порушеністю. Літолого-стратиграфічна будова розрізу сприяє формуванню надійних структурних і літологічних пасток.

Обробка матеріалів морської сейсморозвідки виконувалась із дотриманням вимог збереження істинних амплітуд, що є обов'язковою умовою для коректного AVO-аналізу. Сформовані кутові суми дозволили виявити характерні зміни амплітуди відбитої хвилі з офсетом у межах продуктивного горизонту.

Аналіз AVO-атрибутів виявив виражену аномалію класу III на покрівлі основного продуктивного пласта. Аномалія просторово обмежена склепінневою частиною структури і характеризується стійким від'ємним знаком інтерцепту та градієнту, що відповідає газонасиченому низькоімпедансному колектору.

Зіставлення даних AVO-аналізу з матеріалами ГДС показало повне якісне узгодження результатів. Каротажні ознаки газоносності відповідають прогнозованим AVO-характеристикам. Це підтверджує ефективність застосованого методологічного підходу та достовірність сейсмічного прогнозу газового покладу на родовищі Субботіна.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі було досліджено особливості застосування AVO-аналізу при пошуках газових покладів та проаналізовано сучасні підходи до інтерпретації сейсмічних даних на прикладі родовища Субботіна. У першому розділі розглянуто теоретичні основи AVO-аналізу, фізичні передумови виникнення AVO-аномалій та основні AVO-атрибути.

У другому розділі досліджено петрофізичні основи інтерпретації AVO-аномалій, сучасні методи прогнозу фільтраційно-ємнісних параметрів колекторів та методологію оцінювання достовірності результатів інтерпретації. Показано, що найбільш ефективним є комплексний підхід, який поєднує AVO-аналіз, сейсмічну інверсію, дані геофізичних досліджень свердловин та комп'ютерне моделювання.

Проаналізовано сучасний стан розвитку AVO-аналізу, зокрема застосування машинного навчання, передстекової інверсії та цифрових методів обробки сейсмічних даних.

У третьому розділі виконано практичний аналіз результатів AVO-інтерпретації на площі родовища Субботіна. Встановлено, що продуктивний горизонт характеризується AVO-аномалією класу III, для якої типовими є від'ємні значення інтерцепта та градієнта.

У результаті виконаної роботи встановлено, що AVO-аналіз є ефективним методом прогнозу газонасичених колекторів, особливо при його комплексному використанні разом із даними інверсії, петрофізики та ГДС.

Практичне застосування методу дозволяє підвищити достовірність інтерпретації сейсмічних даних і знизити геологічні ризики при пошуках покладів вуглеводнів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Атлас родовищ нафти і газу України в V томах. - Львів: УНГА, 1998
2. AVO-аналіз та інверсія сейсмічних даних: навч. посібник / С. А. Вижва, Г. Т. Продайвода, П. М. Кузьменко. — К. : Видавничо поліграфічний центр "Київський університет", 2013
3. Chopra S., Castagna J. P. AVO. — SEG Geophysical Developments Series, 2014.
4. Rutherford S. R., Williams R. H. Amplitude-versus-offset variations in gas sands // Geophysics. — 1989. — Vol. 54. — P. 680–688.
5. Castagna J. P., Swan H. W., Foster D. J. Framework for AVO gradient and intercept interpretation // Geophysics. — 1998. — Vol. 63. — P. 948–956.
6. Hiltermann F. J. Fundamentals of Seismic Interpretation. — SEG, 2001.
7. Veeken P. C. H. Seismic Stratigraphy, Basin Analysis and Reservoir Characterisation. — Elsevier, 2007.
8. Продайвода Г. Т., Вижва С. А., Безродна І. М., Продайвода Т. Г. Геофізичні методи оцінки продуктивності колекторів нафти і газу. — К.: ВПЦ «Київський університет», 2011. — 367 с.
9. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media. — Cambridge University Press, 2009
10. Вижва С. А., Безродна І. М. Прогноз продуктивності складнобудованих порід-колекторів нафти і газу за результатами інверсії даних ГДС. Геодинаміка. — 2011. — № 2(11).
11. Маєвський Б. Й. та ін. Геологія, розвідка та промислова геофізика нафтових і газових родовищ. — Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2015.
12. Вижва С. А., Михайлов В. А., Продайвода Г. Т. Геофізичні методи оцінки продуктивності колекторів нафти і газу. — К.: ВПЦ «Київський університет», 2018. — 367 с.

13. Гошовський С. В., Маєвський Б. Й., Куровець С. С., Здерка Т. В. Досвід застосування сучасних технологій інтенсифікації видобутку вуглеводнів на родовищах України. Мінеральні ресурси України. — 2019. — № 4. — С. 34
14. Connolly P. Elastic impedance // The Leading Edge. — 1999. — Vol. 18. — P. 438–452.
15. Goodway B., Chen T., Downton J. Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters // CSEG Recorder. — 1997.
16. Russell B., Hampson D. Comparison of post-stack and pre-stack inversion methods // SEG Expanded Abstracts. — 2006.