

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ГЕОФІЗИКИ ІМ. С.І. СУББОТІНА**

**ВЕРПАХОВСЬКА ОЛЕКСАНДРА ОЛЕГІВНА**

**УДК 550.834**

**ФОРМУВАННЯ ГЛИБИННОГО ЗОБРАЖЕННЯ  
СЕРЕДОВИЩА З ЗАСТОСУВАННЯМ КІНЦЕВО-РІЗНИЦЕВОЇ  
МІГРАЦІЇ ЗА ДАНИМИ РЕГІОНАЛЬНОЇ СЕЙСМОРОЗВІДКИ**

**Спеціальність 04.00.22 – Геофізика**

**АВТОРЕФЕРАТ  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук**

**Київ – 2016**

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України

**Науковий консультант:** доктор фіз.-мат. наук,  
старший науковий співробітник,  
**Пилипенко Віталій Миколайович,**  
Інститут геофізики ім. С.І.Субботіна  
НАН України,  
головний науковий співробітник

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук,  
професор,  
**Тяпкін Юрій Костянтинович,**  
ООО «Юг-Нефтегазгеология»,  
науковий консультант, м.Київ

доктор геологічних наук,  
**Лісний Георгій Дмитрович,**  
ТОВ "Тутковський інтегровані рішення",  
заступник генерального директора з наукової роботи,  
м. Київ

доктор фізико-математичних наук,  
**Маслов Борис Петрович,**  
Інститут механіки ім.С.П.Тимошенка НАН України,  
головний науковий співробітник, м.Київ

Захист відбудеться “ 12 ” жовтня 2016 р. о 10.00 годині  
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.200.01 при Інституті  
геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України за адресою:  
03680, м. Київ-142, пр. Палладіна, 32.

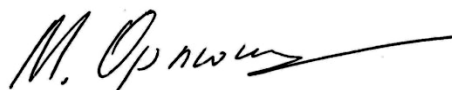
Факс: (044) 450-25-20

E-mail: rada-igph@igph.kiev.ua

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту геофізики  
ім. С.І. Субботіна НАН України та на електронному ресурсі  
[http: //www.igph.kiev.ua](http://www.igph.kiev.ua)

Автореферат розісланий “ 12 ” вересня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
доктор геологічних наук



М.І. Орлюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Метою обробки та інтерпретації даних, отриманих при проведенні наземних чи морських сейсмічних спостережень, є вивчення глибинної будови району досліджень з визначенням просторового розташування цільових горизонтів та об'єктів розвідки, зокрема покладів вуглеводнів, що є дуже важливим на сучасному етапі становлення енергетичної незалежності України.

Глибинне зображення геологічного середовища з наявними в ньому структурними особливостями при обробці сейсмічних даних можна отримати шляхом трансформації безпосередньо спостереженого хвильового поля або міграції. Сформована з застосуванням процедури міграції наглядна «картина» розрізу значно полегшує подальший етап інтерпретації сейсмічних даних для отримання якомога детальнішої інформації про глибинну будову району досліджень. Тому розвиток нових підходів в реалізації міграційних перетворень спостереженого хвильового поля в різному діапазоні відстаней від джерела збудження коливань, що дозволяють коректно відобразити геологічну будову середовища з усіма наявними в ньому порушеннями, є актуальною темою сучасної сейсморозвідки.

Зареєстроване хвильове поле вміщує різні типи хвиль, але у більшості випадків застосування міграції базується на виділенні, слідкуванні та обробці відбитих хвиль. Однак запис відбиттів обмежений певним інтервалом відстаней від джерела коливань. В той же час у сейсморозвідці існують системи спостережень (наприклад, ГСЗ або зарубіжний аналог – WARRP), які відносяться до регіональної сейсморозвідки і при яких хвильове поле реєструється на значних відстанях від джерела збудження. Згадані системи спостережень, як правило, мають значні порушення в регулярності розміщення як джерел, так і сейсмоприймачів. За таких умов спостережень відбиті хвилі важко, а й іноді навіть і неможливо, виділити та чітко прослідкувати на зареєстрованому хвильовому полі. Таким чином дані, отримані за системою спостережень регіональної сейсморозвідки, потребують при обробці залучення інших типів хвиль.

На значних віддалях від джерела коливань у хвильовому полі добре фіксуються у перших вступях рефраговані хвилі. При цьому їх поширення в геологічному середовищі пов'язано з певними особливостями, які потребують урахування при розробці як теоретичного базису міграційних перетворень, так і методики їх застосування. Крім того, актуальним питанням при обробці даних сейсморозвідки є визначення підходів до виділення на спостереженому хвильовому полі інтервалу реєстрації певного типу хвиль, які будуть корисними при формуванні глибинного зображення району досліджень.

У якості рефрагованих хвиль дуже часто приймають так звані головні хвилі (або хвилі Мінтропа), теорія поширення яких базується на припущенні їх ковзання вздовж границі, на якій відбувається різка зміна швидкості, не перетинаючи її. В той же час природа рефрагованих хвиль значно складніша і передбачає їх проникнення в товщу з більшою швидкістю і поширення в ній на протязі деякого часу. Врахування повної траєкторії рефрагованих хвиль, як показує досвід автора, дозволяє відтворити будову не лише границі рефракції, а й прилеглої до неї нижньої товщі з присутніми в ній різного роду порушеннями.

За властивостями хвильового поля, на яких базується міграція, вона підрозділяється на кінематичну та динамічну. Кінематична міграція використовує промені і годографи хвиль, а також хвильові фронти та оперує часом поширення хвиль у середовищі, що дозволяє отримати значення швидкості для покриваючої товщі та товщі, де відбувається рефракція, а також глибинне положення контрастної за швидкістю границі, що в загальному вигляді відображує спрощену модель двошарового середовища. Динамічна міграція пов'язана з амплітудно-частотними та фазовими характеристиками хвильового поля і передбачає побудову зображення глибинного розрізу з наявними в ньому границями розділу і особливостями тектонічної будови району досліджень при безпосередній трансформації спостереженого хвильового поля.

За теоретичним базисом всі сучасні варіанти динамічної міграції вирізняються за методом розв'язку хвильового рівняння, а також визначенням кінематичної умови формування зображення середовища. Існує три основні методи вирішення хвильового рівняння при міграції: за допомогою інтеграла Кірхгофа, з застосуванням різних перетворень в спектральну область та кінцево-різницеvim методом. Крім того, сучасні методи міграції хвильових полів використовують різні комбінації основних підходів.

Кінцево-різницеvim метод дозволяє задавати швидкісну модель середовища в дискретній формі, а, отже, може бути задіяний при дослідженні будь-яких складнобудованих об'єктів сейсмозвідки, а також передбачити різку зміну швидкості на границі розділу. Крім того, кінцево-різницева міграція вважається найбільш стійким та точним інструментом формування зображення середовища безпосередньо за спостереженим хвильовим полем, що доведено в процесі досліджень автора як теоретичними обґрунтуваннями, так і практичним застосуванням розроблених програм при обробці модельних та реальних сейсмічних даних. Всі ці переваги особливо важливі при обробці рефрагованих хвиль, тому в своїх розробках та дослідженнях автором було зосереджено увагу саме на варіанті кінцево-різницевої міграції.

Для виконання динамічної міграції апріорна швидкісна модель середовища повинна бути відома. Такі дані, як правило, визначаються завдяки застосуванню методу сейсмічної томографії або трасування променів. В той же час пошук можливості отримання інформації про швидкісну характеристику двошарового середовища для динамічної міграції без залучення додаткових ресурсів є актуальною проблемою обраного автором напрямку досліджень.

У сучасній сейсмозвідці існує загальна тенденція переходу до тривимірних систем спостережень. Це пояснюється необхідністю отримати інформацію про глибинну будову середовища не лише в двовимірному розрізі, як це можливо при обробці даних профільних спостережень, а в тривимірному вигляді з просторовим розміщенням цільових об'єктів сейсмозвідки. Тому одним з актуальних завдань автора було розробити математичний апарат, алгоритм і програмно реалізувати тривимірну кінцево-різницеvu міграцію для обробки даних регіональної сейсмозвідки.

Як дієвий інструмент перевірки практичної коректності використання розроблених методів міграції розглядають моделювання хвильового поля. В той же

час існує нагальна потреба в наявності ефективних методів моделювання хвильового поля у віддаленій зоні джерела збудження. Тому актуальним питанням для даної роботи є розробка кінцево-різницевого моделювання хвильового поля на значних відстанях від пункту збудження як у двовимірному, так і тривимірному варіантах.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Всі дослідження автором виконувалися в рамках робіт за темами *відділу сейсмічної небезпеки*:

«Сейсмические и геофизические наблюдения на платформенной территории Украины в 2004-2008 гг.», № держ. реєстрації 0104U000379. Автором виконувалися розробки алгоритмів та програм динамічної кінцево-різницевої міграції поля рефрагованих хвиль. Було проаналізовано спостережені хвильові поля від усіх наявних пунктів збудження сейсмічного регіонального профілю DOBRE, який був спостережений в районі Дніпровсько-Донецької западини. Визначено три контрастні за швидкістю границі розділу, для кожної з яких отримано зображення з застосуванням динамічної кінцево-різницевої міграції поля рефрагованих хвиль. За трьома зображеннями окремих границь розділу середовища сформовано сумарне глибинне зображення геологічного розрізу до глибини 70 км вздовж профілю DOBRE.

«Сейсмические и геофизические наблюдения на платформенной территории Украины в 2009-2013 гг.», № держ. реєстрації 0109U000100. Автором виконувалися дослідження коректності алгоритмів та програм динамічної міграції поля рефрагованих хвиль при обробці сейсмічних даних частини профілю «Добре-2», який був спостережений в районі Азовського моря.

«Моніторинг хвильових процесів та вивчення будови і динаміки структур, які їх моделюють», (2011р.) № держ. реєстрації 0107U002195. Автором досліджено характер спостереженого хвильового поля, зокрема можливість виділення і слідкування рефрагованих хвиль від досліджуваної границі в залежності від швидкісної моделі середовища.

«Геофізичний моніторинг геодинамічних процесів на території України у зв'язку з вирішенням проблем екологічної та сейсмічної небезпеки» (2012-2016 рр.), № держ. реєстрації 0112U003046. Автором виконувалося вдосконалення алгоритму та програми кінематичної міграції для визначення швидкісної моделі двошарового середовища в широкому діапазоні глибин.

«Геофізичні дослідження будови і динаміки геологічного середовища для зниження небезпеки від загрозливих явищ ендегенного походження на території України та Росії» (2012-2016), № держ. реєстрації 0112U003451. Автором були проведені дослідження в напрямку методики виконання динамічної кінцево-різницевої міграції як поля відбитих, так і поля рефрагованих хвиль з урахуванням особливостей району досліджень (гірські регіони, морські акваторії і т.і.). Апробація методики застосування кінцево-різницевої міграції на модельних прикладах і реальних даних сейсморозвідки.

*відділу сейсмометрії і фізичних властивостей речовини Землі та з 2013 року відділу регіональних проблем геофізики:*

«Розвиток та вдосконалення процедур обробки сейсмічної інформації, електромагнітних методів досліджень свердловин, інтерпретації результатів морських геофізичних спостережень та вивчення в різноманітних термобаричних умовах фізичних параметрів гірських порід з метою підвищення ефективності пошуків родовищ корисних копалин» (2013-2015pp.), № держ. реєстрації 0111U000231. Автор виконує роботу з алгоритмічного і програмного забезпечення моделювання хвильового поля для складних моделей середовища в дальній зоні джерела у двовимірному і тривимірному варіантах.

***В рамках робіт за конкурсною тематикою:***

«Розробка методики та модернізація програмного забезпечення для обробки даних 3D-сейсморозвідувальних спостережень в умовах малоглибинного розрізу та розробка елементів методики інтерпретації, прогнозу газонасиченості порід в умовах тонкошаруватого розрізу Донбасу» цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Використання 3D сейсморозвідки з метою промислового видобування газу та дегазації вугільних пластів» (2008-2012pp.), № держ. реєстрації 0111U003415. Автором розроблено алгоритм тривимірного прямого продовження хвильового поля кінцево-різницевим методом, перевірена стійкість кінцево-різницевих розрахунків з застосуванням спеціального виду просторово-часової сітки і апроксимація хвильового рівняння.

«Вдосконалення програмного забезпечення обробки просторових сейсмічних спостережень з урахуванням особливостей будови приповерхневого геологічного розрізу Донбасу» в рамках цільової комплексної програми наукових досліджень «Використання 3D-сейсморозвідки з метою промислового видобування газу та дегазації вугільних пластів» (2013 – 2015 pp.), № держ. реєстрації 0113U000978. Автором виконувалася розробка алгоритмів кінцево-різницевих методів міграції та моделювання хвильових полів у двовимірному і тривимірному варіантах для дослідження складної будови геологічного середовища. Крім того автором виконувалася перевірка дієздатності розроблених алгоритмів, тестування на модельних та практичних матеріалах.

«Комплексне геофізичне вивчення глибинної будови, складу і еволюції земної кори з метою визначення вуглеводного ресурсного потенціалу Азово-Чорноморського регіону» (2010-2015 pp.), № держ. реєстрації 0111U000231. Автором досліджувалися можливості різних варіантів кінцево-різницевої міграції при формуванні глибинного зображення приповерхневої частини розрізу при обробці профілів, спостережених в Північно-Західній частині Чорного моря. Зокрема було запропоновано і розроблено граф обробки даних морської сейсморозвідки з застосуванням міграції до і після підсумовування трас методом СГТ. Крім того, були виконані дослідження умов планування системи спостережень, за яких можливо спостерігати рефраговані хвилі при виконанні сейсмоакустичних робіт, а також вплив різного діапазону реєстрації коливань від джерела на результати обробки та інтерпретації спостереженого хвильового поля.

***За темою Державного фонду фундаментальних досліджень (ДФФД) Державного агентства з питань науки, інновацій та інформатизації України:***

«Методологія обробки сейсмічних і гравіметричних даних при вивченні земної кори і верхньої мантії Дніпровсько-Донецької западини і Сибірських платформ»

(2011-2012) № Ф 40/33-2011, № дер ж. реєстрації 0111U006649; № Ф 40/96-2012, № дер ж. реєстрації 0112U006026. Автором вдосконалено теоретичний базис і розроблено алгоритм кінематичної міграції поля рефрагованих хвиль з метою отримання апріорної швидкісної моделі двошарового середовища для обробки даних регіональної сейсморозвідки, зокрема даних ГСЗ. Запропоновано підходи до визначення інтервалу спостереженого хвильового поля для формування зображення середовища за полем рефрагованих хвиль. Розроблено варіант моделювання хвильового поля у віддаленій зоні джерела з шаблоном сітки, що рухається. Всі розробки апробовано на реальних даних ГСЗ, спостережених в районі Дніпровсько-Донецької западини.

**Мета** полягає в розробці методики формування глибинного зображення геологічного середовища з використанням кінцево-різницевої міграції поля рефрагованих хвиль як у двомірному, так і тривимірному варіантах при обробці даних регіональної сейсморозвідки, спостережених на значних віддальх від джерела коливань. **Об'єктом досліджень** є хвильове поле, спостережене в різному діапазоні відстаней від джерела при проведенні наземної та морської сейсморозвідки. **Предметом досліджень** є міграційні перетворення сейсмічного хвильового поля в глибинне зображення геологічного середовища. **Методи досліджень.** Кінцево-різницеві методи розв'язку диференційних рівнянь для продовження часового та хвильового полів, які складають теоретичну основу міграційних перетворень та моделювання хвильового поля.

**Основні задачі** досліджень:

1. Аналіз та дослідження динамічних і кінематичних характеристик хвильового поля, зареєстрованого на значних віддальх від джерела коливань, а також теоретичних основ поширення сейсмічних хвиль у середовищі.
2. Визначення підходів до виділення на спостереженому хвильовому полі інтервалу слідкування рефрагованих хвиль, які дозволять сформувати зображення певної контрастної за швидкістю границі.
3. Розробка алгоритму та програмного забезпечення кінематичної міграції поля рефрагованих хвиль з метою застосування при обробці даних малоглибинної сейсморозвідки з різними системами спостережень.
4. Розширення області застосування кінематичної міграції поля рефрагованих хвиль для задачі визначення апріорної швидкісної моделі середовища, необхідної для виконання динамічної міграції поля рефрагованих хвиль. Розробка алгоритму та програмна реалізація кінематичної міграції поля рефрагованих хвиль для обробки даних регіональної сейсморозвідки (ГСЗ) з урахуванням їх особливостей.
5. Перевірка коректності та ефективності застосування кінематичної міграції поля рефрагованих хвиль при обробці даних регіональної сейсморозвідки, спостережених ГСЗ на модельних і практичних прикладах.
6. Вдосконалення теоретичного базису, алгоритму та програм динамічної міграції поля рефрагованих хвиль з метою вивчення складно побудованого геологічного розрізу з урахуванням особливостей рельєфу району досліджень.
7. Розробка методики формування зображення середовища з застосуванням кінематичної та динамічної міграції поля рефрагованих хвиль для обробки даних регіональної сейсморозвідки.

8. Розробка методики формування зображення середовища з урахуванням: складно побудованих границь; наявності двох і більше контрастних за швидкістю границь; недостатньої системи спостережень для формування зображення всього розрізу за полем одного типу хвиль.
9. Розробка теоретичного базису, алгоритму та програмної реалізації тривимірної міграції поля рефрагованих хвиль.
10. Розробка кінцево-різницевого моделювання хвильового поля в дальній зоні джерела як у двовимірному, так і у тривимірному варіантах, як інструмент перевірки практичної коректності застосування міграції поля рефрагованих хвиль.
11. Доведення як математичної коректності теоретичних викладів, так і практичної ефективності і точності формування зображення середовища за полем рефрагованих хвиль на модельних прикладах і реальних даних сейморозвідки.

**Наукова новизна** одержаних результатів:

1. Досліджено критерії та запропоновано спеціальні підходи визначення інтервалу хвильового поля для ефективного застосування міграції поля рефрагованих хвиль при формуванні зображення певної контрастної за швидкістю границі розділу середовища.
2. Вперше створено алгоритми та програмно реалізовано кінематичну міграцію поля рефрагованих хвиль для обробки даних ГСЗ. Доведено коректність як математичних розрахунків, так і практичного застосування на модельних та реальних даних сейморозвідки.
3. Розроблено принципово нову інтерактивну версію програмного пакету обробки даних малоглибинної сейморозвідки з залученням мов об'єктного програмування TCL/TK з спеціальним блоком, який передбачає обробку регіональних даних МЗХ ГСЗ.
4. Вперше запропоновано і розроблено методику сумісного застосування кінематичної і динамічної міграції поля рефрагованих хвиль, яка забезпечує формування глибинного зображення середовища без залучення допоміжних методів і процедур обробки для визначення його швидкісної моделі.
5. Доведено на модельних та реальних даних, спостережених в регіонах з глибинною будовою різного ступеню складності, що застосування розробленої методики дозволяє отримати більш детальний глибинний розріз середовища при формуванні його зображення.
6. Вдосконалено теоретичний базис, алгоритми та програмну реалізацію динамічної міграції поля рефрагованих хвиль для формування зображення складно побудованого геологічного розрізу та з урахуванням особливостей рельєфу району досліджень.
7. Розроблено теоретичний базис, алгоритми та програмно реалізовано тривимірну динамічну міграцію поля рефрагованих хвиль.
8. Математично доведено коректність та стійкість тривимірних продовжень часового та хвильового полів кінцево-різницевим методом.
9. Доведено ефективність тривимірного формування зображення середовища з застосуванням міграції поля рефрагованих хвиль на модельних прикладах.

**Достовірність та обґрунтованість** наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується теоретичною базою досліджень, перевіркою



коректності сформульованих задач, апробацією на модельних та практичних матеріалах, а також успішним використанням отриманих результатів на виробництві.

**Практична цінність.** Розроблена автором з залученням мов об'єктного програмування TCL/TK нова версія пакету інтерактивних програм з автоматизації обробки даних малоглибинної сейсмозв'язки “**ProcTOP**” впроваджена в виробничу експлуатацію в ТОВ НГВК «Кумран» для обробки сейсмічних матеріалів з метою дослідження ЗМШ.

Автором розроблений теоретичний базис, складені алгоритми та написані принципово нові програми кінематичної міграції за полем рефрагованих хвиль для обробки даних як малоглибинної, так і регіональної сейсмозв'язки МЗХ ГСЗ зі значними відстанями реєстрації від джерела. Програми апробовано на значному об'ємі даних, спостережених в різних регіонах України. Результати випробовувань дозволяють говорити про ефективність застосування кінематичної міграції для визначення швидкісної моделі двошарового середовища. Розроблені програми вставлено окремим блоком в програмний пакет “**ProcTOP**”.

З метою обробки як регіональних морських спостережень, так і зареєстрованих на суші сейсмічних даних зі значними відстанями від джерела, з урахуванням коректного теоретичного базису, розроблено алгоритми та виконано програмні реалізації кінцево-різницевого продовжень хвильового і часового полів. Доведена ефективність використання міграції поля рефрагованих хвиль при дослідженні глибинної будови в складних сейсмогеологічних районах. Вперше сформовано глибинне зображення середовища за полем рефрагованих хвиль до глибини 70 км, що дозволило визначити додаткові деталі його будови. Доведена математична коректність кінцево-різницевого продовжень часового і хвильового полів, а також ефективність застосування міграції поля рефрагованих хвиль на модельних та практичних прикладах. Розвинуто метод формування зображення середовища за полем рефрагованих хвиль у тривимірному варіанті.

Завдяки розробленому методу кінцево-різницевого моделювання хвильових полів в дальній зоні джерела як у двовимірному, так і тривимірному варіантах доведена коректність формування глибинного зображення середовища з різним ступенем складності його глибинної будови.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення досліджень доповідалися на наступних наукових конференціях: 12<sup>th</sup> International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and their Margins, Hayama (Japan), 2006; Міжнародна науково-технічна конференція “Прикладна геологічна наука сьогодні: здобутки та проблеми”, Київ, 2007; International Earth Imaging Symposium “Models of the Earth's Crust and Upper Mantle”, 2007, Saint-Petersburg (Russian Federation); The 13<sup>th</sup> International Symposium on “Deep Seismic Profiling of the Continents and Their Margins” SEISMIX2008, 2008, Saariselka (Finland); IX<sup>th</sup> International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, 2010, Kiev; X<sup>th</sup> International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, 2011, Kiev; Современные методы сейсмозв'язки при поисках месторождений нефти и газа в условиях сложнопостроенных структур «Сейсмо-2011», м. Феодосія, (АР Крим, Україна); XI<sup>th</sup> International Conference on Geoinformatics –Theoretical and Applied

Aspects, 2012, Kiev; 12<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO» SGEM2012, 2012, Албена (Болгария); 3-я Международная н.-прак. конференция (Современные методы сейсморазведки при поисках месторождений нефти и газа в условиях сложнопостроенных структур) «Сейсмо-2012», Феодосия (АР Крым); The 15th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and Their Margins (SEISMIX 2012), 2012, Beijing (China); X Міжнародна наукова конференція «Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану середовища», 2012, Київ; XII<sup>th</sup> International Conference on Geoinformatics –Theoretical and Applied Aspects, 2013, Kiev; 4-я Международная н.-прак. конференция «Современные методы сейсморазведки при поисках месторождений нефти и газа в условиях сложнопостроенных структур «Сейсмо-2013»», г.Феодосия (АР Крым); 5-я Международная научно-практическая конференция «Современные сейсмические и другие геолого-геофизические методы при поисках месторождений нефти и газа в условиях сложнопостроенных структур (Сейсмо-2014)», Одесса (Украина); XIV Міжнародна конференція «Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти», 2015, Київ.

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи, опубліковано в 40 наукових публікаціях, з яких 23 наукові статті (3 – без співавторів) і 17 тез доповідей на міжнародних конференціях. Всі наукові статті опубліковані в фахових виданнях і відповідають вимогам ДАК України до наукових публікацій. 20 публікацій опубліковано в журналах, що входять до наукометричної бази Scopus.

**Структура і об'єм дисертації.** Дисертація складається з переліку умовних позначень, вступу, 6 розділів, висновків та списку використаних джерел, який містить 264 найменування наукових робіт. Повний обсяг дисертаційної роботи складає 322 сторінок. Основний обсяг становить 269 сторінок тексту, проілюстрованого 117 рисунками і 1 таблицею.

**Особистий внесок автора.** Автором досліджено та запропоновано нові підходи до визначення інтервалу хвильового поля, який необхідно включати в обробку з застосуванням міграції поля рефрагованих хвиль при формуванні зображення певної контрастної за швидкістю границі [13].

Автором особисто розроблено теоретичний базис, алгоритми та принципово нові програми кінематичної міграції за полем рефрагованих хвиль для обробки даних як малоглибинної сейсморозвідки, так і спостережених методом ГСЗ з урахуванням особливостей їх реєстрації та характеру спостережених хвильових полів [15,20].

За участю автора розвинені теоретичний базис, алгоритми та програмні реалізації кінцево-різницевих продовжень хвильового і часового полів для обробки даних морської і наземної сейсморозвідки в різному діапазоні відстаней від джерела [1,2,4,6,8,11,12,14,16,18,19,22]. Автором розроблені нові підходи до моделювання хвильового поля в дальній зоні джерела на базі прямого продовження хвильового поля з застосуванням сітки різного виду, зокрема з шаблоном, що рухається відповідно до поширення рефрагованих хвиль [3,9,13]. Автором доведена математична коректність кінцево-різницевих продовжень часового і хвильового полів в різному діапазоні відстаней від джерела як у двовимірному, так і тривимірному варіантах [3,5,10,13,17,22,23].

Автором особисто створено новий спеціальний пакет інтерактивних програм з залученням скриптової мови об'єктного програмування TCL/TK для автоматизованої обробки даних малоглибинної сейсморозвідки «ProcTOP» з метою дослідження ЗМШ, який передано до виробничої експлуатації (ТОВ НГДК «Кумран»), що підтверджено актом впровадження [20].

За участю автора створено кінцево-різницеву міграцію поля рефрагованих хвиль і моделювання хвильового поля у віддаленій зоні джерела у тривимірному варіанті [22]. Автором особисто доведена коректність як математичних викладів, так і практичних сформованих глибинних розрізів за допомогою кінцево-різницевого моделювання тривимірному хвильового поля.

Автором самостійно розроблено алгоритм методики застосування міграції поля рефрагованих хвиль, яким передбачено визначення апріорної швидкісної моделі середовища шляхом виконання кінематичної міграції поля рефрагованих хвиль, а далі з урахуванням отриманого результату виконання динамічної міграції, в результаті якої формується глибинне зображення заломлюючої границі за даними регіональної сейсморозвідки [15]. Крім того, автором розроблено методику формування зображення всього глибинного розрізу за полем рефрагованих хвиль, яка передбачає наявність в розрізі двох і більше контрастних за швидкістю границь, формування зображення окремих складних деталей досліджуваної границі, а також у випадку недостатньої системи спостережень формування зображення середовища з сумісним застосуванням міграцій поля рефрагованих і відбитих хвиль [6-8,13,20].

Розроблений автором метод формування глибинного зображення середовища за полем рефрагованих хвиль з використанням кінцево-різницевих продовжень часового і хвильового полів за даними регіональної сейсморозвідки як у двовимірному, так і тривимірному варіантах не має аналогів в сучасній світовій практиці.

Всі авторські програмні розробки реалізовано з використанням спеціалізованого пакету з обробки сейсмічної інформації Seismic Unix (SU). Даний пакет, був розроблений і постійно доповнюється новими програмами в Центрі дослідження хвильових явищ в Колорадо (Center for Wave Phenomena (CWP) at the Colorado School of Mines (CSM)) і є у вільному доступі, що дуже важливо для наукових досліджень. Особливо це стосується можливості візуалізації як двовимірних хвильових полів, так і тривимірних.

Ефективність застосування всіх викладених розробок відносно методики міграції поля рефрагованих хвиль доведена автором самостійно на великому об'ємі модельних прикладів та практичних даних як морської, так і наземної сейсморозвідки, спостережених в різних частинах світу.

Робота починалася в групі під керівництвом доктора фіз.-мат. наук Дядюри В.О., якого автор згадує з щирою вдячністю. Автор висловлює глибоку подяку своєму науковому консультанту Пилипенко В.М. за всебічну підтримку і консультації при виконанні досліджень.

Автор щиро вдячний директору Інституту геофізики НАН України, академіку НАНУ Старостенку В.І. за постійну підтримку на всіх стадіях підготовки роботи.

Дисертант висловлює свою подяку докторам Я.М.Хазану, Коболеву В.П., Шуману В.М. і Єгоровій Т.П. за цінні зауваження і поради при підготовці роботи.

Автор щиро вдячна за всебічну підтримку та багаторічну співпрацю колегам своєї групи Будкевичу В.Б., Ганієву О.З., Пилипенко О.В. та Петренко К.В.

### **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У “**Вступі**” обґрунтовано актуальність теми створення методу формування глибинного зображення середовища за даними регіональної сейсморозвідки у віддаленій зоні джерела, наведені мета роботи, основні задачі та методи їх вирішення, сформульовано основні наукові та практичні досягнення автора, надані відомості про апробацію та публікації результатів досліджень.

У **Розділі 1 “СТАНОВЛЕННЯ СЕЙСМОРОЗВІДКИ МЗХ ТА РОЗВИТОК МЕТОДІВ ОБРОБКИ І ІНТЕРПРЕТАЦІЇ СПОСТЕРЕЖЕНИХ МЗХ ДАНИХ”** викладено основні етапи становлення і розвитку МЗХ як одного з основних методів сейсморозвідки. Показано, що з моменту, коли німецький вчений Мінтроп запатентував свій метод, заснований на перших вступях рефрагованих хвиль, вважаючи, що хвилі не проникають в товщу з більшою швидкістю, а ковзають уздовж поверхні границі [Mintrop, 1949], хвилі Мінтропа або головні хвилі є основою для більшості методів обробки сейсмічних даних з залученням поля рефрагованих хвиль.

Подано загальний огляд сучасних методів міграції, їх поділ на види в залежності від місця в графі обробки; від типу хвиль, що використовуються; від властивостей хвильового поля, які при цьому залучаються; від методу розв’язку хвильового рівняння.

Показано, що серед методів кінематичної обробки поля рефрагованих хвиль переважають методи, що були запропоновані досить давно та базуються на обробці головних хвиль: простежування променів (метод променевого трасування) [Furumura et al., 1998; Saeger, Bohlen, 2004; Cerveny, 2005], метод часових затримок (Delaytime Method - DTM) [Bridle, 2009], метод в термінах часу (time-term method) [Scheidegger and Willmore, 1957; Willmore and Bancroft, 1960; Berry and West, 1966; Meru, 1966; Smith et al., 1966; Yoshii and Asano, 1972; Iwasaki, T., 2002] і метод взаємних часів (плюс- мінус метод) (Reciprocal (Plus - Minus) Method - RM) [Thornburgh, 1930; Edge, Laby, 1931; Різниченко, 1945; Hagedoorn, 1959; Palmer, 1981; Sjogren, B., 2000; Whiteley, Eccleston, 2006; Bridle, 2009].

Одним з найбільш відомих і застосовуваних сучасних кінематичних методів обробки та інтерпретації сейсмічних хвильових полів є сейсмічна томографія [Нолет, 1990; Sheehan et al., 2005]. Теоретичною основою томографії є простежування променів для визначення глибинного положення границь розділу і побудова швидкісної моделі середовища.

При цьому хвиля не поширюється за променем, більш природному її фізичному поширенню в середовищі відповідає хвильовий фронт. Вперше питання про побудову діаграм хвильових фронтів було розглянуто в 1930 р. Торнбергом, але ґрунтовний теоретичний базис побудови хвильових фронтів розробив у 40-х роках двадцятого століття Ю.В. Різниченко. Він запропонував метод полів часу, який являє собою процес відновлення ізоліній часового поля у вигляді огинаючих сімейства елементарних ізохрон. Метод полів часів є теоретичною основою для обробки спостережених хвильових полів, яка за кінематикою найбільш близька природному поширенню хвиль в середовищі. Чисельний варіант методу полів часу,

який був розроблений Пилипенко В.М. [Пилипенко, 1979] на базі кінцево-різницевого розв'язку рівняння ейконалу вирізняється точністю та стійкістю і дозволив в подальшому розвинути кінематичну міграцію поля рефрагованих хвиль [Верпаховська, 2005, 2014]. В нашому розумінні кінематична міграція є методом визначення спрощеної швидкісної моделі двошарового середовища за полем рефрагованих хвиль, який базується на продовженні часового поля шляхом кінцево-різницевого розв'язку рівняння ейконалу для двох зустрічних годографів.

Переходу міграції з кінематичної в динамічну область посприяла робота Ю.В. Тимошина, в якій був запропонований метод формування зображень середовища шляхом інтерференційних перетворень спостереженого хвильового поля з застосуванням інтегралу Кірхгофа. Основними складовими загального алгоритму динамічної міграції є вирішення хвильового рівняння і визначення кінематичної умови для формування зображення середовища. Саме в різниці підходів до їх реалізації і ґрунтується різноманітність існуючих методів динамічної міграції. Дуже поширеним за кордоном варіантом міграції є метод RTM (reverse time migration), який найбільш наближений за теоретичними основами до кінцево-різницевого методу, що був запропонований Пилипенко В.М. [Пилипенко, 1973] і розвивався за участю автор даної дисертації [Пилипенко, Верпаховська, 2000-2015] в Інституті геофізики ім.С.І.Субботіна НАН України. Однак відмінність методу RTM полягає в тому, що при його виконанні використовуються два зустрічні, тобто пряме від джерела і зворотне від приймачів, продовження хвильового поля. В той час як в нашому варіанті міграції передбачено продовження часового поля від джерела і продовження хвильового поля від приймачів.

Аналіз сучасного стану розвитку методів кінематичної та динамічної обробки поля рефрагованих хвиль дозволив визначити, що за обраною автором темою досліджень існує проблема відсутності методів формування зображення середовища у віддаленій зоні джерела за даними ГСЗ (WARRP) з залученням поля рефрагованих хвиль.

Всі існуючі методи міграції з урахуванням рефрагованих хвиль, що пропонуються та розвиваються в сучасній сейсмозв'язці, зводяться до спроб використання теоретичних основ міграції поля відбитих хвиль, зокрема міграції після виконання процедури підсумовування трас методом СГТ [Рослов Ю.В.; Телегин А.Н.; Franco, R. D.; Orlovsky, D. та ін.] та міграції з переходом у спектральну область [Gao, X.J.; Landa, E.; Nowack, R.L. та ін.] і до того ж не передбачають урахування проникнення хвиль у товщу з більшою швидкістю, тобто базуються на головних хвилях. Такі підходи вимагають дотримання регулярності систем спостережень і не дозволяють врахувати особливості поширення рефрагованих хвиль у середовищі, що призводить до втрати детальності міграційного розрізу або до його спотворення. Не врахування проникнення хвиль у товщу з більшою швидкістю значно спрощує теоретичний базис, але призводить як до втрати детальності, особливо при вивченні глибинної будови складно-побудованих середовищ, так і у більшості випадків до спотворення результатів обробки.

Таким чином, огляд існуючих розробок і досягнень в напрямку обраної автором теми, дозволив підтвердити необхідність розвитку методу міграції поля

рефрагованих хвиль для формування зображення глибинної будови за даними регіональної сейсмозвідки при вивченні глибинної будови геологічного середовища, а також підтвердити актуальність сформульованих автором завдань щодо методики його застосування. Крім того, розроблена автором методика формування глибинного зображення середовища за даними регіональної сейсмозвідки з застосуванням міграції поля рефрагованих хвиль не має аналогів в сучасній сейсмозвідці, що підтверджено оглядом літературних джерел.

**Розділ 2 «ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОШИРЕННЯ СЕЙСМІЧНИХ ХВИЛЬ У СЕРЕДОВИЩІ. ДИНАМІЧНІ І КІНЕМАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАРЕЄСТРОВАНОВОГО ХВИЛЬОВОГО ПОЛЯ»** містить результати з аналізу та дослідження сейсмічних хвиль, що реєструються під час вибуху, динамічних і кінематичних характеристик спостереженого хвильового поля, а також теоретичні основи поширення сейсмічних хвиль у середовищі. Розглянуто основні кінематичні і динамічні параметри, що характеризують хвильове поле і на які спирається його обробка. До кінематичних характеристик хвильового поля відносяться параметри, які пов'язані з часом поширення хвиль у середовищі: промені, фронти хвиль, годографи. Сукупність параметрів, що визначають характер коливань часточок середовища в часі і просторі під час поширення хвиль є динамічними характеристиками хвильового поля, основними з яких, що використовуються в сучасній сейсмозвідці є: форма хвилі, тобто залежність величини зміщення часточок середовища від часу; амплітудні і фазові спектри хвилі; амплітуди хвиль; траєкторії руху часточок середовища в просторі або характер поляризації хвилі. Динамічні параметри хвильового поля характеризують коливання в середовищі і пов'язані між собою певними співвідношеннями. Показано, що динамічні характеристики поля, зокрема амплітуди відбитих і рефрагованих хвиль суттєво залежать від швидкісної диференціації середовища. Крім того, на форму запису, спектри і амплітуди хвиль одночасно впливають три основні фактори: а) умови збудження коливань, б) фільтруючі властивості реальних середовищ, зумовлені їх поглинанням, наявністю тонких шарів, а також розсіюванням хвиль на різних порушеннях малого масштабу; в) фільтруючі властивості приймальної апаратури, включаючи і властивості коливальної системи сейсмограф – денна поверхня. Отже, якість спостереженого сейсмічного хвильового поля безпосередньо залежить від системи спостережень, рельєфу і умов будови геологічного середовища.

В даній роботі засобом отримання інформації про глибинну будову земних надр є поздовжні рефраговані хвилі. В розділі розглянуто теоретичні основи поширення хвильового поля в середовищі, зокрема хвильове рівняння, що описує зміщення точки простору відносно координат і часу від джерела збудження коливань. Універсальне для всіх систем координат рівняння руху хвиль у середовищі має вигляд

$$\rho \mathbf{F}(\mathbf{N}) + (\lambda + \mu) \text{grad div } \mathbf{U}(\mathbf{N}) + \mu \left( \frac{\partial^2 \mathbf{U}(\mathbf{N})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{U}(\mathbf{N})}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{U}(\mathbf{N})}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{U}(\mathbf{N})}{\partial t^2},$$

де  $\rho$  - густина,  $N$  – будь-яка точка простору,  $F(N)$  масова сила,  $\mu$  - модуль зсуву,  $\lambda$  - константа Ляме,  $U(N)$  - поле вектору зміщень, яке визначає поле пружних коливань. В розділі показано яким чином з універсального рівняння руху хвиль можна отримати скалярне хвильове рівняння, що описує поширення пружних поздовжніх хвиль у середовищі

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{V_p^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}.$$

Наведене скалярне хвильове рівняння гіперболічного типу, яке описує різні хвильові процеси в середовищі, зокрема рух поздовжніх хвиль від точкового джерела, є основою для міграційних перетворень спостереженого хвильового поля. Продовження хвильового поля, яке складає теоретичний базис кінцево-різницевої міграції поля рефрагованих хвиль, а також моделювання хвильових полів, виконується шляхом розв'язку скалярного хвильового рівняння.

В розділі продемонстровано різницю в характері зареєстрованого хвильового поля МВХ і МЗХ (ГСЗ), наведено основні критерії визначення рефрагованих хвиль на зареєстрованому полі. Показано, що реальне спостережене хвильове поле відображує дуже складні процеси і крім корисних хвиль містить різні хвилі-завади.

У розділі наведено рівняння для визначення початку годографу головної хвилі, який співпадає з початком реєстрації рефрагованих хвиль і може використовуватися при плануванні систем спостережень регіональної сейсмозвідки МЗХ.

**У Розділі 3 “ПРИНЦИПИ ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕРВАЛУ СПОСТЕРЕЖЕНОГО ХВИЛЬОВОГО ПОЛЯ ДЛЯ ОБРОБКИ З ЗАСТОСУВАННЯМ МІГРАЦІЇ ПОЛЯ РЕФРАГОВАНИХ ХВИЛЬ”** представлені результати досліджень з визначення початку реєстрації рефрагованих хвиль на спостереженому хвильовому полі в залежності від значень швидкості та умов глибинної будови середовища.

Дослідження показали, що зі збільшенням глибини до контрастної за швидкістю границі при однакових значеннях різниці швидкості покриваючій та нижній товщах рефрагована хвиля буде реєструватися далі від джерела. В той же час з ростом різниці між значеннями швидкості в покриваючій і нижній товщах на границі рефракції хвиля з'являється на меншій відстані від пункту збудження коливань і більш чіткіше видно її вступ на хвильовому полі.

При розробці алгоритму формування зображення границі рефракції і визначення при цьому області фіксації хвильового поля було враховано специфіку променів рефрагованих хвиль, а також різний вплив будови середовища в зоні входу хвилі в товщу з більшою швидкістю, та в зоні виходу з неї. В першому випадку цей вплив глобальний, а в другому – локальний. Саме ця локальність і є підставою для відтворення образу товщі нижче границі рефракції у всіх її деталях. Таким чином, локальна зміна середовища викликає глобальні зміни в хвильовому полі, завдяки специфіці поширення рефрагованих хвиль в області їх входу в товщу з більшою швидкістю. Ця особливість поля рефрагованих хвиль дає пояснення багатьом випадкам, коли при профільних спостереженнях не вдавалось отримати задовільних

записів рефрагованих хвиль навіть після надзвичайно інтенсивного збудження, в той же час з інших пунктів при звичайному збудженні спостерігалось чітке хвильове поле на віддалі до сотні кілометрів.

В третьому розділі також запропоновано підходи, щодо визначення у хвильовому полі інтервалу слідкування рефрагованих хвиль, які відносяться до різних контрастних за швидкістю границь на прикладі обробки даних регіонального профілю *DOBRE*, спостережених методом ГСЗ. Для визначення корисного інтервалу спостереженого хвильового поля, що містить рефраговані хвилі, які відповідають певній контрастній за швидкістю границі, було запропоновано: використовувати редукцію зі швидкістю, яка притаманна товщі з більшою швидкістю; застосовувати кінцево-різницеve моделювання хвильового поля у віддаленій зоні джерела, в якій формується поле рефрагованих хвиль для вибору оптимальних параметрів міграції.

В розділі розглядається теоретичний базис кінчено-різницевого моделювання хвильового поля у віддаленій зоні джерела. Моделювання хвильового поля базується на прямому продовженні хвильового поля від джерела в глибину. Задача продовження хвильового поля формулюється як процедура визначення коливань на довільній множині вузлів просторово-часової сітки, при заданому значенні сейсмічного сигналу в точковому джерелі. Для послідовного перерахунку хвильового поля використовується сіткова схема, що відповідає різницеvій апроксимації хвильового рівняння, яке в двовимірному декартовому просторі може бути представлено виразом

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{V(x,z)^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \psi(x,z,t),$$

де  $u$  - амплітуда коливань,  $V(x,z)$  - функція швидкості,  $t$  - час,  $\psi(x,z,t)$  - зовнішнє джерело коливань.

При моделюванні сейсмограм точкового джерела враховується, що функція зовнішнього джерела коливань  $\psi$  визначається відповідно до співвідношення:

$$\begin{cases} \psi = 0, X \neq X_0 \\ \psi = \lambda(t), X = X_0 \end{cases}$$

де  $X$  - просторові координати,  $X_0$  - координати точкового джерела,  $\lambda(t)$  - сейсмічний сигнал в джерелі.

Крім того, передбачається, що коливання на границях сіткової області відсутні, тобто  $u = 0$ .

Хвильове рівняння трансформується за допомогою заміни системи координат, що передбачає різницеvий розрахунок сейсмограм з редукцією для скорочення об'єму обчислень:

$$x' = x; \quad z' = z; \quad t' = t - \left| \frac{x}{V^*} \right|,$$

де  $V^*$  - швидкість редукції,  $x$  - відстань до джерела коливань, причому знаки  $V^*$  і  $x$  повинні співпадати за сенсом швидкісної редукції.



Трансформоване хвильове рівняння завдяки перетворенню диференціальних операторів має вигляд:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z'^2} = \left( \frac{1}{V^2(x', z')} - \frac{1}{V^{*2}} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial t'^2} + \frac{2}{V^*} \frac{\partial^2 u}{\partial x' \partial t'}.$$

В косокутній системі координат  $x', z', t'$  визначимо рівномірну сітку з кроками  $\Delta x, \Delta z, \Delta t$ , при цьому сіткові координати будуть  $i, j, k$ .

Для різницевої апроксимації отриманого диференційного рівняння застосуємо факторизовану кінцево-різницеву схему, яка дозволяє представити оператор другого порядку у вигляді добутку операторів першого порядку і звести вирішення багатовимірної задачі до послідовного розв'язку їх одномірних аналогів:

$$\left( E - \frac{a\Delta t}{2} L_{\dot{x}} - \mu\Delta t^2 L_{\bar{x}x} \right) \left( E - \mu\Delta t^2 L_{\bar{z}z} \right) u_{i,j}^{k+1} = \left( 2E - (2\mu - c)\Delta t^2 (L_{\bar{x}x} + L_{\bar{z}z}) \right) u_{i,j}^k -$$

$$- \left( E + \frac{a\Delta t}{2} L_{\dot{x}} - \mu\Delta t^2 (L_{\bar{x}x} + L_{\bar{z}z}) - \frac{\mu a \Delta t^3}{2} L_{\bar{z}z} L_{\dot{x}} - \mu^2 \Delta t^4 L_{\bar{x}x} L_{\bar{z}z} \right) u_{i,j}^{k-1},$$

де  $E$  - одиничний оператор,

$\mu$  - константа, що забезпечує стійкість різницевого розрахунку, має розмірність квадрату швидкості,

$$a = \frac{2V^*V^2(x, z)}{V^{*2} - V^2(x, z)}, \quad c = \frac{V^2(x, z)V^{*2}}{V^{*2} - V^2(x, z)}, \quad L_{\dot{x}}u_{i,j}^k = \frac{u_{i+1,j}^k - u_{i-1,j}^k}{2\Delta x},$$

$$L_{\bar{x}x}u_{i,j}^k = \frac{u_{i+1,j}^k - 2u_{i,j}^k + u_{i-1,j}^k}{\Delta x^2}, \quad L_{\bar{z}z}u_{i,j}^k = \frac{u_{i,j+1}^k - 2u_{i,j}^k + u_{i,j-1}^k}{\Delta z^2}.$$

Отримане різницеве рівняння розв'язується за неявною факторизованою схемою, тому для його економічного вирішення необхідно застосовувати розщеплення операторів:

$$\left( E - \frac{a\Delta t}{2} L_{\dot{x}} - \mu\Delta t^2 L_{\bar{x}x} \right) Y_{i,j} = \left( 2E - (2\mu - c)\Delta t^2 (L_{\bar{x}x} + L_{\bar{z}z}) \right) u_{i,j}^k -$$

$$- \left( E + \frac{a\Delta t}{2} L_{\dot{x}} - \mu\Delta t^2 (L_{\bar{x}x} + L_{\bar{z}z}) - \frac{\mu a \Delta t^3}{2} L_{\bar{z}z} L_{\dot{x}} - \mu^2 \Delta t^4 L_{\bar{x}x} L_{\bar{z}z} \right) u_{i,j}^{k-1},$$

$$\left( E - \mu\Delta t^2 L_{\bar{z}z} \right) u_{i,j}^{k+1} = Y_{i,j},$$

де  $Y_{i,j}$  - проміжна сіткова функція.

Граничною умовою є:  $u_{i,j} = 0$  при  $i = 0, i = n, j = m, u_{i,1} = u_{i,-1}$ ; де  $n+1$  - кількість вузлів вздовж осі  $x$ ;  $m+1$  - кількість вузлів вздовж осі  $z$ .

Система рівнянь забезпечує розрахунок хвильового поля з редукцією на часовому зрізі  $k+1$  по значенням функції  $u_{i,j}^k$  і  $u_{i,j}^{k-1}$  на часових зрізах  $k$  і  $k-1$

методом прогонки на шаблонах сітки вздовж осі  $x$  і  $z$ .

Іншим варіантом вирішення проблеми об'ємних обчислень при моделюванні хвильового поля у віддаленій зоні джерела є використання різницевої сітки, шаблон якої рухається в напрямку поширення хвиль. Принцип такого моделювання полягає в наступному: від джерела в деякий момент часу (який визначається виходячи з розміщення джерела в сітковій області) сітка починає рухатися разом з хвильовим полем, що дозволяє видаляти під час розрахунку область, в якій хвильові процеси відсутні. Таким чином, протяжність області визначення хвильового поля може значно перевищувати протяжність розрахункової сіткової області. Перевагою такого підходу є також можливість використання прямокутної різницевої сітки, на якій може бути реалізовано найбільш економічний з широким колом використання явний розв'язок хвильового рівняння.

Ефективність запропонованих підходів до визначення певного інтервалу хвильового поля, який відповідає поставленим задачам, доведена на модельних прикладах і практичних даних регіональної сейсморозвідки.

**РОЗДІЛ 4 «МЕТОДИКА ЗАСТОСУВАННЯ КІНЕМАТИЧНОЇ МІГРАЦІЇ ПОЛЯ РЕФРАГОВАНИХ ХВИЛЬ ПРИ ВИРІШЕННІ ЗАДАЧ МАЛОГЛИБИННОЇ ТА РЕГІОНАЛЬНОЇ СЕЙСМОРОЗВІДКИ»** присвячений теоретичним основам кінцево-різницевої кінематичної міграції поля рефрагованих хвиль, алгоритмам і програмним реалізаціям її застосування при вирішенні задач малоглибинної та регіональної сейсморозвідки. Теоретичним базисом для кінематичної міграції поля рефрагованих хвиль є кінцево-різницеве продовження часового поля з використанням чисельного варіанту методу полів часу для двох зведених зустрічних годографів. Продовження часового поля виконується шляхом розв'язку рівняння ейконалу, яке встановлює зв'язок між часом приходу хвилі  $t$  в будь-яку точку простору з координатами  $(x, z)$  та швидкістю поширення хвиль в цьому просторі  $V(x, z)$ :

$$\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial z}\right)^2 - \frac{1}{V^2(x, z)} = 0.$$

Розрахунок часового поля виконується на спеціального виду косокутній сітці, яка дозволяє найбільш точно відтворити хвильове поле годографа рефрагованої хвилі. Область побудови часового поля обмежена граничними променями, що відповідають краям годографу і нахилені, тому для заповнення всієї області необхідно, щоб сітковий шаблон мав вид паралелограму, а також був чотириточковим для підвищення точності. Точки перетину променів з горизонтальними лініями включаються в сітку як додаткові граничні вузли. При цьому сітка зберігає рівномірність, але стає косокутною та криволінійною по осі  $z$ . Кінцево-різницева апроксимація диференційного рівняння ейконалу для продовження часового поля на описаній сітці в канонічному вигляді буде:

$$\left[ \frac{1}{\Delta z} \left( t_{j+1}^i - t_j^i - \frac{\delta x}{2\Delta x} (t_j^{i+1} - t_j^{i-1}) - \frac{\delta x^2}{2\Delta x^2} (t_j^{i+1} - 2t_j^i + t_j^{i-1}) \right) \right]^2 +$$

$$+ \left( \frac{1}{2\Delta x} (t_{j+1}^i - t_j^{i-1}) \right)^2 - \frac{1}{V_{i,j}^2} = 0.$$

Початковою умовою є годограф на лінії  $z = 0$ :  $t(x,0) = T(x)$ .

Величину часу в граничних вузлах визначають шляхом екстраполяції, причому розрахунок часового поля у внутрішніх вузлах косокутної сітки виконується згідно явного розв'язку різницевого рівняння:

$$t_{j+1}^i = \delta x \frac{t_j^{i+1} - t_j^{i-1}}{2\Delta x} + t_j^i + \frac{\delta x^2 (t_j^{i+1} - 2t_j^i + t_j^{i-1})}{2\Delta x^2} - \Delta z \left[ \frac{1 - 2\delta x V_{i,j}^{-1} \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right)_{i,j}}{V_{i,j}^2} - \frac{\Delta z V_{i,j}^{-1} \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)_{i,j}}{V_{i,j}^2} - \frac{(t_j^{i+1} - t_j^{i-1})^2}{4\Delta x^2} - \left( 2\delta x - \frac{\Delta z (t_j^{i+1} - t_j^{i-1})}{2\Delta x \sqrt{V_{i,j}^{-2} - \frac{(t_j^{i+1} - t_j^{i-1})^2}{4\Delta x^2}}} \right) \times \frac{(t_j^{i+1} - t_j^{i-1})(t_j^{i+1} - 2t_j^i + t_j^{i-1})}{2\Delta x^3} + \frac{\Delta z (t_j^{i+1} - t_j^{i-1})}{2\Delta x \sqrt{V_{i,j}^{-2} - \frac{(t_j^{i+1} - t_j^{i-1})^2}{4\Delta x^2}}} V_{i,j}^{-3} \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right)_{i,j} \right]^{\frac{1}{2}},$$

де  $\Delta z = \lambda \Delta x$ ,  $\lambda$  - константа, яка визначає співвідношення кроків сітки згідно умови стійкості,  $\delta x$  - величина відхилення вузла сітки від нормалі по осі  $x$ .

В розділі доведено, що обрана різницева схема розв'язку рівняння ейконалу має квадратичну ступінь апроксимації і умовну стійкість, яка полягає у виконанні

$$\text{нерівності: } \left| \frac{\delta x}{\Delta z} - \frac{t_j^{i+1} - t_j^{i-1}}{2\Delta x \sqrt{\frac{1}{V_{i,j}^2} - \frac{(t_j^{i+1} - t_j^{i-1})^2}{4\Delta x^2}}} \right| \leq \frac{\Delta x}{\Delta z}.$$

Алгоритм кінематичної обробки даних складається з процедур кореляції годографів рефрагованих хвиль, побудови зведених годографів, розрахунку швидкості в покриваючому середовищі, визначенні глибинного положення границі рефракції та граничної швидкості. При цьому чисельні розрахунки базуються на

визначенні часу приходу хвилі за заданим, на деякому проміжку профілю, годографом.

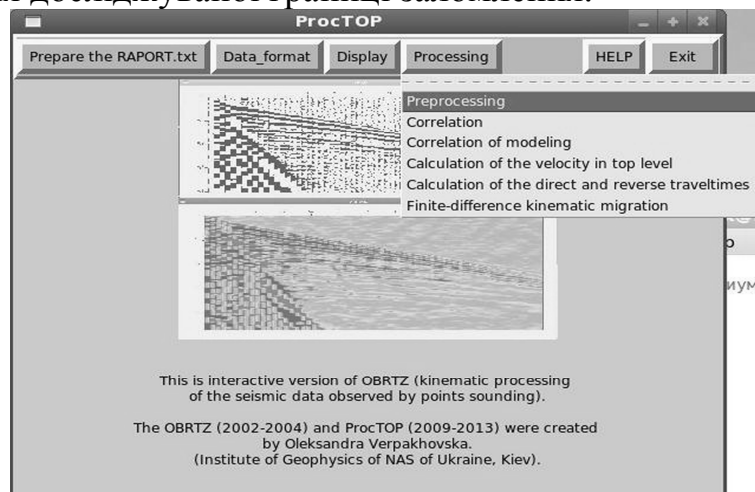
Вхідними даними для виконання кінематичної міграції є два зустрічних годографи, отримані по спостереженому хвильовому полю, взаємний час для них, а також розподіл швидкості в покриваючому середовищі.

Кінематична кінцево-різницева міграція поля рефрагованих хвиль дозволяє отримати апріорну інформацію про двошарову швидкісну модель середовища, яка є необхідною для виконання динамічної міграції поля рефрагованих хвиль. Представлена в даній роботі кінематична міграція виконується з використанням кінцево-різницевого розв'язку рівняння ейконалу для продовження часових полів двох зустрічних годографів. При цьому продовження часового поля відбувається однозначно за явною різницевою схемою, що гарантує стійкість визначення глибинного положення і форми досліджуваної границі.

В розділі розглянуто розроблений алгоритм застосування кінематичної міграції поля рефрагованих хвиль при обробці даних ГСЗ, який враховує всю специфіку системи спостереження і характер зареєстрованого хвильового поля. Алгоритмом передбачено наступні особливі процедури: визначення двох зустрічних пунктів збудження для виконання кінематичної міграції поля рефрагованих хвиль, перерахунок зареєстрованих сейсмічних спостережень на рівномірний крок для кореляції годографів, подовження гілки годографів у випадку їх недостатньої довжини для визначення взаємного часу, виконання кінематичної міграції поля рефрагованих хвиль і підготовка отриманих результатів у вигляді двошарової швидкісної моделі середовища для подальшого її використання при динамічній міграції поля рефрагованих хвиль.

Розроблене авторське оригінальне програмне забезпечення ProcTOP в операційній системі LINUX, яке дає змогу застосовувати кінематичну міграцію до обробки як даних малоглибинної сейсморозвідки, так і даних, спостережених методом ГСЗ, інтерфейс користувача якого наведено на рисунку.

Використання розрахованої за допомогою кінематичної міграції швидкісної моделі в результаті подальшого застосування динамічної міграції поля рефрагованих хвиль, як продемонстровано прикладами, дозволяє отримати більш детальне зображення досліджуваної границі заломлення.



Інтерфейс користувача авторського програмного забезпечення для обробки сейсмічних даних з використанням кінематичної міграції поля рефрагованих хвиль.

## У Розділі 5 “ МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ ГЛИБИННОГО ЗОБРАЖЕННЯ СЕРЕДОВИЩА З ЗАСТОСУВАННЯМ КІНЦЕВО-РІЗНИЦЕВОЇ ДИНАМІЧНОЇ МІГРАЦІЇ ПОЛЯ РЕФРАГОВАНИХ ХВИЛЬ ”

розглянуто постановку задачі міграції поля рефрагованих хвиль з урахуванням особливостей їх поширення у середовищі, теоретичні основи продовжень часового і хвильового полів, алгоритм динамічної міграції поля рефрагованих хвиль, а також методика формування глибинного зображення середовища за полем рефрагованих хвиль.

Основними елементами обчислювального процесу при динамічній міграції поля рефрагованих хвиль є: перенесення джерела на границю заломлення в області точки переходу заломлених хвиль в заломлюючу товщу, пряме продовження часового поля з врахуванням швидкості поширення хвиль у заломлюючій товщі і зворотне продовження хвильового поля від денної поверхні в глибину за швидкісною моделлю покриваючої товщі. Шляхом вибору значень продовженого хвильового поля в значеннях часу, які відповідають часу виходу рефрагованої хвилі з заломлюючої товщі, формується хвильове зображення досліджуваної границі. Теоретичними основами для продовження часового і хвильового полів є кінцево-різницевий розв’язок рівняння ейконалу і хвильового рівняння відповідно з застосуванням спеціального виду різницевих сіток, які найбільш наближені до реального поширення хвиль у середовищі.

З урахуванням необхідності виконувати продовження часового поля на значній віддалі від джерела коливань для різницевого наближення рівняння ейконалу була використана просторова сітка, що являє собою взаємно ортогональну систему ізохрон  $\tau$  і променів  $\gamma$ , які відповідають точковому джерелу при лінійній зміні швидкості з глибиною  $z$ :  $V = V_0(1 + \beta z)$ , де  $V_0$  - швидкість на денній поверхні,  $\beta$  - константа, яка відповідає градієнту швидкості з глибиною. Рівняння ейконалу в цій системі координат має вигляд:

$$\frac{1}{V^2(\gamma, \tau)\beta^2(ch\tau - \cos\gamma sh\tau)^2} - \left[ \frac{\partial t(\gamma, \tau)}{\partial \tau} \right]^2 - \frac{1}{sh^2 \tau} \left[ \frac{\partial t(\gamma, \tau)}{\partial \gamma} \right]^2 = 0.$$

Початковою умовою є нульове значення часу у джерелі.

Продовження часового поля виконується за явною схемою, тобто значення часу розраховується в кожній точці простору з умовною стійкістю, яка полягає у вимозі знаходження променя, який приходить у вузол сітки з координатами  $(i, j + 1)$  в межах сіткового шаблону.

Для зворотного продовження хвильового поля у віддаленій зоні джерела необхідно вирішити :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t'^2} + \frac{2V^2(x', z')V_r}{(V_r^2 - V^2(x', z'))} \frac{\partial^2 u}{\partial x' \partial t'} - \frac{V^2(x', z')V_r^2}{(V_r^2 - V^2(x', z'))} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z'^2} \right) = 0.$$

Кінцево-різницеве наближення рівняння виконується на тривимірній просторово-часовій сітці у відповідності з різницевим рівнянням:

$$\begin{aligned} & \left( E - \frac{2V^2(x,z)V_r}{(V_r^2 - V^2(x,z))4\Delta x} \frac{\Delta t}{\Delta x} L_{\dot{x}} - \frac{\sigma\Delta t^2}{\Delta x^2} L_{\bar{x}x} - \frac{\sigma\Delta t^2}{\Delta z^2} L_{\bar{z}z} \right) \tilde{U} = \\ & = \left[ 2E - \frac{\Delta t^2}{\Delta x^2} \left( 2\sigma - \frac{V^2(x,z)V_r^2}{V_r^2 - V^2(x,z)} \right) L_{\bar{x}x} - \frac{\Delta t^2}{\Delta z^2} \left( 2\sigma - \frac{V^2(x,z)V_r^2}{V_r^2 - V^2(x,z)} \right) L_{\bar{z}z} \right] U - \\ & - \left( E + \frac{2V^2(x,z)V_r}{V_r^2 - V^2(x,z)} \frac{\Delta t}{4\Delta x} L_{\dot{x}} - \frac{\sigma\Delta t^2}{\Delta x^2} L_{\bar{x}x} - \frac{\sigma\Delta t^2}{\Delta z^2} L_{\bar{z}z} \right) \hat{U}, \end{aligned}$$

де  $\tilde{U} = U_{i,j}^{k-1}$ ,  $U = U_{i,j}^k$ ,  $U = U_{i,j}^{k+1}$ ,  $i, j$  - кроки по координатам  $x$  і  $z$ , а  $k$  - крок по координаті часу  $t$ ;  $\Delta t, \Delta x, \Delta z$  - сіткові кроки;  $E$  - одиничний оператор;

$$L_{\dot{x}} = u_{i+1,j}^k - u_{i-1,j}^k; \quad L_{\bar{x}x} = u_{i+1,j}^k - 2u_{i,j}^k + u_{i-1,j}^k; \quad L_{\bar{z}z} = u_{i,j+1}^k - 2u_{i,j}^k + u_{i,j-1}^k,$$

$\sigma$  - постійна величина, яка забезпечує стійкість кінцево-різницевого розрахунку.

Різницева схема апроксимує диференційне хвильове рівняння з квадратичною точністю і є неявною факторизованою економною схемою [Самарський, 1983], яка передбачає розщеплення оператора при  $u_{i,j}^{k-1}$  на добуток двох операторів, які відповідають окремим осям координат. Таким чином, зворотне продовження хвильового поля відбувається на кожному часовому рівні  $k$  послідовно в двох напрямках  $i$  та  $j$ .

Кінцево-різницева схема продовження хвильового поля в зворотному напрямку формулюється як розв'язок системи рівнянь гіперболічного типу другого порядку

$$\begin{aligned} & \left( E - \frac{2V^2(x,z)V_r}{(V_r^2 - V^2(x,z))4\Delta x} \frac{\Delta t}{\Delta x} L_{\dot{x}} - \frac{\sigma\Delta t^2}{\Delta x^2} L_{\bar{x}x} \right) Y_{i,j} = \\ & = \left[ 2E - \frac{\Delta t^2}{\Delta x^2} \left( 2\sigma - \frac{V^2(x,z)V_r^2}{V_r^2 - V^2(x,z)} \right) L_{\bar{x}x} - \frac{\Delta t^2}{\Delta z^2} \left( 2\sigma - \frac{V^2(x,z)V_r^2}{V_r^2 - V^2(x,z)} \right) L_{\bar{z}z} \right] U - \\ & - \left( E + \frac{2V^2(x,z)V_r}{V_r^2 - V^2(x,z)} \frac{\Delta t}{4\Delta x} L_{\dot{x}} - \frac{\sigma\Delta t^2}{\Delta x^2} L_{\bar{x}x} - \frac{\sigma\Delta t^2}{\Delta z^2} L_{\bar{z}z} - \frac{2V^2(x,z)V_r}{V_r^2 - V^2(x,z)} \frac{\Delta t^3}{4\Delta x\Delta z^2} L_{\dot{x}}L_{\bar{z}z} + \right. \\ & \quad \left. + \frac{\sigma^2\Delta t^4}{\Delta x^2\Delta z^2} L_{\bar{x}x}L_{\bar{z}z} \right) \hat{U}; \\ & Y_{i,j} = \tilde{U} \left( E - \frac{\sigma\Delta t}{\Delta z^2} L_{\bar{z}z} \right) \end{aligned}$$

з початковими та крайовими умовами:

$$u_{i,j}^k = u_{i,j}^{k-1} = 0; \quad u_{i,0}^k = U_{i,k}; \quad u_{0,j}^k = u_{I,j}^k = 0; \quad u_{i,J}^k = 0,$$

де  $U_{i,k}$  - спостережене на денній поверхні хвильове поле.

Розв'язок здійснюється в два кроки за допомогою методу прогонки, спочатку розраховуються коефіцієнти прогонки, а потім проводиться рекурентний розрахунок невідомих в зворотному напрямку. Було доведено квадратичну ступінь апроксимації диференційного рівняння різницеvim і виконано дослідження стійкості кінцево-різницевого розрахунку за запропонованою різницевою схемою і визначено умову, за якої розрахунки будуть стійкими:

$$\sigma > \frac{1}{4} \frac{V_r^2 V^2(x, z)}{(V_r^2 - V^2(x, z))}.$$

Алгоритм міграції поля рефрагованих хвиль для окремого пункту збудження коливань складається з наступних кроків: перенос джерела з денної поверхні на границю рефракції, пряме продовження часового поля від перенесеного джерела в глибину з урахуванням швидкісної моделі для нижньої товщі, зворотне продовження хвильового поля від приймача в часі з залученням швидкісної моделі для покриваючої товщі, формування зображення окремої контрастної за швидкістю границі.

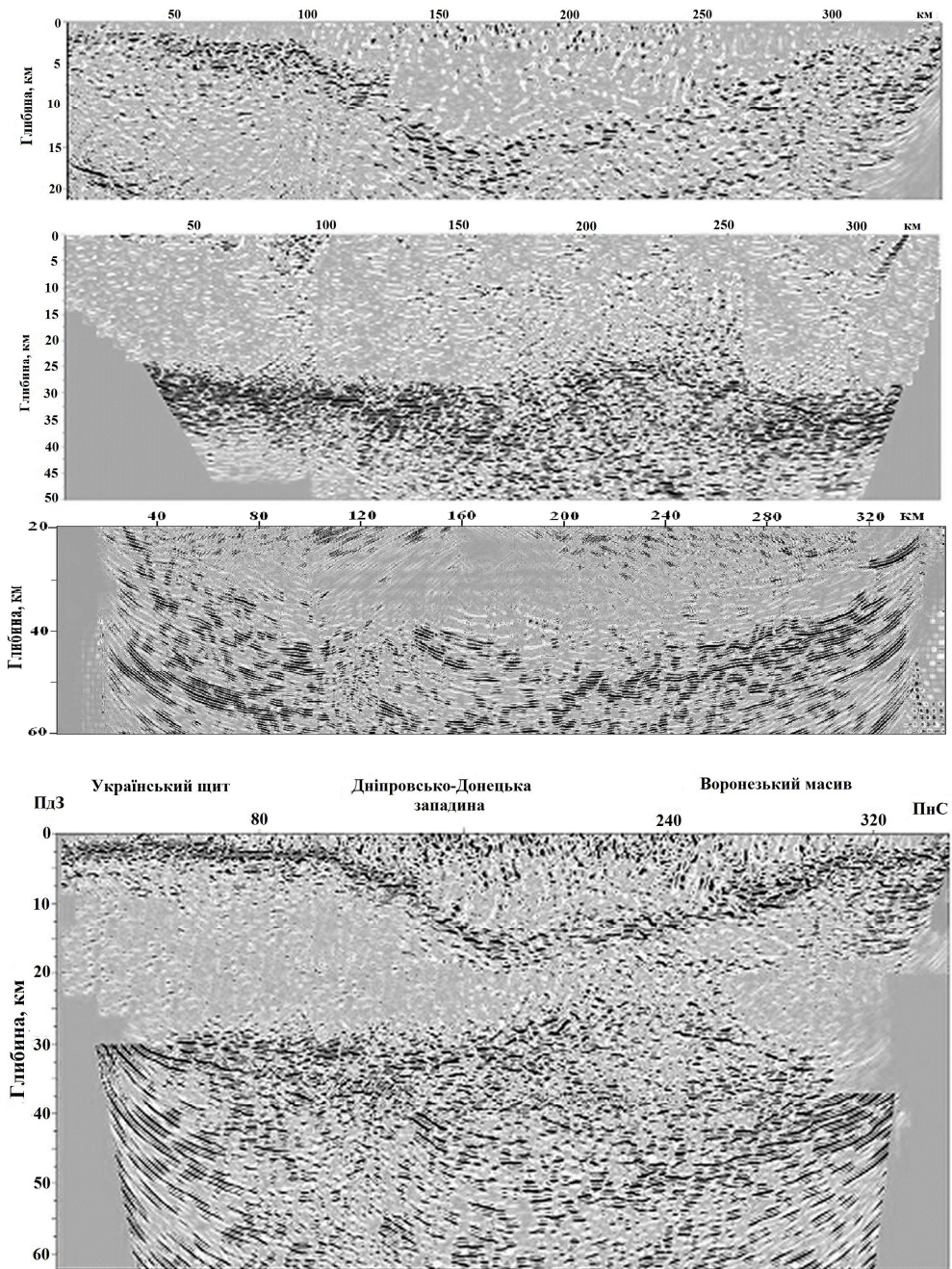
Даний алгоритм передбачає формування глибинного зображення двошарового середовища з однією границею розділу. Якщо в розрізі існує дві (чи більше) границі рефракції, то для кожної послідовно виконується описаний алгоритм, а загальний глибинний розріз формується підсумовуванням отриманих зображень окремих границь. Крім того, необхідно враховувати, що при формуванні зображення середовища за полем рефрагованих хвиль міграція відбувається так би мовити зі сторони входження рефрагованих хвиль у середовище. Тому при наявності в структурі поверхні границі порушень, їх зображення необхідно формувати виходячи з окремих зображень, отриманих для пунктів збудження, що розміщені по різні боки від цих порушень.

Особливістю міграції поля рефрагованих хвиль є використання двох різних швидкісних моделей, які окремо характеризують покриваючу і нижню відносно досліджуваної границі товщі. При цьому вплив заданих значень швидкісних параметрів у двох моделях на результат міграції є неоднаковий. Так при неправильному визначенні швидкості в покриваючій товщі зображення границі рефракції буде зміщено за глибиною і при цьому нахил самої границі змінюватися не буде. Зміна значень швидкості в нижній товщі впливає не лише на глибинне положення досліджуваної границі на міграційному зображенні, але також і на її нахил.

Для перевірки коректності заданих параметрів міграції існує принцип, за яким порівнюються зображення певного інтервалу границі, сформованого для пунктів збудження, розташованих по різні боки від цього інтервалу. Глибинне положення і нахил на обох зображеннях повинні співпадати.

При формуванні зображення складних структурних елементів виникає потреба особливого підходу при виконанні міграції поля рефрагованих хвиль. Для відображення на міграційному розрізі окремих деталей будови середовища необхідно мати зображення порушень для пунктів збудження, розміщених з різних боків і на різних відстанях від нього. Після їх співставлення формують зображення порушень шляхом їх підсумовування.

При наявності в розрізі кількох границь розділу для формування глибинної будови середовища необхідно формувати зображення кожної границі рефракції окремо і тільки потім формувати сумарний глибинний розріз, як показано на рисунку.



Зображення окремих границь заломлення і сумарний розріз за даними профілю DOBRE з застосуванням міграції поля рефрагованих хвиль: а) границя фундаменту; б) внутрішньокорова границя; в) границя Мохо; г) сумарний глибинний розріз, сформований за трьома окремими міграційними зображеннями границь рефракції.

У випадку недостатньої і розрідженої системи спостережень і наявності кількох границь розділу у середовищі, для формування його зображення, як показано на модельних і практичних прикладах, бажано верхню границю формувати за полем рефрагованих хвиль, а нижньої – за полем відбитих.



Таким чином, можна описати алгоритм виконання формування глибинного зображення середовища за полем рефрагованих хвиль в наступному вигляді:

- Визначення апріорної швидкісної моделі з застосуванням кінематичної міграції поля рефрагованих хвиль.
- Виконання динамічної міграції поля рефрагованих хвиль, тобто перенесення джерела на границю рефракції в область точки переходу рефрагованих хвиль в товщу з більшою швидкістю, пряме продовження часового поля від перенесеного джерела зі швидкістю, яка притаманна заломлюючій товщі і зворотне продовження хвильового поля від денної поверхні в глибину за швидкісною моделлю покриваючої товщі. Шляхом вибору значень продовженого хвильового поля, які відповідають часу виходу рефрагованої хвилі з нижньої товщі, формується хвильове зображення досліджуваної границі.
- Перевірка коректності отриманого результату міграції, тобто зіставлення міграційних зображень по зустрічним пунктам збудження і перевірка наявності окремих деталей будови досліджуваної границі.
- Формування глибинного зображення границі рефракції, з побудовою окремих складних елементів її будови.
- Формування зображення кожної контрастної за швидкістю границі розділу. У випадку недостатньої системи спостережень, зображення верхньої частини розрізу формувати за полем рефрагованих хвиль, а нижньої – за полем відбитих хвиль.
- Формування результативного глибинного зображення всього розрізу.
- Для більш ретельної перевірки отриманого результату глибинного зображення розрізу виконання моделювання з використанням визначеної з застосуванням кінематичної міграції поля рефрагованих хвиль швидкісної моделі двохшарового середовища.

Вирішуючи проблему порівняння зображень, сформованих за даними ГСЗ і МВХ багатократними перекриттями, можна відзначити, що при обробці поля відбитих і рефрагованих хвиль зображення фіксується з різних кутів підходу хвиль до точки, за якою формується зображення. Саме погляд на границю під різними кутами дозволяє отримати додаткову інформацію про будову середовища. Таким чином, міграційні зображення, сформовані за даними ГСЗ та МВХ багатократними перекриттями при вивченні глибинної будови дозволяють отримати різні і в той же час зображення глибинного розрізу, що доповнюють одне одного. І важливо не стільки їх порівнювати, скільки об'єднувати для кращої інтерпретації сейсмічних даних. Всі результати підтверджені модельними і практичними прикладами.

**РОЗДІЛ 6 «ФОРМУВАННЯ ТРИВИМІРНОГО ЗОБРАЖЕННЯ СЕРЕДОВИЩА ЗА ПОЛЕМ РЕФРАГОВАНИХ ХВИЛЬ»** містить теоретичні основи продовження часового і хвильового полів у тривимірному варіанті, алгоритми і програмні реалізації кінцево-різницевої міграції і моделювання хвильового поля.

Оскільки було визначено, що для однозначного вирішення задачі формування зображення границі рефракції за полем рефрагованих хвиль необхідно перенести джерело на границю в момент входження хвиль в товщу з більшою швидкістю, то

за аналогією до двомірного варіанту, продовження часового поля в тривимірному просторі також виконується в два етапи. На першому етапі розраховується час проходження хвилями покриваючої товщі до моменту їх переходу в товщу з більшою швидкістю (в тривимірному варіанті – множина таких точок створює кільце), а на другому етапі виконується продовження часового поля для рефрагованих хвиль з урахуванням швидкості в товщі з більшою швидкістю. Для визначення часу  $t$  проходження хвилі з точки джерела до кільця, що відповідає стартовій позиції рефрагованої хвилі,

$$z = z_a; x = x_0 + a \cos \varphi_a; y = y_0 + a \sin \varphi_a,$$

де  $z_a$  - глибина до кільця,  $x_0, y_0$  - координати пункту збудження,  $\varphi_a$  - кутова координата кільця,  $a$  - радіус кільця,

необхідно розв'язати наступну диференціальну задачу:

$$\left( \frac{\partial t}{\partial \tau} \right)^2 + \frac{1}{sh^2 \tau} \left( \left( \frac{\partial t}{\partial \gamma} \right)^2 + \frac{1}{\sin^2 \gamma} \left( \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right)^2 \right) = \frac{1}{V^2 \beta^2 (ch \tau - \cos \gamma sh \tau)^2},$$

з початковою умовою:  $t = 0$  при  $\tau = 0$ .

Дане диференціальне рівняння відповідає хвильовому рівнянню з трансформацією координат в ортогональну систему ізохрони і променів.

Розміри сіткової області підбираються таким чином, щоб коло, або дуга стартової позиції рефрагованої хвилі були повністю в межах сітки. Різницеве рівняння визначає значення поля в одній точці, а, отже, є явним і для нього є характерною умовна стійкість. Стійкість має місце, коли сейсмічний промінь, що приходить у вузол з координатами  $(i, j, k+1)$ , не виходить за межі сіткового шаблону. У випадку значної неоднорідності швидкісної функції  $V(\tau, \gamma, \varphi)$  може бути застосоване локальне двомірне згладжування часового поля, що відповідає фізичній природі поширення хвиль і дозволяє досягнути необхідної стійкості розрахунку часового поля.

На другому етапі прямого продовження часового поля точкового джерела поширюється часове поле від стартової позиції рефрагованої хвилі на всю область визначення зображення. Оскільки початковою умовою є розподіл часового поля на колі, або дузі, то для його продовження розглядається тороїдальна система координат, де в якості координатних ліній також використовуються промені і ізохрони, властиві середовищу з лінійним законом зміни швидкості з глибиною  $V_0(1 + \beta z)$ .

Тороїдальна система координат має наступний вигляд:

$$\tau = \operatorname{arch} \left[ \frac{\beta^2 \left( \left( \sqrt{x^2 + y^2} - a \right)^2 + z^2 \right)}{2(\beta z + 1)} + 1 \right]; \quad \gamma = \operatorname{arctg} \frac{2 \left( \sqrt{x^2 + y^2} - a \right)}{\beta \left[ \left( \sqrt{x^2 + y^2} - a \right)^2 + z^2 \right] + 2z};$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{y}{x},$$

де  $\tau = V_0 \beta t_l$ ;  $t_l$  – час поширення хвилі при лінійному законі зміни швидкості  $V_0(1 + \beta z)$ ;  $a$  – радіус центрального кола тора;  $\varphi$  – кутова координата ортогонального перерізу тора;  $\tau$  – радіальна координата на перерізі тора;  $\gamma$  – кутова координата на перерізі тора.

Або при прямій зміні координат:

$$x = \left( a + \frac{\sin \gamma sh \tau}{\beta(ch \tau - \cos \gamma sh \tau)} \right) \cos \varphi; \quad y = \left( a + \frac{\sin \gamma sh \tau}{\beta(ch \tau - \cos \gamma sh \tau)} \right) \sin \varphi;$$

$$z = \frac{1}{\beta} \left( \frac{1}{ch \tau - \cos \gamma sh \tau} - 1 \right).$$

Отже, рівняння ейконалу в тороїдальній системі координат має наступний вигляд:

$$\left( \frac{\partial t}{\partial \tau} \right)^2 + \frac{1}{sh^2 \tau} \left( \frac{\partial t}{\partial \gamma} \right)^2 + \frac{1}{[a\beta(ch \tau - \cos \gamma sh \tau) + \sin \gamma sh \tau]^2} \left( \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right)^2 =$$

$$= \frac{1}{V^2 \beta^2 (ch \tau - \cos \gamma sh \tau)^2},$$

де  $t(\tau, \gamma, \varphi)$  – час поширення хвилі в неоднорідному середовищі  $V \equiv V(\tau, \gamma, \varphi)$

$$\left( \frac{\partial t}{\partial \tau} \right)^2 = \beta^2 (ch \tau - \cos \gamma sh \tau)^2; \quad \left( \frac{\partial t}{\partial \gamma} \right)^2 = \beta^2 \frac{(ch \tau - \cos \gamma sh \tau)^2}{sh \tau};$$

$$\left( \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right)^2 = \frac{(ch \tau - \cos \gamma sh \tau)^2}{[a\beta(ch \tau - \cos \gamma sh \tau) + \sin \gamma sh \tau]^2}.$$

Крім початкової умови (6.2) різницевої задачі прямого продовження часового поля, в якості крайової умови розглядається екстраполяція часу в крайових вузлах за полем, визначеним у внутрішніх вузлах двомірної сітки (сіткові координати  $i, j$ ). Вирішується за явною схемою та має умовну стійкість і квадратичну ступінь наближення.

Для просторової апроксимації хвильового поля використовується циліндрична сітка, вибір якої зумовлений тим, що поле рефрагованих хвиль від певної товщі з більшою швидкістю реєструється головним чином в прогнозованому інтервалі відстані від пункту збудження коливань. Якщо циліндрична система координат має

$$\text{вигляд: } r = \sqrt{x^2 + y^2}; \quad \varphi = \arctg \frac{y}{x}; \quad z = z,$$

де пункт збудження розташований в точці з координатами  $x = 0, y = 0, z = 0$ , або  $r = 0, z = 0$ , то координатна вісь  $r$  визначає віддаль від пункту збудження і за нею може бути визначений інтервал сіткової області, який необхідно використати для продовження хвильового поля, а також відібрати ту частину площинного спостереженого хвильового поля, яку доцільно долучити до процедури формування зображення.

Циліндрична сітка на лінії  $r = 0$  вироджується, але це не стоїть на заваді використання її у випадку продовження поля рефрагованих хвиль. Цей висновок зумовлений тим, що область інтерпретації рефрагованих хвиль перебуває на значній віддалі від пункту збудження і область, наближена до нього, може бути взагалі вилучена з розгляду.

Диференційне рівняння в циліндричній системі координат має вигляд:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{V^2(r, \varphi, z)} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}.$$

Кінцево-різницеве наближення:

$$(E - \sigma L_{\bar{\varphi}\varphi}) u_{i,j}^{k-1,l} = \left[ 2E + \frac{V^2 \Delta t^2}{\Delta r^2} L_{\bar{r}r} + \frac{V^2 \Delta t^2}{2r \Delta r} L_{\dot{r}} + \frac{V^2 \Delta t^2}{\Delta z^2} L_{\bar{z}z} - \right. \\ \left. - \left( 2\sigma - \frac{V^2 \Delta t^2}{r^2 \Delta \varphi^2} \right) L_{\bar{\varphi}\varphi} \right] u_{i,j}^{k,l} - (E - \sigma L_{\bar{\varphi}\varphi}) u_{i,j}^{k+1,l}$$

де  $E$  – одиничний оператор;  $V \equiv V_{i,j,l}$  – значення швидкості в  $(i, j, l)$  – вузлі циліндричної просторової сітки;  $\sigma$  – коефіцієнт, що залучається для забезпечення стійкості різницевого розв'язку;  $u_{i,j}^{k,l}$  – значення амплітуди хвильового поля у сітковому вузлі з координатами  $(i, j, l, k)$ .

$$L_{\bar{\varphi}\varphi} u = u_{i+1,j}^{k,l} - 2u_{i,j}^{k,l} + u_{i-1,j}^{k,l}; \quad L_{\bar{r}r} u = u_{i,j}^{k,l+1} - 2u_{i,j}^{k,l} + u_{i,j}^{k,l-1}; \\ L_{\bar{z}z} u = u_{i,j+1}^{k,l} - 2u_{i,j}^{k,l} + u_{i,j-1}^{k,l}; \quad L_{\dot{r}} u = u_{i,j}^{k,l+1} - u_{i,j}^{k,l-1}.$$

Кінцево-різницеве рівняння зворотного продовження хвильового поля забезпечує визначення амплітуди поля на часовому рівні сітки  $k-1$  по значенню його на двох часових рівнях  $k$  і  $k+1$ . Таким чином, здійснюється послідовно визначення поля на сітці при зміні часової сіткової координати у зворотному порядку від максимального значення  $k_{\max} - 2$ , яке відповідає часу  $t_{\max}$ . Для формулювання повної кінцево-різницевої задачі передбачається початкова умова розв'язку у вигляді нульових значень поля на двох часових рівнях:  $k_{\max} - 1$  та  $k_{\max}$ . В якості крайових умов приймаються нульові значення хвильового поля у вузлах, що відповідають сітковим координатам  $i = 0$  та  $i = i_{\max}, j = j_{\max}, l = 0$  та  $l = l_{\max}$ . Спостережене хвильове поле розглядається також у якості крайової умови розв'язку кінцево-різницевої задачі у вузлах, які мають координату  $j = 0$ .

Кінцево-різницеве рівняння (6.13) має явний вигляд відносно осей  $z$  та  $r$  і неявний відносно осі  $\varphi$ . Цей вибір зумовлений тим, що рівномірний крок по  $\varphi$  пов'язаний зі зміною довжини дуги при зміні радіусу циліндра  $r$ . Таким чином, при виборі стійкого режиму різницевих розрахунків необхідно було б орієнтуватися на мінімальний крок по  $\varphi$ , а, отже, і відповідно зменшений крок по часу  $\Delta t$ , що вимагало б нераціонального збільшення обчислень при великих значеннях радіусу  $r$ . У випадку ж неявної апроксимації диференційних операторів, що пов'язані з координатою  $\varphi$ , гарантується абсолютна стійкість за цією координатою і крок  $\Delta \varphi$

може бути довільним, але за умови правильного вибору константи  $\sigma$ . Що стосується кроків  $\Delta r$  і  $\Delta z$ , то вони постійні для всієї сіткової області і оцінка стійкості, яка з ними пов'язана, не викликає труднощів.

Вибір параметра сітки  $\sigma$  диктується умовою абсолютної стійкості за координатою  $\varphi$ :  $\sigma \geq \frac{1}{4} \left( \frac{V^2 \Delta t^2}{r^2 \Delta \varphi^2} \right)$ . Ця умова має виконуватись у всіх вузлах просторової сітки.

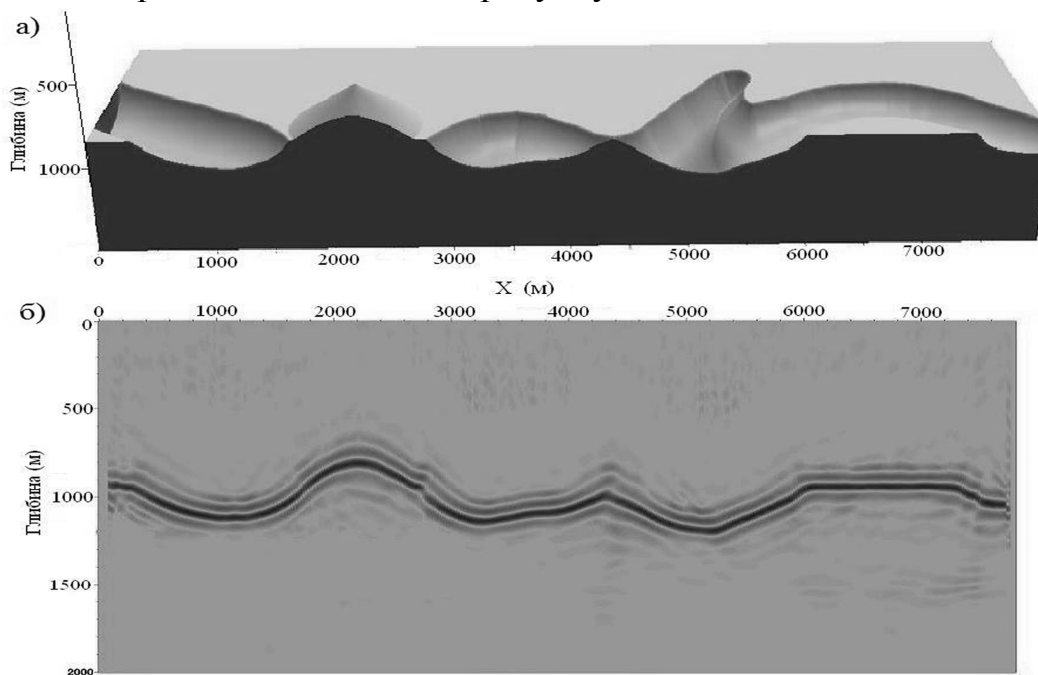
Вибір сіткових кроків  $\Delta r, \Delta \varphi$  та  $\Delta z$  продиктований необхідністю задовільної апроксимації хвильового поля в процесі його продовження. Крок  $\Delta t$  продовження поля необхідно визначити у відповідності з задоволенням нерівності, яка гарантує стійкість різницевого розрахунку для двомірної схеми "хрест":

$$\Delta t^2 V^2 \left( \frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right) \leq 1.$$

Ця умова повинна виконуватись для всієї сіткової області.

Доведена коректність розрахунків за запропонованими схемами. Розроблений алгоритм формування зображень за полем рефрагованих хвиль в тривимірному середовищі. Крім того в роботі розглянуті теоретичні основи тривимірного моделювання хвильового поля у віддаленій зоні джерела, яке базується на прямому продовженні хвильового поля, шляхом кінцево-різницевої апроксимації на чотиривимірній просторово-часовій сітці.

Всі розробки у тривимірному варіанті перевірено на модельному прикладі, частина якого у вигляді зрізу швидкісної моделі і відповідного зрізу кубу міграційного зображення показано на рисунку.



Повздовжній перетин кубу: а) швидкісної моделі середовища; б) сформованого зображення середовища.

На основі модельних та практичних досліджень підтверджено обґрунтованість тривимірного міграційного перетворення рефрагованих хвиль, яка в основному співпадає з двовимірним варіантом. Головними принциповими положеннями при застосуванні кінцево-різницевої міграції поля рефрагованих хвиль є:

- міграція рефрагованих хвиль може ефективно застосовуватись лише у випадку досліджень геологічних об'єктів зі значною швидкісною диференціацією;
- перевага формування зображень середовища за полем рефрагованих хвиль полягає в залученні для обробки хвильового поля зони перших вступів з мінімальним фоном завад;
- зображення середовища, сформоване за полем рефрагованих хвиль, поступається в роздільності зображенню, сформованому міграцією поля відбитих хвиль у докритичній області;
- якість міграційного перетворення поля рефрагованих хвиль для кожного окремого пункту збудження в значній мірі залежить від поведінки границі рефракції у ближній зоні збудження;
- при сприятливих сейсмогеологічних умовах міграція поля рефрагованих хвиль може суттєво доповнити дослідження поля відбитих хвиль, особливо у випадку використання схем спостережень недостатньої щільності.

## **ВИСНОВКИ**

Виконані автором дисертаційної роботи дослідження дозволили розробити метод формування глибинного зображення як двовимірного, так і тривимірного середовища на базі використання кінцево-різницевого варіанту міграції поля рефрагованих хвиль. Метод є дієвим інструментом при вивченні детальної глибинної будови середовища довільного ступеню складності за даними, зареєстрованими в різному діапазоні відстаней від джерела, що характерно для систем спостережень регіональної сейсмозвідки. Розроблений метод формування глибинного зображення середовища, як доведено автором на модельних і практичних прикладах, гарантує коректний результат і не має аналогів у світовій практиці.

При виконанні досліджень автором отримано наступні основні результати:

1. На базі теоретичних основ поширення сейсмічних хвиль у середовищі виконано аналіз та дослідження кінематичних і динамічних характеристик хвильового поля, зареєстрованого на значних віддальх від джерела коливань. Автором запропоновано спеціальні підходи, що дозволяють визначати корисний інтервал хвильового поля, який відповідає реєстрації рефрагованих хвиль від певної контрастної за швидкістю границі розділу: визначати приблизний початок інтервалу за координатою точки входу в нижню товщу, яка відповідає подвійній глибині розміщення границі; використовувати редукцію зі швидкістю, яка притаманна товщі з більшою швидкістю; застосовувати кінцево-різничеве моделювання хвильового поля у віддаленій зоні джерела, в якій формується поле рефрагованих хвиль з урахуванням швидкісної моделі досліджуваного середовища.

2. З урахуванням сучасних системних бібліотек та інструментів програмування розроблено алгоритм та програмне забезпечення кінематичної міграції поля рефрагованих хвиль. Створено принципово нову інтерактивну версію програмного пакету обробки даних мало глибинної сейсмозв'язки з залученням мов об'єктного програмування TCL/TK – програму ProcTOP. В даний час ProcTOP знаходиться в дослідній експлуатації в ТОВ НГДК «Кумран» (Київ, Україна), що підтверджено актом впровадження.
3. Розширено область застосування кінематичної міграції поля рефрагованих хвиль з метою визначення ап'іорної швидкісної моделі двошарового середовища, необхідної для виконання динамічної міграції поля рефрагованих хвиль при обробці даних регіональної сейсмозв'язки (ГСЗ або WARRP). Для цього розроблено відповідний алгоритм та програмну реалізацію кінематичної міграції поля рефрагованих хвиль для обробки даних, спостережених за нерегулярною системою і на значних відстанях від джерела коливань. Програмні розробки включено окремим блоком до програмного комплексу ProcTOP. Доведено на модельних і практичних прикладах правомірність визначення двошарової швидкісної моделі середовища з застосуванням кінематичної міграції поля рефрагованих хвиль за даними регіональної сейсмозв'язки для її подальшого використання при динамічній міграції.
4. Запропоновано спеціальну сітку з шаблоном, що рухається, для кінцево-різницевого моделювання хвильового поля у віддаленій зоні джерела. З застосуванням даного підходу до моделювання хвильового поля перевірена практична коректність та ефективність застосування кінематичної міграції поля рефрагованих хвиль при обробці даних сейсмозв'язки, спостережених ГСЗ за умов складнобудованих середовищ.
5. Розроблено методику формування зображення середовища з застосуванням кінематичної та динамічної міграції поля рефрагованих хвиль для обробки даних регіональної сейсмозв'язки. Даний підхід гарантує самодостатність методики формування зображення середовища за даними МЗХ, оскільки необхідна ап'іорна швидкісна модель середовища розраховується завдяки застосуванню кінематичної міграції поля рефрагованих хвиль. Всі необхідні для даної методики параметри розраховуються безпосередньо зі спостереженого хвильового поля. Продемонстровано вплив зміни значень швидкості в покриваючій товщі і товщі з більшою швидкістю на результат формування зображення досліджуваної границі. Доведено, що найбільший вплив на глибинне положення і нахил границі на міграційному зображенні мають значення швидкості в нижній товщі, але незначні їх зміни порядку 100-200 м/с, на зображення границі не впливають. Тому ап'іорна швидкісна модель середовища, визначена з застосуванням кінематичної міграції поля рефрагованих хвиль може бути використана в подальшому при динамічній міграції для формування зображення середовища за даними регіональної сейсмозв'язки. Розроблену методику випробувано на модельних та практичних прикладах і доведено її ефективність при складній будові двошарового середовища.

6. Вдосконалено теоретичний базис, алгоритм та програму динамічної міграції поля рефрагованих хвиль з метою вивчення складно побудованого геологічного розрізу та з урахуванням особливостей рельєфу району досліджень. В алгоритмі використовується повнохвильове продовження, а не одностороннє, як це було раніше. Такий підхід, як показано на реальних і модельних прикладах гарантує більш точне відтворення окремих деталей будови заломлюючої границі.
7. Розроблено методичні підходи застосування кінцево-різницевої міграції поля рефрагованих та закритичних відбитих хвиль: формувати зображення кожної контрастної за швидкістю границі окремо; формувати зображення окремих деталей будови досліджуваної границі з урахуванням зіставлення міграційних зображень, отриманих для зустрічних пунктів збудження; при системах спостережень з нерівномірним розміщенням джерел і приймачів, верхню частину розрізу формувати за полем рефрагованих хвиль, а нижню – за полем відбитих; аналізуючи всі отримані попередні окремі зображення, формувати повний глибинний розріз району досліджень. Ефективність кожного запропонованого підходу продемонстровано на модельних і практичних даних сейсмозвідки.
8. Доведено на модельних та реальних даних, спостережених в різних регіонах світу, що застосування розробленого методу формування зображення середовища з використанням кінцево-різницевої міграції поля рефрагованих хвиль дозволяє отримати більш детальний глибинний розріз, який є більш інформативним у порівнянні з швидкісною моделлю середовища, отриману з застосуванням сейсмотомографії або променевого моделювання.
9. Показано на реальних даних, що завдяки обробці з застосуванням міграції хвильових полів, спостережених методами ГСЗ і МВХ багатократними перекриттями, з'являється можливість сформуванню різних зображень глибинного розрізу, які доповнюють одне одного. Такий підхід гарантує отримання більш повної інформації про глибинну будову району досліджень.
10. У зв'язку з переходом сейсмозвідки з профільних на просторові спостереження з'явилася необхідність розробки методів і відповідних їм програмних реалізацій для обробки тривимірного поля рефрагованих хвиль. Розроблено теоретичний базис кінцево-різницевих продовжень часового і хвильового полів у тривимірному варіанті з урахуванням реєстрації поля у віддаленій зоні джерела. Доведено математичну коректність розв'язку рівняння ейконалу і хвильового рівняння на спеціального виду сітках у тривимірних та чотиривимірних системах координат.
11. Розроблено метод тривимірного моделювання хвильового поля зі значними відстанями від пункту збудження. Метод базується на прямому продовженні хвильового поля, шляхом вирішення хвильового рівняння кінцево-різницевим методом з використанням циліндричної чотиривимірної просторово-часової сітки. Оскільки реальних даних тривимірної регіональної сейсмозвідки поки існує не дуже багато, то завдяки розробленому методу тривимірного моделювання хвильового поля в дальній зоні джерела з'явилася можливість довести коректність і ефективність розробленого



методу кінцево-різницевої тривимірної міграції поля рефрагованих хвиль при формуванні кубу зображення середовища.

Безумовно як кінематична, так і динамічна міграції поля рефрагованих хвиль мають свою область застосування, однак їх поєднання, як доведено автором роботи, може значно розширити коло геологічних задач, які можна вирішити з їх використанням, а також дозволяє отримати в результаті обробки сейсмічного хвильового поля якісне зображення середовища без залучення сторонніх процедур і методів. Такий підхід є правомірним при вирішенні поставлених автором задач, Оскільки при виконанні кінцево-різницевої міграції необхідно мати апіорну швидкісну модель двошарового середовища, яка при необхідності може бути скорегована під час обробки.

Необхідно відмітити, що розроблена автором методика формування зображення середовища з застосуванням міграції поля рефрагованих хвиль не є універсальним методом обробки даних сейсмозвідки. Однак, на сьогоднішній момент, він є єдиним дієздатним інструментом для формування зображення середовища у віддаленій зоні джерела, що особливо актуально при обробці даних регіональної сейсмозвідки, зокрема спостережених ГСЗ (WARRP) з використанням нерегулярної системи спостережень.

#### **Список основних опублікованих праць**

1. Пилипенко, В.Н. Формирование изображения среды по волновым полям по профилю CINCA-95, Чили / В.Н. Пилипенко, А.О. Верпаховская, П. Гизе, Н.И.Павленкова // «Геофизика». – Москва, 2006. – № 4. – С. 16-20.
2. Верпаховська, О.О. Дослідження будови земної кори міграційними перетвореннями спостереженого хвильового поля за даними морської сейсмозвідки / О.О. Верпаховська, В.М. Пилипенко, Н.І. Павленкова // «Геология и полезные ископаемые Мирового океана». – Киев, 2007. – №1. – С.5-12.
3. Пилипенко, В.Н. Исследование особенностей миграционных преобразований поля преломленных волн с использованием 2D и 3D конечно-разностного моделирования сейсмограмм/ В.Н. Пилипенко, А.О. Верпаховская // Геофиз. журнал. – 2008. – 30, №1. – С. 84-96.
4. Пилипенко, В.Н. Интерпретация данных 3D сейсмозвездки с применением конечно-разностной кинематической миграции / В.Н. Пилипенко, А.О. Верпаховская, Д.А. Кекух // Геофиз. журнал. – 2009. – 29, №1. – С.16-27.
5. Pavlenkova, N.I. Crustal structure in Chile and Okhotsk Sea regions / N.I. Pavlenkova, V.N. Pilipenko, A.O. Verpakhovskaja, G.A. Pavlenkova, V.P. Filonenko // Tectonophysics. – 2009. – vol.472, Issue 1-4. – P. 28-38.
6. Пилипенко, В.Н. Конечно-разностная миграция поля преломленных волн при изучении глубинного строения земной коры и верхней мантии по данным ГСЗ (на примере профиля DOBRE) / В.Н. Пилипенко, А.О. Верпаховская, В.И. Старостенко, Н.И.Павленкова // Физика Земли. – 2010. – №11. – С.36-48.
7. Verpakhovska, A. Possibilities of seismic migration for interpretation of wide-angle reflection-refraction profiles / A.Verpakhovska, V.M. Pylypenko, O. Pylypenko // Геофиз.журнал. – 2010. – т.32, №4. – С.202-203.

8. Pylypenko, V.N. Wave images of the crustal structure from refraction and wide-angle reflection migrations along the DOBRE profile (Dnieper-Donets paleorift) / V.N. Pylypenko, O.O. Verpakhovska, V.I. Starostenko, N.I. Pavlenkova // *Tectonophysics*. – 2011. – vol.508, issue 1-4. – P.96-105.
9. Верпаховская, А.О. Актуальные задачи конечно-разностной миграции поля преломленных волн / А.О. Верпаховская // *Геофиз.журнал*. – 2011. – т.33, №6. – С.96-108.
10. Пилипенко, В.Н. Продолжение временного поля в трехмерной неоднородной среде в процедурах обработки и интерпретации сейсмических данных / В.Н. Пилипенко, А.О. Верпаховская, Д.А. Кекух, Е.В. Пилипенко // *Геоинформатика*. – Киев, 2011. – №4. – С.32-43.
11. Верпаховская, А.О. Природа зон субдукций на примере переходной зоны континент-океан в районе Чили / В.Н. Пилипенко, А.О. Верпаховская, Н.И. Павленкова // *Геология морей и океанов. /Отв.ред. А.П.Лисицин. Материалы XIX Международной научной конференции (школы) по морской геологии*. – М. : ГЕОС. – 2011. – Том V. – С. 259-264.
12. Верпаховская, А.О. 71-й рейс НИС «Профессор Водяницкий» - комплексные экспедиционные исследования в западной части Черного моря / В.П.Коболев, П.А.Буртный, А.О.Верпаховская, С.Н.Довбыш, В.Ф.Жук, А.А.Любицкий, С.Ф.Михайлюк, С.С.Чулков, Д.О.Яцюта // «*Геология и полезные ископаемые Мирового океана*». – Киев, 2011. - 26, №4. – С.94-99.
13. Верпаховская, А.О. Формирование изображения сложных структурных деталей строения преломляющей границы / А.О. Верпаховская // *Геофиз.журнал*. – 2012. – т.34, №5. – С.150-160.
14. Пилипенко, В.Н. Конечно-разностная волновая миграция исходных сейсмограмм общего пункта взрыва во временной области / В.Н. Пилипенко, А.О. Верпаховская, В.В. Гневуш // *Геофиз.журнал*. – 2012. – т.34, №3. – С.40-48.
15. Verpakhovska, O. Application of finite-difference refraction migration to study of the Earth crust structure / O.Verpakhovska, V.Pilipenko, E.Pylypenko. // *SGEM2012*. – Албена (Болгария), 2012. – vol.II. – P.545-554.
16. Верпаховская, А.О. Особенности обработки морских сейсмических наблюдений с использованием конечно-разностной полноволновой миграции / А.О. Верпаховская, В.Н. Пилипенко, В.П. Коболев // *Геофиз.журнал*. – 2013. – т.35, №5. – С.187-195.
17. Верпаховская, А.О. Миграция исходных сейсмограмм и моделирование волнового поля с распараллеливанием процесса вычислений на кластере / А.О. Верпаховская, В.Н. Пилипенко, Е.В. Пилипенко, Г.Д. Сидоренко // *Геоинформатика*. – Киев, 2013. – №3. – С.1-12.
18. Коболев, В.П. Скопления газовых гидратов в палеодельте Днепра как объект сейсмических исследований на склоне северо-западного шельфа Черного моря / В.П. Коболев, А.О. Верпаховская // «*Геология и полезные ископаемые Мирового океана*». – Киев, 2014. – 35, №1. – С.81-93.
19. Коболев, В.П. Комплексные геофизические исследования на склоне северо-западного шельфа Черного моря / В.П. Коболев, А.О. Верпаховская, И.Г.

- Захаров, Ю.В. Козленко, Р.И. Кутас, А.А. Любицкий, А.В.Марченко, М.И. Орлюк, Д.А. Яцюта // Сб. «Азово-Черноморский полигон изучения геодинамики и флюидодинамики формирования месторождений нефти и газа». – 2013. – Симферополь : «Ассоциация геологов». – С. 52-78.
20. Верпаховская, А.О. Кинематическая миграция поля преломленных волн при формировании изображения среды по данным ГСЗ / А.О. Верпаховская // Геофиз.журнал. – 2014. – т.36, №6. – С.153-164.
21. Верпаховская, А.О. 3D конечно-разностная миграция поля преломленных волн / А.О. Верпаховская, В.Н. Пилипенко, В.Б. Будкевич // Геофиз.журнал. – 2015. – т.37, №3. – С.50-65.
22. Пилипенко, В.Н. Формирования трехмерного изображения среды по сумме ОГТ для изучения геологического строения шахтных полей / В.Н. Пилипенко, А.О. Верпаховская, В.Б. Будкевич, Пилипенко Е.В. // Геофиз.журнал. – 2015. – т.37, №4. – С.104-113.
23. Пилипенко, В.Н. Трехмерная временная миграция по сейсмограммам пункта взрыва / В.Н. Пилипенко, А.О. Верпаховская, В.Б. Будкевич // Геофиз.журнал. – 2016. – т.38, №1. – С.43-56.

#### АНОТАЦІЯ

**О.О. Верпаховська “ ФОРМУВАННЯ ГЛИБИННОГО ЗОБРАЖЕННЯ СЕРЕДОВИЩА З ЗАСТОСУВАННЯМ КІНЦЕВО-РІЗНИЦЕВОЇ МІГРАЦІЇ ЗА ДАНИМИ РЕГІОНАЛЬНОЇ СЕЙСМОРОЗВІДКИ ”. – Рукопис.**

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

Дисертаційна робота присвячена розробці методики формування глибинного зображення середовища з застосуванням кінцево-різницевої міграції поля рефрагованих хвиль як у двовимірному, так і тривимірному варіантах для обробки даних регіональної сейсморозвідки, спостережених на значних відстанях від джерела.

Розроблено алгоритм і створено програмний комплекс, який реалізує методику кінематичної міграції поля рефрагованих хвиль для обробки даних малоглибинної і регіональної сейсморозвідки. Запропонована автором методика формування зображення середовища з застосуванням кінематичної та динамічної міграції поля рефрагованих хвиль для обробки даних регіональної сейсморозвідки, є оригінальною і самодостатньою, оскільки всі необхідні параметри розраховуються безпосередньо зі спостереженого хвильового поля.

Розроблено методичні підходи застосування кінцево-різницевої міграції поля рефрагованих хвиль для формування глибинного розрізу у випадку наявності двох і більше контрастних за швидкістю границь, а також недостатньої системи спостережень.

Розроблено теоретичний базис кінцево-різницевих продовжень часового і хвильового полів у тривимірному варіанті з урахуванням реєстрації поля у

віддаленій зоні джерела. Доведено математичну коректність розв'язку рівняння ейконалу і хвильового рівняння на спеціального виду сітках у тривимірних та чотиривимірних системах координат.

Для перевірки коректності застосування міграції використовується моделювання хвильового поля, яке розроблено у двовимірному і тривимірному варіантах для віддаленої зони джерела.

Представлена в дисертації методика формування глибинного зображення середовища з застосуванням міграції поля рефрагованих хвиль для обробки даних регіональної сейсморозвідки не має аналогів в світовій практиці.

**Ключові слова:** рефраговані хвилі, регіональна сейсморозвідка, глибинне сейсмічне зондування, кінематична і динамічна міграція поля рефрагованих хвиль, продовження часового поля, продовження хвильового поля, метод полів часу, кінцево-різницевий метод.

### АННОТАЦІЯ

**А.О. Верпаховская «Формирование глубинного изображения геологической среды с применением конечно-разностной миграции по данным региональной сейсморазведки». – Рукопись.**

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

Диссертация посвящена разработке методики формирования глубинного изображения среды с применением конечно-разностной миграции поля рефрагованных волн как в двумерном, так и трехмерном вариантах для обработки данных региональной сейсморазведки, наблюдаемых на значительных расстояниях от источника.

Глубинное изображение геологической среды с имеющимися в нем структурными особенностями при обработке сейсмических данных можно получить путем трансформации непосредственно наблюдаемого волнового поля или миграции. Поскольку все существующие методы миграции базируются на обработке поля отраженных волн, которые имеют ограниченный интервал регистрации от источника, а региональная сейсморазведка имеет нерегулярную систему наблюдений и при этом волновое поле регистрируется на расстояниях в несколько сотен километров от пункта возбуждения, возникает необходимость в применении к обработке нестандартных методов миграции. Поэтому разработанная методика формирования глубинного изображения среды с применением конечно-разностной миграции поля рефрагованных волн для обработки данных региональной сейсморазведки безусловно является актуальной задачей.

Автором предложены специальные подходы, позволяющие определять полезный интервал волнового поля, соответствующий регистрации рефрагованных волн и который может быть задействован при формировании изображения

определенной границы раздела с применением динамической конечно-разностной миграции поля рефрагированных волн.

Разработан алгоритм и создан программный комплекс, реализующий методику кинематической миграции поля рефрагованных волн для обработки данных как малоглубинной, так и региональной сейсморазведки с учетом особенностей как систем их наблюдения, так и характера зарегистрированных волновых полей.

Предложенная автором методика формирования изображения среды с применением кинематической и динамической миграции поля рефрагованных волн для обработки данных региональной сейсморазведки, является самодостаточной, поскольку все необходимые параметры рассчитываются непосредственно из наблюдаемого волнового поля.

В работе предложены методические подходы применения конечно-разностной миграции поля рефрагованных волн: формировать изображение каждой контрастной по скорости границы отдельно; формировать изображения отдельных деталей строения преломляющей границы на основе сопоставления миграционных изображений, полученных для встречных пунктов возбуждения; при недостаточных системах наблюдений с неравномерным размещением источников и приемников, верхнюю часть разреза формировать за полем рефрагованных, а нижнюю - по полю отраженных волн; анализируя все полученные предварительные отдельные изображения, формировать полный глубинный разрез района исследований. Эффективность каждого предложенного методического подхода продемонстрирована на модельных и практических примерах.

Разработан теоретический базис конечно-разностных продолжений временного и волнового полей в трехмерном варианте с учетом регистрации поля в отдаленной зоне источника. Доказано математическую корректность решений уравнения эйконала и волнового уравнения на специальном виде сетках в трехмерных и четырехмерных системах координат.

В качестве действенного инструмента для проверки корректности применения миграции используется моделирование волнового поля, которое разработано как в двумерном, так и трехмерном варианте для волнового поля, зарегистрированного в отдаленной зоне источника. Поскольку моделирование в дальней зоне источника предполагает большие объемы вычислений, то предложен вариант конечно-разностного моделирования на сетке, шаблон которой движется в направлении распространения волн.

Представленная в диссертации методика формирования глубинного изображения среды с применением миграции поля рефрагованных волн для обработки данных региональной сейсморазведки, не имеет аналогов в мировой практике, что подтверждено приведенным в работе обзором литературных источников.

**Ключевые слова:** рефрагованные волны, региональная сейсморазведка, глубинное сейсмическое зондирование, кинематическая и динамическая миграция поля рефрагованных волн, продолжение временного поля, продолжение волнового поля, метод полей времен, конечно-разностный метод.

**ABSTRACT**

**O.O. Verpakhovska “The depth image of the geological environment with the use of finite-difference migration to process the regional seismic data”. - Manuscript. The dissertation for the scientific degree of doctor of Physical and Mathematical Sciences in speciality 04.00.22 – geophysics. Institute of Geophysics by S.I. Subbotin of Ukrainian National Academy of Sciences, Kiev, 2016.**

The thesis is devoted to developing methods of the depth image of the geological environment with using finite-difference refraction migration both in two-dimensional and three-dimensional versions for the regional seismic data processing, observations at considerable distances from the source (DSS or WARRP data).

The algorithm and the software are created that implements the method of kinematic refraction migration for near-surface and regional seismic data. Author proposed method of the geological environment image with using kinematic and dynamic refraction migrations for regional seismic data, is original and self-sufficient, because all the required parameters are calculated directly from the observed wave field.

Methodological approaches to the use of finite-difference refraction migration to form a deep section in the event of two or more contrasting boundaries on velocity and lack of observation system.

The theoretical basis for the finite-difference time and wave fields continuation in three-dimensional version of the field registration in the large offsets is developed. Proved correct mathematical solution of eikonal and wave equations for the special type of grids in three-dimensional and four-dimensional coordinate system.

Wave field modeling is used for validation of correctness to use migration , that is developed in two-dimensional and three-dimensional versions for the large offsets.

The method of an image the geological environment with using finite-difference refraction migration for regional seismic data processing that is presented in the thesis has no analogues in the world.

**Keywords:** refraction waves, regional seismic, DDS (WARRP), kinematic and dynamic migration, wide-angle method, timefield continuation, wavefield continuation, time fields method, finite-difference method.