

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ГЕОФІЗИКИ ім. С.І. СУББОТІНА НАН УКРАЇНИ**

**ВИЖВА Андрій Сергійович**

УДК 550.834.05

**ІНВАРІАНТНО-ПОЛЯРИЗАЦІЙНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ  
ПРУЖНИХ ПОСТІЙНИХ ТА СИМЕТРІЇ ГІРСЬКИХ ПОРІД ЗА  
ДАНИМИ ВСП**

Спеціальність 04.00.22 – геофізика

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук**

**Київ – 2016**

Дисертація є рукописом

Робота виконана в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка

**Науковий керівник** доктор фізико-математичних наук, професор  
**Продайвода Георгій Трохимович,**  
Київський національний університет  
імені Тараса Шевченка,  
професор кафедри геофізики

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, старший науковий  
співробітник  
**Маслов Борис Петрович,**  
Інститут механіки імені С.П. Тимошенка НАН  
України,  
головний науковий співробітник

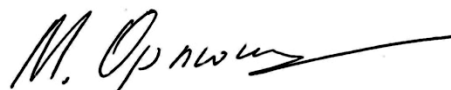
доктор геологічних наук, доцент  
**Лісний Георгій Дмитрович,**  
ПуАТ «Тутковський геофізика»,  
директор ІОЦ

Захист відбудеться «13» жовтня 2016 р. о 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д 26.200.01 при Інституті геофізики імені С.І. Субботіна НАН України  
за адресою: Україна 03680, Київ, пр. Палладіна, 32.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Інституту геофізики імені  
С.І. Субботіна НАН України за адресою: Україна 03680, Київ, пр. Палладіна, 32

Автореферат розісланий «12» вересня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради Д 26.200.01  
доктор геологічних наук,  
старший науковий співробітник



М.І. Орлюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Найбільш перспективними методами щодо виявлення пасток вуглеводнів різної природи, дослідження їх геологічної будови, прогнозу літології і фільтраційно-ємнісних параметрів є сейсмічні і сейсмоакустичні методи. Останні десятиліття відзначаються бурхливим розвитком технологій польових досліджень, зокрема масовим впровадженням 3D сейсмічних зйомок, запровадженням широкоазимутальних та багатохвильових досліджень. Особливо необхідно відзначити прогрес у методах обробки, інтерпретації та візуалізації сейсмічних даних.

В той же час, точне і коректне вирішення прямої і оберненої задачі сейсмоакустики вимагає оцінки впливу на пружні та акустичні характеристики мінерального складу, структури пустотного простору, параметрів пустотних наповнювачів, напружено-деформованого стану. Проведення сейсмічних побудов на основі ізотропних та спрощених поперечно-анізотропних апроксимацій часто приводить до значних похибок при визначенні положення відбиваючих границь та оцінці перспектив окремих об'єктів.

Ультразвукові дослідження на керні осадових гірських порід проведені як вітчизняними, так і закордонними дослідниками (Александров К.С., Продайвода Г.Т.) переконливо показали, що в своїй більшості симетрія матриці пружних постійних є ромбічною або триклінною. В силу цілого ряду об'єктивних чинників, розповсюдження хвиль у низькосиметричному анізотропному середовищі носить дуже складний характер, тому в практиці сейсмічних досліджень для чисельних розрахунків фазових і променевих швидкостей застосовують спрощені лінеаризовані моделі з використанням параметрів анізотропії Томсона і Цванкіна. При цьому залишаються відкритими питання достовірності отриманих даних при відсутності експериментальних визначень повного набору пружних постійних та реальних даних про азимутальну анізотропію сейсмічних хвиль в осадових товщах.

В зв'язку з цим є актуальною розробка сейсмічного методу визначення матриці пружних постійних та її симетрії за даними польових сейсмічних спостережень, а також оцінки реальних значень параметрів азимутальної анізотропії сейсмічних хвиль. Особливо важливою також є можливість визначення ступеня відхилення ізохрон поверхневого годографа відбитих хвиль від гіперболоїда та оцінка надійності визначення кінематичних поправок за даними апроксимаційних моделей.

Вирішенню цієї та частини інших проблем і присвячена дана робота.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі геофізики в НДЛ теоретичної та прикладної геофізики Науково-навчального інституту «Інститут геології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Вона нерозривно пов'язана з виконанням планів науково-дослідних робіт університету. Більшість результатів отримано при виконанні держбюджетних та госпдоговірних науково-дослідних тем (державні реєстраційні номери 0168U010311, 0106U00058551) та теми №11БФ049-02 «Розробка теорії та методології побудови динамічних геолого-геофізичних моделей геологічних об'єктів і процесів», у виконанні яких автор брав безпосередню участь.

**Метою роботи** є розробка ефективного сейсмічного методу визначення пружних постійних та симетрії товщ гірських порід за даними поверхневих і свердловинних досліджень та нових підходів до оцінки ступеню негіперболоїдності годографа відбитих хвиль у випадку низької симетрії середовища.

**Основні завдання досліджень:**

1. Проаналізувати сучасний стан врахування акустичної та пружної анізотропії при проведенні польових сейсмічних і сейсмоакустичних досліджень.

2. Розробити метод чисельних розрахунків пружних сталих осадових порід в триклінному наближенні за даними спостережень ВСП.

3. Провести розрахунки і побудову стереопроєкцій параметрів пружних хвиль, поверхонь рефракції, хвильових поверхонь квазіповздовжньої, «швидкої» та «повільної» квазіпоперечних сейсмічних хвиль для осадових товщ гірських порід, оцінити вплив анізотропії геологічного середовища на їх форму.

4. Розробити алгоритм і програму чисельних розрахунків ізохрон поверхневого годографа відбитої квазіповздовжньої сейсмічної хвилі анізотропного шаруватого середовища та оцінити ступінь його відхилення від гіперболоїда.

**Об'єктом наукового дослідження** є складнопобудоване анізотропне низькосиметричне геологічне середовище.

**Предмет наукового дослідження** – пружні постійні низькосиметричного геологічного середовища (триклінна симетрія і вище), параметри азимутальної анізотропії сейсмічних хвиль та ізохрони поверхневих годографів відбитих хвиль із урахуванням реальної акустичної та пружної анізотропії.

**Методи досліджень.** В роботі використовувались методи теорії пружності анізотропного середовища, методи цифрової обробки, інтерпретації, математичного моделювання та візуалізації сейсмічних і сейсмоакустичних даних.

**Наукова новизна роботи полягає в тому, що:**

1. Проведено узагальнення та кількісна оцінка параметрів анізотропії пружних хвиль породоутворюючих глинистих мінералів в поперечно-ізотропному наближенні, які добре узгоджуються із результатами експериментальних досліджень.

2. Вперше шляхом інверсії променевих і фазових індикатрис квазіповздовжніх і квазіпоперечних хвиль осадової товщі, які отримано методом ВСП, визначена симетрія та повний набір компонент тензорної матриці пружних сталих осадових порід.

3. Вперше за даними польових сейсмічних спостережень в природному заляганні встановлено параметри азимутальної анізотропії динамічних модулів пружності осадових товщ різного літологічного складу.

4. Розроблено та апробовано алгоритм і програму чисельних розрахунків ізохрон поверхневого годографа для шаруватого середовища триклінної симетрії.

5. Вперше на реальних пружних сталих для товщі глин встановлено, що симетрія карти ізохрон площинного годографа квазіповздовжньої хвилі горизонтально шаруватого середовища строго відповідає пружній симетрії глинистого шару.

6. Розроблено метод оцінки кінематичної поправки за негіперболоїдність поверхневого годографа відбитої хвилі.

**Практична цінність і впровадження результатів роботи.** Використання розроблених методів дозволить значно підвищити точність геологічних побудов за даними польових сейсмічних досліджень.

Результати роботи можна застосовувати при проведенні геологорозвідувальних робіт під час пошуків і розвідки родовищ вуглеводнів та моніторингу небезпечних геологічних процесів.

Проведені дослідження можуть бути використані в навчальних курсах “Обробка даних сейсмозвідки на ЕОМ”, “Моделювання геофізичних полів”, методичних посібниках із обробки та інтерпретації сейсмічних матеріалів.

За результатами досліджень роботи оформлено заявку на винахід [10].

**Особистий внесок здобувача.** Автором розроблено алгоритми та програмне забезпечення, проведено моделювання, візуалізація та аналіз параметрів пружної анізотропії глинистих мінералів; проведено розрахунки пружних постійних та параметрів акустичної і пружної анізотропії за даними ВСП; розроблено алгоритми та проведено чисельні розрахунки поправок в годографи відбитих хвиль у випадку низької симетрії середовища.

Основні положення та результати, що наведені в дисертаційній роботі, отримано здобувачем особисто та висвітлено в наукових фахових виданнях як в Україні, так і за кордоном.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації та результати досліджень доповідалися на 4 міжнародних конференціях, в тому числі 3 – за кордоном:

- 73rd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC (Vienna, Austria, 23-26 May 2011);
- 74th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC (Copenhagen, Denmark, 4-7 June 2012);
- 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC, (London, United Kingdom, 10-13 June 2013);
- XII міжнародній конференції «Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти» (м. Київ, 12-15 травня 2014).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 10 наукових робіт, серед них – 5 статей у наукових журналах та збірниках наукових праць (4 – у фахових виданнях України, 1 – в польському журналі «Oil and Gas»), а також 4 – в матеріалах міжнародних конференцій під егідою EAGE, які входять до наукометричної бази Scopus, 1 заявка на винахід.

Основні результати, які отримано автором, достатньою мірою висвітлені в наукових виданнях. Особистий внесок автора у написаних в співавторстві роботах визначається наступним чином. Постановка задачі, математичне моделювання та результати досліджень, які увійшли до числа основних результатів в дисертаційній роботі, представлено у роботі [1]. У роботі [2] автору належить адаптація математичного апарату, проведення розрахунків і побудов та аналіз отриманих результатів. Автор у роботі [3] виконав розробку окремих алгоритмів, обробку та аналіз отриманих результатів. Постановку задачі та виконання експериментальної частини проведено автором у роботі [4]. У роботі [5] автору належить розробка основних ідей, здійснення випробувань методики на реальних сейсмічних даних,

аналіз результатів та формування висновків. У роботах [6-9] автором особисто проводились всі обчислення та побудови а також підготовлені і зроблені виступи на конференціях EAGE. В роботі [10] автор виконав всі розрахунки та побудови.

Загальний внесок автора у спільні публікації становить 40%.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота, загальним обсягом 116 сторінок, складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел, що налічує 91 найменування. Основний текст роботи викладено на 107 сторінках; робота містить 35 рисунків та 12 таблиць.

Роботу виконано на кафедрі геофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка під час навчання в аспірантурі.

Автор висловлює велику подяку науковому керівнику, доктору фізико-математичних наук, професору **Продайводі Георгію Трохимовичу** за постійні поради, допомогу та підтримку в написанні дисертації, без якого виконання даної роботи не було б можливим. Автор висловлює щирю подяку доценту кафедри геофізики **Кузьменку Павлу Миколайовичу** за допомогу і підтримку у виконанні роботи, поради та консультації щодо обробки сейсмічних даних.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** обґрунтовується актуальність роботи, формулюються мета та основні завдання дослідження, вказується наукова новизна отриманих результатів, їх практична цінність та особистий внесок здобувача, наведено дані апробації дисертаційної роботи, подана її загальна структура та характеристика.

У **першому розділі** наведена оцінка сучасного стану врахування акустичної та пружної анізотропії при проведенні польових сейсмічних та сейсмоакустичних досліджень.

Явище анізотропії швидкостей сейсмічних хвиль у геологічному середовищі вже давно привертає увагу дослідників. Зростаючий інтерес до поглибленого вивчення азимутальної сейсмічної анізотропії в нинішній час стимулюється бурхливим розвитком трикомпонентних (3С) азимутальних 3D сейсмічних методів.

Факт існування сейсмічної анізотропії переконливо доведений у працях Ю.В. Ризниченко, S. Crampin, К.С. Александрова, Г.Т. Продайводи, Ф.М. Ляховицького, С.В. Гольдина, L. Thomsen, I. Tsvankin, Y. Grechka та багатьох інших, що свідчить про наявність у реальному геологічному середовищі упорядкованості різної геологічної і фізичної природи. Достатньо очевидно, що всі без виключення параметри азимутальної сейсмічної анізотропії контролюються типом симетрії упорядкованості структурних елементів геологічного середовища. Це органічно впливає із принципу Неймана-Кюрі, згідно з яким симетрія структури упорядкованого геологічного середовища визначає і характер симетрії тензора пружних сталей. В свою чергу, пружна симетрія накладає жорсткі обмеження на усі параметри азимутальної анізотропії сейсмічних хвиль упорядкованого геологічного середовища.

Природа сейсмічної і акустичної анізотропії реальних геологічних товщ має декілька ієрархічних рівнів і залежить від симетрії пружних властивостей породоформуєчих мінералів, текстурних і структурних особливостей гірських порід, структури і характеру насичення пустотного простору, наявності і орієнтації тріщинних зон, напружено-деформованого стану і багатьох інших факторів. Наявні

дослідження повного набору матриці пружних сталей на зразках різних генетичних типів гірських порід інваріантно-поляризаційним методом засвідчують, що у переважній більшості осадових гірських порід, матриці пружних сталей є ромбічною або триклінною (Александров К.С., Продайвода Г.Т., 2000). Це підтверджується і результатами структурних досліджень зразків гірських порід оптичними, рентгенівськими і нейтронними методами.

Лісний Г.Д. (2013) провів аналіз проблем, що виникають при побудові швидкісних моделей та сейсмічних зображень в анізотропних середовищах. Зокрема, ним вказується на негативні наслідки ігнорування сейсмічної анізотропії та зниження достовірності при побудові швидкісних моделей таких середовищ.

Проблемами дослідження сейсмічних зображень анізотропних середовищ займалися Тимошин Ю.В., Alkhalifah T., Tsvankin I., Grechka V., Тяпкин Ю.К., Роганов В.Ю. та інші. Всі вони вказують на необхідність врахування анізотропії для підвищення достовірності геологічних побудов.

Автором в роботі [1] приведені результати математичного моделювання сейсмічного хвильового поля геологічного середовища з однонаправленою системою тріщин. Упорядковані тріщини і каверни спричиняють анізотропію пружних хвиль, яка суттєво впливає на характер розповсюдження хвиль. Переважна більшість родовищ нафти і газу в породах кристалічного фундаменту тяжіє до зон розвитку тріщинних і тріщинно-кавернозних колекторів.

Все це вказує на необхідність розробки надійного сейсмічного методу оцінки та врахування анізотропії пружних характеристик геологічного середовища з метою підвищення достовірності геологічних побудов та вирішення завдань прогнозування геологічного розрізу, в т. ч. зон підвищеної тріщинуватості.

Сучасні підходи до визначення акустичної та пружної анізотропії при проведенні польових сейсмічних та сейсмоакустичних досліджень полягають у розробці поляризаційних багатокомпонентних методів визначення пружних швидкостей а через них і пружних постійних геологічних товщ.

Дружинін А.Б., Горшкальов С.Б., Тригубов А.В. (1996) запропонували метод визначення пружних сталей, який полягає у збуренні та реєстрації на поверхні Землі або у свердловинах хвиль поздовжньої та поперечної поляризації; запису сейсмічного хвильового поля у вигляді сейсмограм; застосуванні поляризаційної цифрової обробки сейсмограм з метою виділення хвиль різної поляризації; визначенні променевих хвиль різної поляризації; побудові індикатриси променевих хвиль; інвертуванні методом нелінійних променевих збурень індикатриси променевих хвиль у пружні сталі; проведенні додаткових трикомпонентних спостережень з метою визначення орієнтації елементів симетрії товщі гірських порід.

Недоліками цього методу є те, що він не забезпечує однозначного визначення симетрії пружних сталей товщі гірських порід та не дозволяє розрізняти ефекти анізотропії від ефектів неоднорідності, що обумовлені недосконалістю будови товщі гірських порід та мінливістю фізичних властивостей її структурних елементів.

Продайвода Г.Т. (1998) запропонував метод визначення пружних сталей, який передбачає збурення та реєстрацію хвилі поздовжньої поляризації і двох поперечно поляризованих хвиль, площини поляризації яких взаємно ортогональні, вздовж

нееквівалентних напрямків хвильової нормалі ( $\vec{n}$ ) зразка гірської породи. Вздовж кожного напрямку хвильової нормалі визначають компоненти симетричного акустичного тензора другого рангу у робочих взаємно ортогональних системах координат; для базису кожної системи координат обчислюють перші інваріанти акустичного тензора, осереднюють їх, знаходять нев'язку і урівноважують фазові швидкості, із яких визначають компоненти тензора спочатку у робочій системі координат, а потім у власній системі координат, базис якої обирають як стандартну акустичну систему координат; будують лінеаризовану систему рівнянь і визначають пружні сталі і пружну симетрію текстури зразка гірської породи.

Недоліком цього методу є неможливість його застосування для визначення пружної симетрії і пружних сталих товщ гірських порід сейсмічними методами внаслідок того, що в ньому використовують фазові швидкості, а в процесі польових сейсмічних досліджень вимірюють променеві швидкості, які у анізотропному середовищі не співпадають із фазовими.

У **другому розділі** наведені результати дослідження пружної анізотропії основних глинистих мінералів. Незважаючи на інтенсивні дослідження в цій галузі серед різних країн світу, надійних даних про пружні властивості породоутворюючих глинистих мінералів на даний час ще дуже мало, основні з них наведені в роботах Katahara K.W., Vanghan M., Александрова К.С., Белікова Б.П., Рижової Т.В., Продайводи Г.Т. та ін.

Пружна симетрія мінералів контролює просторові зміни всіх без виключення параметрів анізотропії пружних хвиль: індикатрис стереопроєкцій ізоліній квазіпоздовжньої, «швидкої» і «повільної» квазіпоперечних хвиль та диференціального коефіцієнта пружної анізотропії. Автором проведений аналіз параметрів пружної анізотропії основних глинистих мінералів на прикладі каолініту та мусковіту (рис.2.1-2.2).

Стереопроєкція ізоліній фазової квазіпоздовжньої хвилі каолініту в триклінному наближенні (рис. 2.1, б) має локальний мінімум у напрямку кристалографічної осі (001) і майже симетрична відносно координатної площини  $X_1X_3$ . Максимальні величини фазової квазіпоздовжньої хвилі в площині  $X_1X_2$ .

Стереопроєкція ізоліній різниці між «швидкою» і «повільною» фазовими швидкостями квазіпоздовжніх хвиль каолініту триклінної симетрії (рис. 2.1, в) має в околі напрямку (001) біля семи локальних екстремумів, які свідчать, принаймні, про наявність біля 7 акустичних осей, причому жодна з них не співпадає із віссю  $C$  каолініту. Найбільша різниця між «швидкою» і «повільною» квазіпоперечними хвилями спостерігається в площині  $X_1X_2$  і сягає величини, більше  $2.8 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ . Це свідчить, насамперед, про наявність в кристалі каолініту інтенсивних ефектів розщеплення поперечних хвиль.

Спостерігається три напрямки максимальної величини коефіцієнтів диференціальної пружної анізотропії, величина яких сягає більше 55 % (рис. 2.1, а). Але в околі напрямку (001) є також два напрямки із найменшою величиною коефіцієнта пружної анізотропії – менше 20 %.



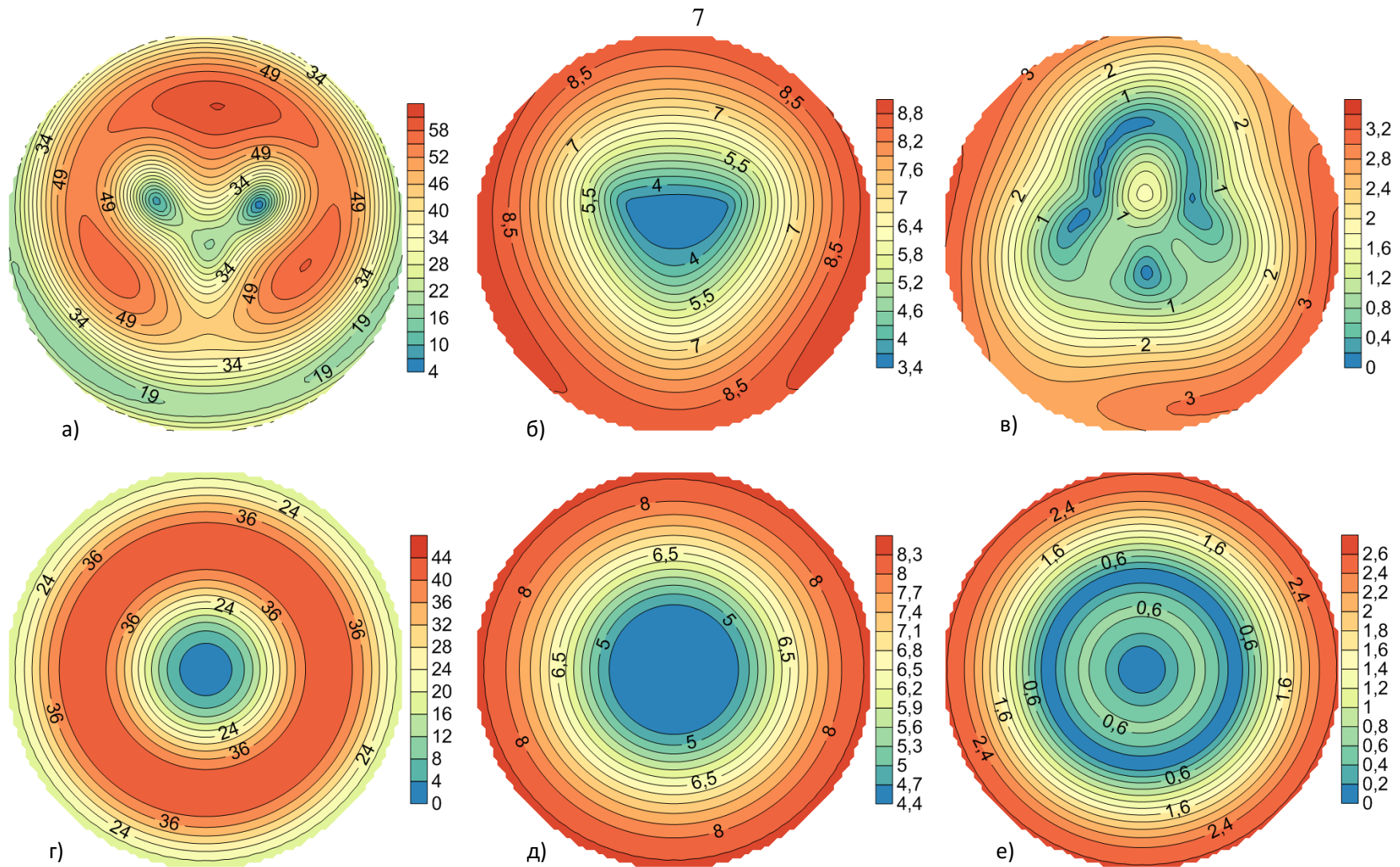


Рис. 2.1. Стереопроєкції ізолій параметрів анізотрії каолініту триклінної симетрії (верхня трійка) та його поперечно-ізотропного наближення (нижня трійка): а), г) – диференціального коефіцієнта пружної анізотрії ( $A_\alpha$ , %); б), д) – швидкості розповсюдження квазіпоzdжовжньої хвилі (в км·с<sup>-1</sup>); в), е) – різниці швидкостей розповсюдження «швидкої» і «повільної» квазіпоперечних хвиль (в км·с<sup>-1</sup>).

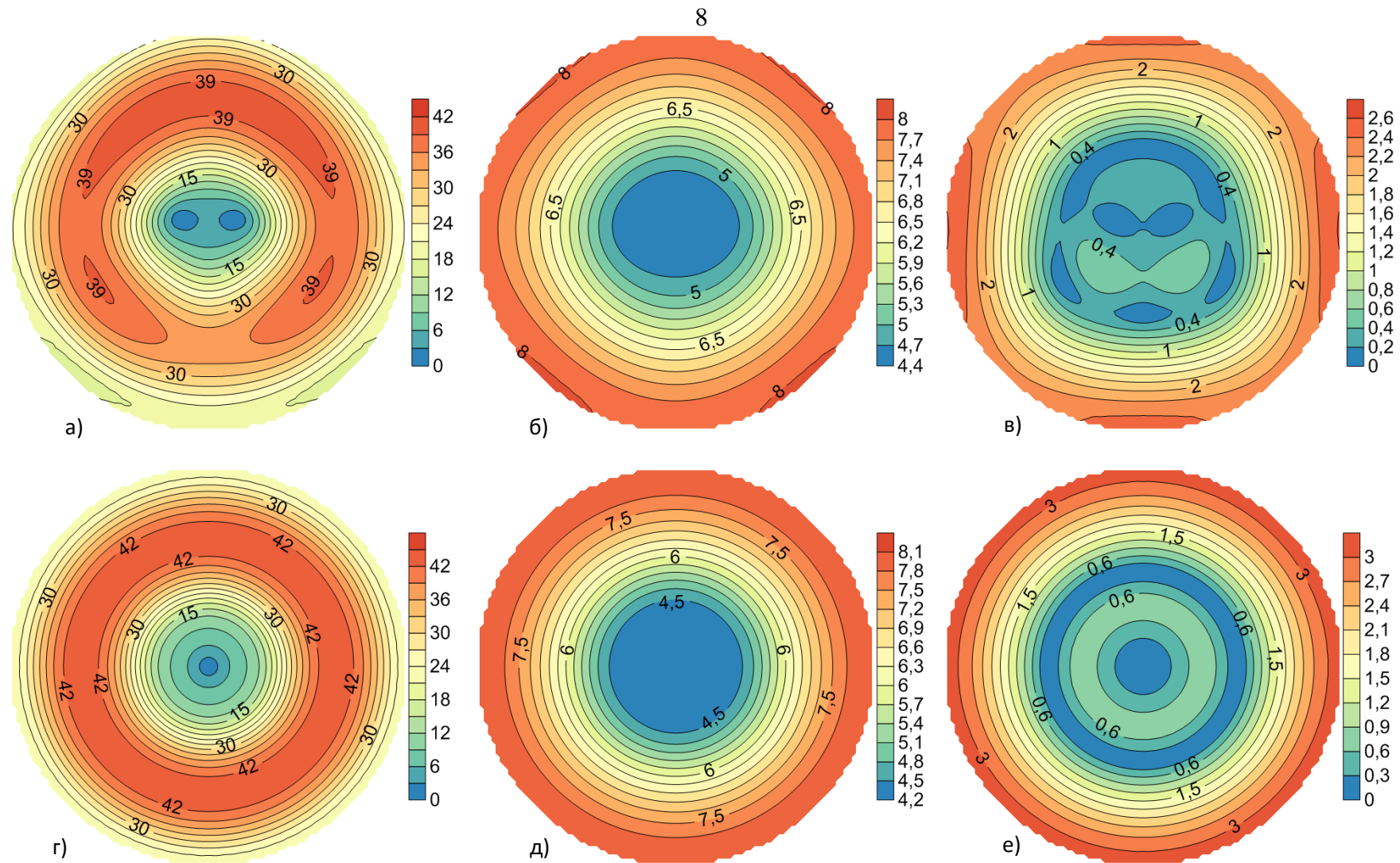


Рис. 2.2. Стереопроєкції ізолій параметрів анізотропії мусковіту моноклінної симетрії (верхня трійка) та його поперечно-ізоотропного наближення (нижня трійка):

а), г) – диференціального коефіцієнта пружної анізотропії ( $A\alpha$ , %);

б), д) – швидкості розповсюдження квазіпоzdжовжньої хвилі (в км·с<sup>-1</sup>);

в), е) – різниці швидкостей розповсюдження «швидкої» і «повільної» квазіпоперечних хвиль (в км·с<sup>-1</sup>).

Поперечно-ізотропна апроксимація пружної симетрії каолініту приводить до того, що всі без виключення параметри анізотропії мають циліндричну симетрію (рис. 2.1, г-е). Характерні екстремальні напрямки параметрів анізотропії, які спостерігаються в триклінному наближенні, згладжуються. Замість трьох екстремальних напрямків коефіцієнтів диференціальної пружної анізотропії з'являється цілий пояс екстремальних його значень – більше 55 %.

Шаруватий структурний мотив також значною мірою проявляється і на стереопроєкціях параметрів анізотропії мусковіту моноклінної симетрії (рис. 2.2, а-в). В околі кристалографічної осі  $C$  мусковіту спостерігається біля шести акустичних осей, а величина різниці між «швидкою» і «повільною» фазовими квазіпоперечними хвилями в площині  $X_1X_2$  сягає більше  $2.4 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ , але ця величина менша за значення цього параметру, характерного для каолініту (рис. 2.1 та 2.2).

У розділі 3 наведений розроблений автором інваріантно-поляризаційний сейсмічний метод визначення (контролю) пружної симетрії і пружних сталих товщі гірських порід [5, 10]. Вирішення поставленої задачі досягається за рахунок застосування розробленого нового алгоритму обробки сейсмічної інформації та полягає в тому, що на денній поверхні (або в свердловині) в заданій робочій системі координат у фіксованих напрямках збуджують і реєструють трикомпонентними сейсмоприймачами хвилі повздожньої і поперечної поляризації із взаємно ортогональними площинами поляризації (ізонормальні хвилі); сейсмічне хвильове поле записують у вигляді сейсмограм; за спеціальними алгоритмами проводять обробку отриманої інформації, а саме шляхом узгодженого повороту записів хвильових полів на отриманих записах сейсмограм виділяють квазіповздожню хвилю, «швидку» та «повільну» квазіпоперечні хвилі (ізонормальні хвилі); вимірюють їх час розповсюдження; будують годографи ізонормальних хвиль; визначають їх променеві швидкості та будують індикатриси променевих хвиль. В результаті розраховують і будують стереопроєкції ізоліній параметрів азимутальної анізотропії хвиль різної поляризації, розраховують пружні податливості і параметри азимутальної анізотропії динамічних модулів пружності, поверхні рефракції і хвильові поверхні; параметри азимутальної анізотропії хвиль різної поляризації і модулів пружності інвертують у функції розподілу орієнтації пор, тріщин і каверн.

Для визначення повного набору компонент тензорної матриці пружних сталих осадових відкладів в триклінному наближенні були використані результати польових спостережень методом ВСП, які проводились Brodov L.Y., Evstifeyev V.I., Karus E.V., Kulichikhina T. в районі Південної Ельби (Прикаспійська западина). Осадові відклади, які були об'єктом досліджень, відносять до верхів нижньої крейди. Методика експериментальних сейсмічних досліджень полягала в поєднанні спостережень відбитих і заломлених хвиль на поверхні із спостереженням прямих хвиль у свердловинах. Також використовувались дані глинистих сланців П'єре за даними White J.E., Martineau-Nicoletis L., Monach C.

Під час польових експериментів проводилися збудження та реєстрація повздожніх та поперечних хвиль з різною поляризацією. Запис поперечних хвиль здійснювався з використанням направлених джерел за схемою  $YY$  і  $XX$ , які

забезпечували реєстрацію SH і SV хвиль. В деяких випадках застосовувалося одночасне збурення обох типів S-хвиль.

Дослідження анізотропії осадових відкладів здійснювалися на геологічних розрізах з різним літологічним складом порід: слабодиференційованих піщано-глинистих і глинистих відкладах та гетерогенних карбонатних породах.

Результати визначення пружних сталих глинистих сланців П'єре інваріантно-поляризаційним методом в триклінному наближенні наведено в Табл. 3.1.

Як видно із акустичної діаграми (рис. 3.1), симетрія пружних сталих - аксіальна ромбічна, і лише для глинистих сланців на глибині  $h=167.64$  м виявилася планальною ромбічною. Величина інтегрального коефіцієнта пружної анізотропії змінюється від 4.5% до 12.4%. Коефіцієнт поперечної анізотропії, який характеризує ступінь відхилення глинистих сланців від найближчого до них поперечно-ізотропного середовища, коливається від 2.3% до 6.7%. Це однозначно свідчить про те, що поперечно-ізотропне наближення не задовольняє польовим експериментальним даним.

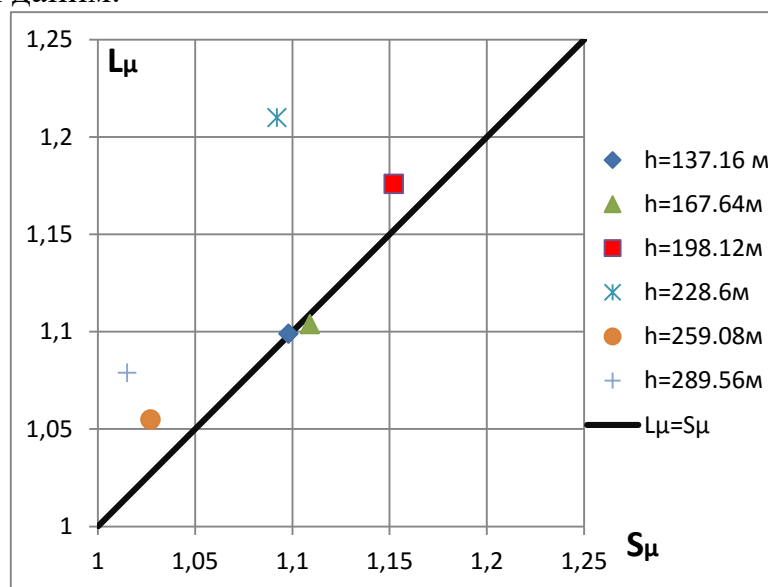


Рис. 3.1. Діаграма параметрів акустичних еліпсоїдів глинистих сланців П'єре за даними інверсії індикатрис фазових швидкостей, які одержані методом ВСП (за White J.E., Martineau-Nicoletis L., Monach C.)

Визначення повного набору компонент тензорної матриці пружних сталих забезпечує можливість чисельних розрахунків параметрів азимутальної анізотропії об'ємних хвиль в осадових товщах: індикатрис фазових швидкостей, кутів відхилення векторів пружних зміщень від напрямку хвильової нормалі квазіпоздовжніх хвиль та коефіцієнтів диференціальної пружної анізотропії, поверхонь рефракції і хвильових поверхонь. Одержані результати представлені у вигляді стереопроєкцій ізоліній індикатрис фазових швидкостей (квазіпоздовжньої, «швидкої» і «повільної» квазіпоперечних), кутів відхилення векторів пружних зміщень квазіпоздовжніх хвиль від напрямку хвильової нормалі та коефіцієнтів диференціальної пружної анізотропії (Рис.3.2).

Таблиця 3.1

Пружні сталі ( $C_{mn}$ , ГПа – в чисельнику) і пружні податливості ( $S_{mn}$ , ГПа<sup>-1</sup> в знаменнику) осадових відкладів у робочій системі координат (РСК) і стандартній акустичній системі координат (САСК) за результатами інверсії сейсмічних даних.

Матричні індекси, mn	Піщано-глинисті відклади		Глинисті відклади		Карбонатні відклади	
	РСК	САСК	РСК	САСК	РСК	САСК
11	<u>9.15</u> 280.9	<u>9.18</u> 255.2	<u>9.16</u> 238.5	<u>8.82</u> 238.2	<u>17.79</u> 86.7	<u>17.79</u> 86.7
22	<u>10.00</u> 141.1	<u>9.41</u> 233.0	<u>10.04</u> 135.5	<u>9.57</u> 175.4	<u>14.00</u> 95.7	<u>14.00</u> 95.7
33	<u>7.34</u> 438.5	<u>7.14</u> 506.7	<u>7.28</u> 379.4	<u>7.02</u> 398.0	<u>13.85</u> 134.0	<u>13.85</u> 134.0
44	<u>0.62</u> 1837.9	<u>0.87</u> 1609.1	<u>0.71</u> 1507.6	<u>0.94</u> 1330.2	<u>3.47</u> 288.2	<u>3.47</u> 288.2
55	<u>0.98</u> 1058.1	<u>1.02</u> 1004.4	<u>0.86</u> 1181.3	<u>0.88</u> 1171.8	<u>3.41</u> 293.3	<u>3.41</u> 293.3
66	<u>1.67</u> 685.3	<u>1.76</u> 700.1	<u>1.52</u> 672.0	<u>1.81</u> 656.3	<u>2.71</u> 369.0	<u>2.71</u> 369.0
12	<u>1.99</u> 53.9	<u>2.25</u> 53.8	<u>1.90</u> 41.0	<u>2.37</u> 24.0	<u>5.00</u> -2.5	<u>5.00</u> -2.5
13	<u>6.14</u> -269.3	<u>5.92</u> -245.5	<u>5.81</u> -217.4	<u>5.55</u> -197.4	<u>9.30</u> -5.7	<u>9.30</u> -5.7
23	<u>4.01</u> -125.6	<u>4.36</u> -216.5	<u>3.95</u> -109.4	<u>4.28</u> -140.9	<u>7.00</u> -4.7	<u>7.00</u> -4.7
14	<u>0.10</u> 104.4	<u>-0.74</u> 33.4	<u>0.29</u> 98.7	<u>-0.73</u> 43.9	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
15	<u>0.03</u> 53.2	<u>-0.01</u> -16.4	<u>0.04</u> 28.6	<u>0.09</u> -22.1	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
16	<u>-0.38</u> 94.0	<u>0.29</u> 48.2	<u>0.15</u> -1.9	<u>0.79</u> -35.8	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
24	<u>-0.17</u> 88.5	<u>0.82</u> -294.2	<u>-0.02</u> 50.4	<u>0.56</u> -138.2	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
25	<u>0</u> 27.7	<u>-0.11</u> -5.1	<u>-0.14</u> 37.3	<u>0.05</u> -23.8	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
26	<u>0</u> 32.7	<u>-0.81</u> 158.8	<u>-0.02</u> 9.1	<u>-0.76</u> 70.8	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
34	<u>0.21</u> -194.6	<u>-0.47</u> 272.1	<u>0.32</u> -169.0	<u>-0.54</u> 141.4	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
35	<u>0.16</u> -88.4	<u>-0.06</u> 30.3	<u>0.14</u> -66.6	<u>-0.01</u> 36.5	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
36	<u>0.06</u> -114.2	<u>0.46</u> -198.0	<u>0.20</u> -17.6	<u>0.43</u> -42.3	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
45	<u>-0.05</u> 166.1	<u>0.04</u> -36.3	<u>0.02</u> -10.7	<u>0.03</u> -74.9	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
46	<u>-0.26</u> 329.8	<u>0.02</u> -226.4	<u>0.13</u> -116.1	<u>-0.37</u> 168.6	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
56	<u>-0.13</u> 123.5	<u>0.19</u> -115.6	<u>-0.05</u> 46.2	<u>0.18</u> -140.8	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
Пружна симетрія	Планальна триклінна		Планальна триклінна		Аксіальна ромбічна	
A, %	21.6	21.6	21.92	21.98	13.08	13.08
Густина, г/см <sup>3</sup>	2.300		2.193		1.986	

Примітка: 1 ГПа<sup>-1</sup>=10<sup>-13</sup>дин/см<sup>2</sup>; A – Інтегральний коефіцієнт пружної анізотропії.

Як видно із наведених даних, стереопроєкції ізоліній всіх без виключення параметрів азимутальної анізотропії пружних хвиль строго узгоджуються із типом пружної симетрії осадових товщ.

В товщах піщано-глинистих і глинистих порід триклінної симетрії маємо три акустичні осі, при цьому дві чітко локалізовані, а одна утворює витягнуту область (Рис. 3.2, в).

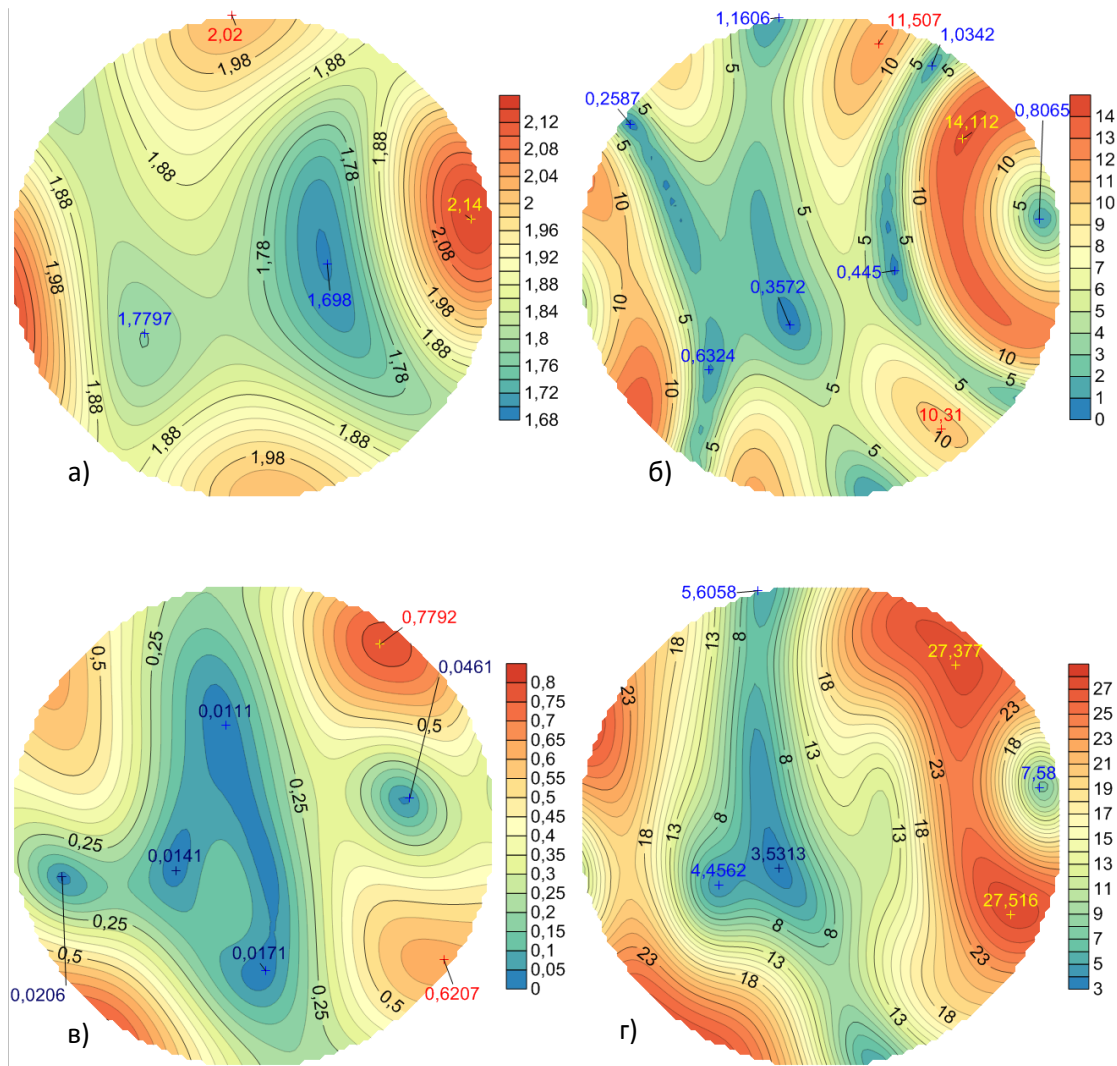


Рис.3.2. Стереопроєкції розподілу величин для нахиленої глинистої товщі:

а) індикатриси квазіпоздовжньої хвилі, ізолінії в км/с; б) кутів відхилення вектора пружних зміщень квазіпоздовжньої хвилі від хвильової нормалі, ізолінії в градусах; в) ізоліній різниці між величинами фазових швидкостей «швидкої» та «повільної» квазіпоперечних хвиль, ізолінії в км/с; г) ізоліній диференціального коефіцієнта пружної анізотропії, ізолінії в %.

Для аналізу закономірностей розповсюдження сейсмічних хвиль в азимутальних анізотропних осадових товщах важливе значення мають поверхні рефракції і хвильові поверхні. Між цими поверхнями існує тісний закономірний взаємозв'язок. Зокрема, наявність опуклості на поверхні рефракції спричиняє відповідно опуклість на хвильовій поверхні. Для того, щоб зрозуміти, до яких наслідків приводить ввігнутість поверхні рефракції, необхідно прийняти до уваги

той факт, що вектор променевої швидкості перпендикулярний до поверхні рефракції.

Як видно із наведених даних (Рис. 3.3), форма розтинів координатною площиною поверхонь рефракції на координатні площини добре узгоджується із пружною симетрією осадових товщ: планальна триклінна і аксіальна ромбічна.

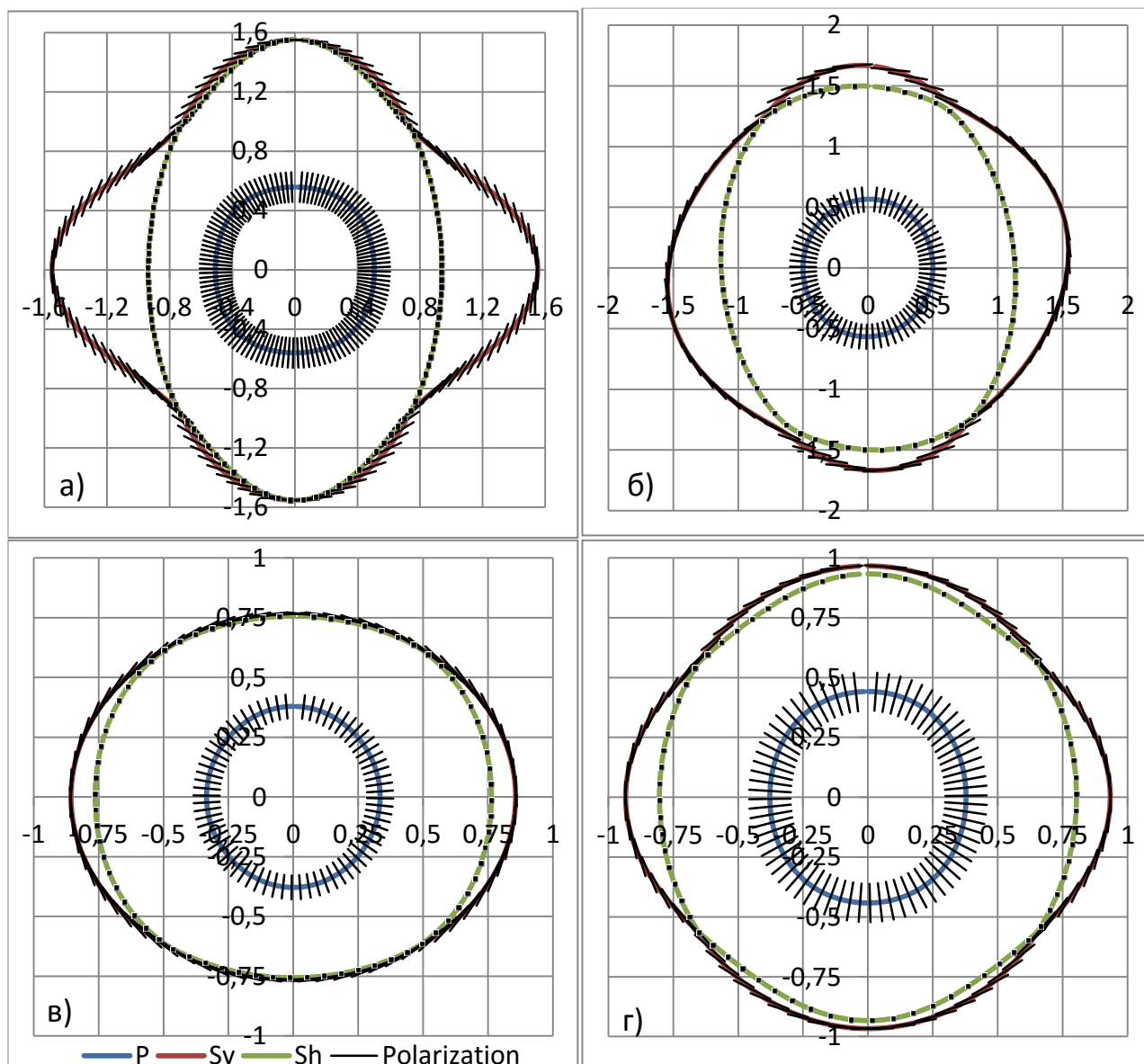


Рис. 3.3. Розтин поверхні повільності  $P$  – квазіпоздовжньої хвилі,  $Sv$  – «повільної» квазіпоперечної хвилі,  $Sh$  – «швидкої» квазіпоперечної хвилі координатною площиною  $X_1X_3$  (Polarization – напрямком поляризації) для: а) піщано-глинистої товщі планальної триклінної симетрії; б) глинистої товщі планальної триклінної симетрії; в) карбонатної товщі аксіальної ромбічної симетрії; г) глинистого сланцю П'єре на глибині 228.6 м.

У розділі 4 розглядається вплив симетрії шару на форму площинного годографа квазіпоздовжньої хвилі для товстошарової моделі, пружні сталі якої відповідають реальним даним, що визначені сейсмічними методами в осадових товщах порід у природньому заляганні. Описуються і опробовуються алгоритми і програма чисельних розрахунків площинних годографів відбитих квазіпоздовжніх

хвиль шаруватого середовища триклінної симетрії. Розглянуто вплив пружної симетрії на карту ізохрон негіперболоїдної кінематичної поправки.

Як показано в розділі 3, пружні сталі товщі глинистих і піщано-глинистих осадових порід мають планальну триклінну симетрію, а їх інтегральні коефіцієнти пружної анізотропії сягають величини майже 22%. Пружна симетрія карбонатної товщі задовольняє аксіальній ромбічній симетрії, а її коефіцієнт пружної анізотропії має величину більше 13%. Наявність такої значної азимутальної анізотропії значно ускладнює проведення таких найбільш важливих кроків обробки та інтерпретації сейсмічних даних, як корекція нормального приросту часу (NMO), аналіз швидкостей, міграція, AVO-аналіз.

І. Цванкін та Л. Томсен побудували загальне рівняння негіперболоїдної кінематичної поправки, яка базується на NMO (нуль-офсетній) швидкості  $V_{\text{NMO}}$  та біквдратному коефіцієнтові кінематичної поправки  $A_4$  функції  $t^2(x^2)$ . Поведінка негіперболоїдної поправки стає набагато складнішою, а вибір методу оцінки  $V_{\text{NMO}}$  неоднозначним, якщо середовище має сильну азимутальну сейсмічну анізотропію. Складність їх застосування обумовлена залежністю біквдратної поправки  $A_4$  від азимуту, так як азимутальна залежність  $V_{\text{NMO}}$  – еліпс, що описується трьома параметрами,  $A_4$  визначається п'ятьма величинами, коректна оцінка азимутальної залежності променевої швидкості залишається проблематичною.

У випадку азимутальної анізотропії задача відбиття-заломлення сейсмічних хвиль є суттєво тривимірною. Це обумовлено наявністю двох типів хвиль: фазової, напрямок якої співпадає із хвильовою нормаллю до фронту хвилі, та променевої, яка визначає напрямок розповсюдження потоку енергії хвилі. Вектор пружних зміщень фазової швидкості і вектор хвильової нормалі не колінеарні, а вектор променевої швидкості є не колінеарним із векторами хвильової нормалі і пружних зміщень.

Розроблено алгоритм і програму, які дозволяють автоматизувати процес розрахунків і графічну візуалізацію одержаних результатів. Вхідні дані для розрахунків відбитої хвилі включають пружні сталі  $C_{mn}$  і густину  $\rho$  горизонтально залягаючого товстошаруватого анізотропного середовища потужністю  $h$ . Задається напрямок хвильової нормалі падаючої хвилі  $\vec{n}$  і формують базис локальної системи координат. Оскільки пружні сталі задані в стандартній акустичній системі координат, необхідно здійснити їх перетворення до локальної системи координат. Для цього використовують матричну формулу перетворень пружних сталей:

$$C^{\chi\lambda} = Q_{\mu}^{\chi} Q_{\nu}^{\lambda} C^{\mu\nu}, \quad (4.1)$$

де  $\chi, \lambda, \mu, \nu$  мають значення від 1 до 6. Елементи матриці  $Q_{\mu}^{\chi}$  наведені в таблиці 4.1

Матриця ортогональних перетворень  $C_{i'k}$ :

$$C_{i'k} = \begin{pmatrix} C_{1'1} & C_{1'2} & C_{1'3} \\ C_{2'1} & C_{2'2} & C_{2'3} \\ C_{3'1} & C_{3'2} & C_{3'3} \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

зв'язує «стару» систему координат  $x_i$ , яка побудована на базисі  $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$  – це власні вектори акустичного тензора (стандартна акустична система координат) і «нову»  $x_{i'}$ , яка побудована на базисі  $\vec{e}_{1'}, \vec{e}_{2'}, \vec{e}_{3'}$  – локальна система координат ( $\vec{e}_{1'} \parallel \vec{b}, \vec{e}_{2'} \parallel$



$\vec{a}$ ,  $\vec{e}_{3'}$   $\parallel$   $\vec{q}$ ). Її називають також матрицею косинусів, оскільки кожен її елемент дорівнює косинусу кута між відповідними осями координат:

$$C_{i'k} = \vec{e}_{i'} \cdot \vec{e}_k = \cos(\widehat{x_{i'}, x_k}). \quad (4.3)$$

Таблиця 4.1

Елементи матриці  $Q_\mu^{x'}$ 

$Q_\mu^{x'}$	1	2	3	4	5	6
1`	$C_{2'1}^2$	$C_{2'2}^2$	$C_{2'3}^2$	$2 C_{1'2} C_{1'3}$	$2 C_{1'3} C_{1'1}$	$2 C_{1'1} C_{1'2}$
2`	$C_{3'1}^2$	$C_{3'2}^2$	$C_{3'3}^2$	$2 C_{2'2} C_{2'3}$	$2 C_{2'3} C_{2'1}$	$2 C_{2'1} C_{2'2}$
3`	$C_{3'1}^2$	$C_{3'2}^2$	$C_{3'3}^2$	$2 C_{3'2} C_{3'3}$	$2 C_{3'3} C_{3'1}$	$2 C_{3'1} C_{3'2}$
4`	$C_{2'1} C_{3'1}$	$C_{2'2} C_{3'2}$	$C_{2'3} C_{3'3}$	$C_{2'2} C_{3'3} + C_{2'3} C_{3'2}$	$C_{2'3} C_{3'1} + C_{2'1} C_{3'3}$	$C_{2'1} C_{3'2} + C_{2'2} C_{3'1}$
5`	$C_{3'1} C_{1'1}$	$C_{3'2} C_{1'2}$	$C_{3'3} C_{1'3}$	$C_{3'2} C_{1'3} + C_{3'3} C_{1'2}$	$C_{3'3} C_{1'1} + C_{3'1} C_{1'3}$	$C_{3'1} C_{1'2} + C_{3'2} C_{1'1}$
6`	$C_{1'1} C_{2'1}$	$C_{1'2} C_{2'2}$	$C_{1'3} C_{2'3}$	$C_{1'2} C_{2'3} + C_{1'3} C_{2'2}$	$C_{1'3} C_{2'1} + C_{1'1} C_{2'3}$	$C_{1'1} C_{2'2} + C_{1'2} C_{2'1}$

Чисельні розрахунки фазових швидкостей квазіпоздовжніх хвиль і векторів їх поляризації для заданого напрямку хвильової нормалі здійснюють модифікованим методом обертання Якобі. Власні значення і власні вектори тензора Кристофеля  $\Lambda_{ij}(\vec{n})$  знаходять методом обертання, який забезпечує абсолютну стійкість і швидку збіжність ітераційного процесу, на який не впливає виродження матриці тензора Кристофеля. Визначення векторів пружних зміщень і фазової швидкості забезпечує чисельні розрахунки векторів рефракції, променевої швидкості та променевих кутів хвиль у локальній системі координат.

Для розв'язання рівняння рефракції застосовується метод Лагерра. Алгоритм цієї розробленої автором підпрограми ґрунтується на наступних співвідношеннях для полінома 6-го ступеня із дійсними коефіцієнтами:

$$P_6(x) = (x - x_1)(x - x_2) \dots (x - x_6);$$

$$\ln(P_6(x)) = \ln(x - x_1) + \ln(x - x_2) + \dots + \ln(x - x_6);$$

$$\frac{d \ln(P_6(x))}{dx} = \frac{1}{x-x_1} + \frac{1}{x-x_2} + \dots + \frac{1}{x-x_6} = \frac{P_6'}{P_6} = G; \quad (4.4)$$

$$-\frac{d^2 \ln(P_6(x))}{dx^2} = \frac{1}{(x-x_1)^2} + \frac{1}{(x-x_2)^2} + \dots + \frac{1}{(x-x_6)^2} = \left(\frac{P_6'}{P_6}\right)^2 - \frac{P_6''}{P_6} = H.$$

Якщо корінь  $x_1$  знаходиться на відстані  $\zeta$  від поточного наближення, то припускають, що всі інші корені знаходяться на відстані  $\chi$ :

$$x - x_1 = \zeta; \quad x - x_i = \chi, \quad i = 2, 3, \dots, 6; \quad (4.5)$$

$$\text{тоді} \quad \frac{1}{\zeta} + \frac{n-1}{\chi} = G; \quad \frac{1}{\zeta^2} + \frac{n-1}{\chi^2} = H; \quad n = 6; \quad (4.6)$$

$$\text{звідки} \quad \zeta = \frac{n}{G \pm \sqrt{(n-1)(nH-G^2)}}. \quad (4.7)$$

Знак у формулі (4.7) перед коренем вибирають таким чином, щоб одержати найбільше значення знаменника. Ітераційний процес побудований таким чином, щоб забезпечити наперед задану точність визначення коренів поліному, тобто, компонентів векторів рефракції відбитих і заломлених хвиль. Чисельні розрахунки часу розповсюдження відбитої хвилі здійснюють із заданим кроком по заданому азимутальному ( $0^\circ$ - $360^\circ$ ) і полярному куту ( $0^\circ$ - $70^\circ$ ), і результати виводяться у форматі, який забезпечує побудову поля ізохрон площинного годографа відбитої хвилі в системі графічної візуалізації Surfer.

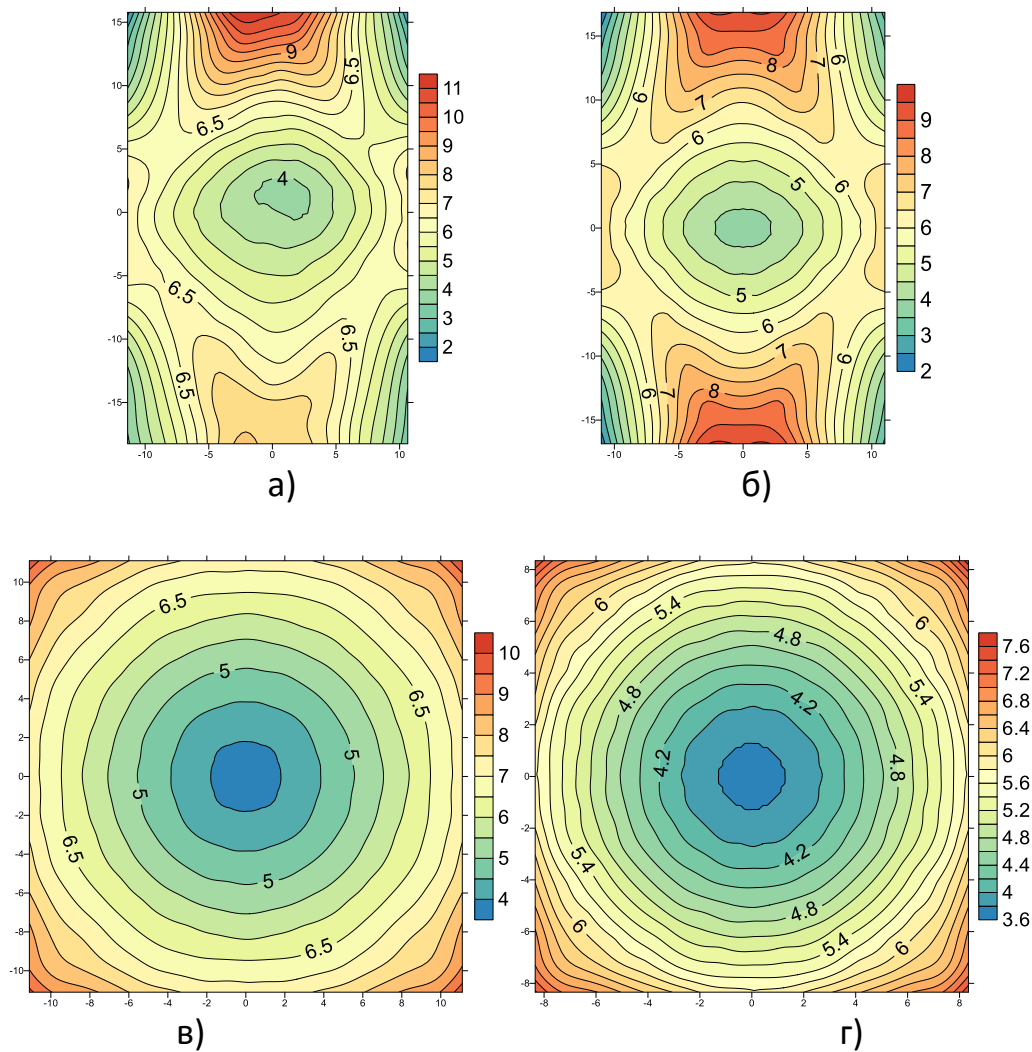


Рис. 4.2. Карты ізохрон поверхневого годографа квазіпоздовжньої хвилі горизонтально залягаючої глинистої товщі для:

- а) триклінної симетрії та найближчих за пружними властивостями до неї  
 б) ромбічної симетрії; в) поперечно-ізотропної симетрії; г) ізотропної симетрії.

Як видно із наведених результатів чисельних розрахунків (рис. 4.2), симетрія карт ізохрон площинних годографів для горизонтально шаруватої глинистої товщі строго відповідає симетрії пружних сталей розглянутих моделей. Для моделей триклінної і ромбічної симетрії карти ізохрон площинних годографів мають азимутальний характер залежності, розташування екстремальних значень підпорядковане наявним елементам симетрії, зокрема для моделей ромбічної симетрії – площинам симетрії і осям другого порядку.

Область найменших значень часу розповсюдження хвилі тяжіє, як і очікувалось, до координат місця розташування джерела сейсмічних коливань, але форма ізохрон асиметрична відносно точки  $O$  і це є результатом впливу асиметризації, обумовленої триклінною симетрією глинистої товщі (Рис. 4.2, а). Відповідно, екстремальні точки ізохрони, які характеризують максимальні величини часу приходу квазіпоздовжньої хвилі для глинистої товщі триклінної симетрії, також розташовуються різко асиметрично.

Апроксимація пружних сталей триклінної симетрії глинистої товщі найближчою до них ромбічною симетрією призводить до симетризації карти

ізохрон, а екстремальні значення ізохрон строго симетрично розташовуються відносно елементів ромбічної симетрії (Рис. 4.2, б). Ще яскравіше це проявляється для поперечно-ізотропної (Рис. 4.2, в) та ізотропної (Рис. 4.2, г) моделей.

Карта ізохрон негіперболоїдних поправок для моделі триклінної симетрії глинистої товщі також має асиметричний азимутальний характер (Рис. 4.3, а).

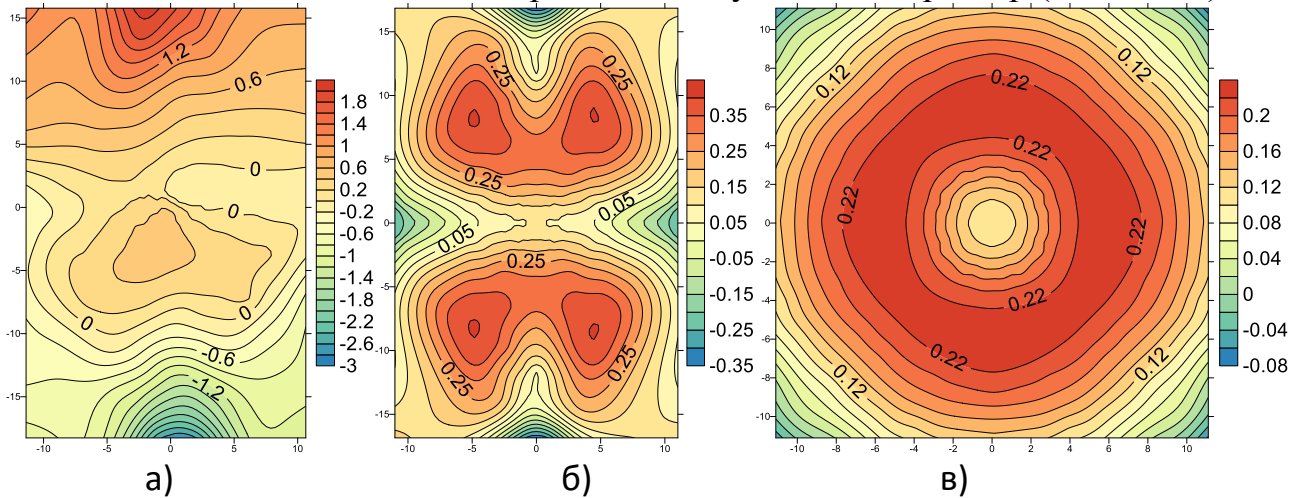


Рис. 4.3. Карты ізохрон негіперболоїдної поправки для горизонтально залягаючої глинистої товщі:

а) триклінної симетрії; б) ромбічної симетрії; в) поперечно-ізотропної симетрії.

Негіперболоїдні поправки мають як додатній, так і від'ємний знак, а азимутальний характер карт ізохрон виявляється надзвичайно складним. Найменші величини відхилення не тяжіють, як очікувалось, до координат місцерозташування джерела. В той же час, для ромбічної моделі очевидна симетризація карти ізохрон гіперболоїдних поправок (Рис. 4.3, б). Причому в площині симетрії, яка перетинає місце розташування джерела коливань, спостерігаються найменші відхилення від гіперболоїда (до 0.1 с). Але в іншій площині симетрії, яка ортогональна до неї, навпаки, відхилення сягають величини більше 0.35 с. Максимальні величини негіперболоїдних поправок локалізовані вздовж чотирьох екстремумів, симетрично розташованих відносно площин симетрії.

Найбільш яскрава симетризація карти ізохрон негіперболоїдної поправки спостерігається для моделі поперечно-ізотропної апроксимації пружних сталей глинистої товщі триклінної симетрії (Рис. 4.3, в). В околиці джерела спостерігаються величини негіперболоїдних поправок від 0.1 с і вище.

## ВИСНОВКИ

1. Наведені результати дослідження пружної анізотропії основних глинистих мінералів. Побудовані стереопроєкції ізоліній квазіпоздовжньої, «швидкої» і «повільної» квазіпоперечних хвиль та диференціального коефіцієнта пружної анізотропії. Показано, що значення коефіцієнтів пружної анізотропії для основних глинистих мінералів досягають десятків процентів, а у деяких випадках і до 55% (каолінит).

2. Вперше шляхом інверсії променевих і фазових індикатрис квазіпоздовжніх і квазіпоперечних хвиль осадової товщі, які здобуто методом ВСП, визначена симетрія і повний набір компонент тензорної матриці пружних сталей осадових

порід. Симетрія тензорної матриці пружних сталих піщано-глинистої і глинистої товщі виявилася планальною триклінною, а карбонатної та глинистого сланцю – аксіальною і планальною ромбічною. Величина інтегрального коефіцієнта пружної анізотропії глинистої товщі сягає майже 22%.

3. Вперше за даними польових та свердловинних сейсмічних спостережень встановлено параметри азимутальної анізотропії технічних динамічних модулів пружності осадових товщ різного літологічного складу. Виявлено широкі межі коливань коефіцієнта Пуассона в межах однієї товщі та складний характер просторових змін усіх модулів пружності. Одержані числові значення девіатора тензора лінійної стисливості свідчать про значні зміни об'єму осадової товщі при дії напруг.

4. Розроблено і апробовано алгоритм і програму чисельних розрахунків поверхневих годографів для горизонтально-шаруватого середовища триклінної симетрії. Розраховані негіперболоїдні поправки до поверхневих годографів при різних варіантах симетрії глинистої товщі.

5. Вперше на реальних пружних сталих для товщі глин встановлено, що симетрія карти ізохрон площинного годографа горизонтально шаруватого середовища строго відповідає пружній симетрії глинистого шару.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Продайвода Г.Т. Математичне моделювання сейсмічного хвильового поля геологічного середовища з однонаправленою системою тріщин / Г. Т. Продайвода, **А.С. Вижва** Вісник Київського університету “Геологія”. – 2010. – Вип. 49. – С. 4–6.

2. Продайвода Г.Т. Пружна симетрія і параметри азимутальної анізотропії сейсмічних хвиль осадової товщі за даними методу вертикального сейсмічного профілювання / Г.Т.Продайвода, П.М.Кузьменко, **А. С. Вижва** // Доповіді Національної академії наук України, 2014, №11. – С. 109-115.

3. Prodayvoda G.T. Elastic properties of some clay minerals / S.A. Vyzhva, G.T. Prodayvoda., **A. S. Vyzhva** // *Nafta-Gaz*, NR 11/2014, p. 743-756.

4. Продайвода Г.Т. Чисельні розрахунки пружних сталих осадових порід у триклінному наближенні за даними вертикального сейсмічного профілювання / Г.Т. Продайвода, П.М. Кузьменко, **А. С. Вижва** // *Геофизический журнал*, т. 37, №3 2015, с. 102-123.

5. Продайвода Г. Моделювання годографу відбитих хвиль для сильно анізотропного геологічного середовища з горизонтальною границею / Продайвода Г., Кузьменко П., **Вижва А.** // Вісник Київського університету. Геологія. – 2016. – Вип. 1(72). – С. 35–42.

6. **Vyzhva A. S.** Elastic Properties of Clay Minerals / A. S. Vyzhva // 73rd EAGE Conference & Exhibition incorp SPE EUROPEC 2011 Vienna, Austria, 23-26 May 2011.

7. Prodayvoda G.T. Quantitative Estimation Method of Clay Minerals Elastic Constants / G.T. Prodayvoda, S.A. Vyzhva, **A. S. Vyzhva** // 74th EAGE Conference & Exhibition. Incorporating SPE EUROPEC 2012: pp. 2125-2129. Code 111841.

8. Prodayvoda G.T. Anisotropy Parameters of Rock-forming Clay Minerals Elastic Waves / G.T. Prodayvoda, S.A. Vyzhva, **A. S. Vyzhva** // 75th EAGE Conference & Exhibition. Incorporating SPE EUROPEC 2013: Changing Frontiers 2013, Pages 6270-

6272. Code 111871.

9. Продайвода Г.Т. Результати чисельних розрахунків пружних сталих осадових порід в триклінному наближенні за даними сейсмічних спостережень / Г.Т.Продайвода, П.М.Кузьменко, А.С.Вижва // XIII Міжнародна конференція Геоінформатика – теоретичні і прикладні аспекти. Київ, 2014.

<http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=74936>

10. Заявка на винахід № а 2015 02657 від 23.03.2015 «Сейсмічний спосіб визначення акусто-пружних характеристик гірських порід для задач пошуків і розвідки родовищ вуглеводнів».

### АНОТАЦІЯ

**Вижва А.С. Інваріантно-поляризаційний метод визначення пружних постійних та симетрії гірських порід за даними ВСП. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22 – геофізика. – Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, 2016.

Робота присвячена вирішенню актуальної задачі – розробці сейсмічного методу дослідження анізотропії і пружної симетрії реального геологічного середовища.

Проведено узагальнення та аналіз параметрів анізотропії пружних хвиль породоутворюючих глинистих мінералів в поперечно-ізотропному наближенні.

Шляхом інверсії променевих і фазових індикатрис квазіпоздовжніх і квазіпоперечних хвиль осадової товщі за даними методу ВСП, визначена симетрія і повний набір компонент тензорної матриці пружних сталих осадових порід.

За даними польових сейсмічних спостережень в природному заляганні встановлено параметри азимутальної анізотропії динамічних модулів пружності осадових товщ різного літологічного складу.

Розроблено і апробовано алгоритм і програму чисельних розрахунків поверхневих годографів для горизонтально-шаруватого середовища триклінної симетрії. Розроблено метод оцінки кінематичної поправки за негіперболоїдність поверхневого годографа відбитої хвилі.

**Ключові слова:** пружні постійні, сейсмічна анізотропія, годограф, негіперболоїдна поправка, інваріантно-поляризаційний метод.

### АННОТАЦИЯ

**Выжва А.С. Инвариантно-поляризационный метод определения упругих постоянных и симметрии горных пород по данным ВСП. - Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 04.00.22 - геофизика. - Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, 2016.

Работа посвящена решению актуальной задачи - разработке сейсмического метода исследования анизотропии и упругой симметрии для реальной геологической среды.

Проведено обобщение и анализ параметров анизотропии упругих волн пороодообразующих глинистых минералов в поперечно-изотропном приближении.

Путем инверсии лучевых и фазовых индикатрис квазипродольных и квазипоперечных волн осадочной толщи, полученных методом ВСП, определена симметрия и полный набор компонент тензорной матрицы упругих постоянных осадочных пород. Симметрия тензорной матрицы упругих постоянных песчано-глинистой и глинистой толще оказалась планальной триклинной, а карбонатных пород и глинистого сланца - аксиальной и планальной ромбической.

По данным полевых и скважинных сейсмических наблюдений установлено параметры азимутальной анизотропии технических динамических модулей упругости для осадочных толщ различного литологического состава. Выявлено широкие пределы колебаний коэффициента Пуассона в пределах одной толщи и сложный характер пространственных изменений всех модулей упругости. Полученные числовые значения девиатора тензора линейной сжимаемости свидетельствуют о значительных изменениях объема осадочной толще при действии напряжений.

Разработан и апробирован алгоритм и программа численных расчетов поверхностных годографов для горизонтально-слоистой среды триклинной симметрии. Показано, что задача построения годографа отраженной волны является чисто трехмерной. Разработан метод оценки кинематической поправки за негиперболоидность поверхностного годографа отраженной волны.

**Ключевые слова:** упругие постоянные, сейсмическая анизотропия, годограф, негиперболическая поправка, инвариантно-поляризационный метод.

## SUMMARY

**Vyzhva A.S. Invariant-polarization method for determining the elastic constants and rocks symmetry according to the VSP data. - Manuscript.**

Thesis for a PhD degree in physics and mathematics, specialty 04.00.22 - geophysics. - The Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2016.

The work is devoted to solve the actual problem: development of seismic method to research the anisotropy and symmetry of real geological medium with any symmetry.

The generalization and analysis was carried out of elastic wave anisotropy parameters for rock-forming clay minerals in the transversely isotropic approximation.

The symmetry and the full component set of elastic constants tensor matrix were defined for sedimentary rocks by inversion of phase and radial indicatrices of quasi-longitudinal and quasi-shear waves in sedimentary strata according to the VSP data.

The azimuthal anisotropy parameters of dynamic elastic modulus were obtained for sedimentary rocks with different lithology based on field seismic survey data.

The algorithm and application of hodograph surface numerical calculation was developed and tested for horizontally-layered medium with triclinic symmetry. The assessment method of kinematic corrections was developed for non-hyperbolic hodograph surface of reflected wave.

**Keywords:** elastic constants, seismic anisotropy, hodograph, non-hyperbolic correction, invariant-polarization method.