В І Д З И В

офіційного опонента на дисертаційну роботу
ВЕРПАХОВСЬКОЇ ОЛЕКСАНДРИ ОЛЕГІВНИ "ФОРМУВАННЯ ГЛИБИННОГО ЗОБРАЖЕННЯ СЕРЕДОВИЩА З ЗАСТОСУВАННЯМ КІНЦЕВО-РІЗНИЦЕВОЇ МІГРАЦІЇ ЗА ДАНИМИ РЕГІОНАЛЬНОЇ СЕЙСМОРОЗВІДКИ"
що представлена на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю
04.00.22 – геофізика.

Дисертаційна робота присвячена розвитку нового підходу 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. Безумовно, це є актуальною темою сучасної сейсморозвідки.

Крім того, важливим 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. Кінцево-різницевий метод (КРМ) дозволяє задавати швидкісну модель середовища в дискретній формі, а, отже, може бути задіяний при дослідженні будь-яких складнопобудованих об'єктів сейсморозвідки, а також передбачити різку зміну швидкості на границі розділу. Кінцево-різницева міграція може вважатись найбільш стійким та точним інструментом формування зображення середовища безпосередньо за спостереженим хвильовим полем. Автор доводить це твердження в процесі дослідження 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 автор зосередила увагу саме на варіанті кінцево-різницевої міграції при моделюванні хвильового поля на значних відстанях від пункту збудження як у 2D, так і 3D 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 рр.», № держ. реєстрації 0104U000379.

«Сейсмические и геофизические наблюдения на платформенной территории Украины в 2009-2013 рр.», № держ. реєстрації 0109U000100.

«Моніторинг хвильових процесів та вивчення будови і динаміки структур, які їх моделюють», (2011р.) № держ. реєстрації 0107U002195.

«Геофізичний моніторинг геодинамічних процесів на території України у

зв'язку з вирішенням проблем екологічної та сейсмічної небезпеки» (2012-2016 рр.), № держ. реєстрації 0112U003046.

«Геофізичні дослідження будови і динаміки геологічного середовища для зниження небезпеки від загрозливих явищ ендогенного походження на території України та Росії» (2012-2016), № держ. реєстрації 0112U003451.

«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» (2013-2015рр.), № держ. реєстрації 0111U000231.

А також 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» (2008-2012рр.), № держ. Реєстрації 0111U003415.

«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 рр.), № держ. реєстрації 0113U000978.

«Комплексне геофізичне вивчення глибинної будови, складу і еволюції земної кори з метою визначення вуглеводного ресурсного потенціалу Азово-Чорноморського регіону» (2010-2015 рр.), № держ. реєстрації 0111U000231.

«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, № держ. реєстрації 0111U006649; № Ф 40/96-2012, № держ. реєстрації 0112U006026.

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 віддалях 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.

Як методи досліджень застосовано кінцево-різницеві методи розв'язку диференційних рівнянь для продовження часового та хвильового полів, які складають теоретичну основу міграційних перетворень та моделювання хвильового поля.

Серед основних задач досліджень, проведених в роботі зазначимо:
1. Аналіз та дослідження динамічних і кінематичних характеристик хвильового поля, зареєстрованого на значних віддалях 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 дозволяють 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. 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.
8. Розробка методики формування зображення середовища з урахуванням: складно побудованих границь; наявності двох і більше контрастних за швидкістю границь.
9. Розробка теоретичного базису, алгоритму та програмної реалізації тривимірної міграції поля рефрагованих хвиль, перевірка практичної коректності застосування міграції поля рефрагованих хвиль.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:
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 сейсморозвідки.
3. Розроблено принципово нову інтерактивну версію програмного пакету обробки даних малоглибинної сейсморозвідки 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. Математично доведено коректність та стійкість тривимірних продовжень часового та хвильового полів кінцево-різницевим методом.
7. 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 сейсморозвідки "ProcTOP" впроваджена в виробничу експлуатацію в ТОВ НГВК «Кумран» для обробки сейсмічних матеріалів з метою дослідження ЗМШ. 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".

Апробація результатів дисертації. Основні положення досліджень доповідалися на міжнародних наукових конференціях за кордоном і в Україні.

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.

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** викладено основні етапи становлення і розвитку МЗХ як одного з основних методів сейсморозвідки. Показано, що 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.

Розділ 2 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. Показано, що динамічні характеристики поля, зокрема амплітуди відбитих і рефрагованих хвиль суттєво залежать від швидкісної диференціації середовища.

У **Розділі 3** 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. 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. 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.

Розділ 4 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 в будь-яку точку простору та швидкістю поширення хвиль в цьому просторі. Розрахунок часового поля виконується на спеціального виду косокутній сітці, яка дозволяє найбільш точно відтворити хвильове поле годографа рефрагованої хвилі.

У **Розділі 5** 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 елементи 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. 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.

Розділ 6 містить теоретичні основи продовження часового і хвильового полів у тривимірному варіанті, алгоритми і програмні реалізації кінцево-різницевих 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. Доведена коректність розрахунків за запропонованими схемами. Розроблений алгоритм формування зображень за полем рефрагованих хвиль в тривимірному середовищі. Всі розробки у тривимірному варіанті перевірено на модельному прикладі.

Можливі *зауваження* по дисертації зводяться до наступного.

1. В дисертації зроблено ретельній аналіз літератури, але зважаючи на те, що автор пропонує нову методику, реалізовану в програмні засоби, в тексті не прокоментовано наявність багатьох доступних джерел саме зі схожими, може, тільки за назвою, програмами. Наприклад, www.geophysics.org та інш.
2. В розділі 2 зазначено, що сейсмічні хвилі поширюються у геологічному середовищі після їх збудження природним (землетрус) або неприродним (заплановані вибухи, удари) джерелом шляхом передачі певної енергії пружної деформації у вигляді поступово затухаючих коливань. Але ж

нижче наведено рівняння руху пружного ізотропного середовища. Чи досить для опису реального затухання моделі лише зі сферичним розходженням?

3. В сучасній сейсмоакустиці часто стверджують, що саме ізотропна модель є джерелом можливих похибок. В роботі досягнуто прийнятне узгодженн я з експериментом, то ж чи має сенс ускладнювати модель на анізотропію, чи, скоріше, на врахування в'язкості середовища?
4. В роботі сказано, щоб привести систему рівнянь (2.3) і далі до векторного виду (2.4) необхідно кожне рівняння перемножити на одиничні вектори координатних осей та скласти їх. Але при цьому не отримаємо універсальне рівняння руху для різних систем координат (декартової, сферичної, циліндричної та інших). Потрібно розглянути більш складні похідні та інш.
5. Робота написана сучасною науковою мовою, але є присутніми деякі результати поспіху при оформленні. Відмічено який важливий внесок в розуміння хвильових процесів, що відбуваються в шаруватому середовищі, був зроблений Бреховським [8]. Наведена чимала цитата. Але в списку літератури автором є Бреховских Л.М.

Слід зазначити, що наведені вище зауваження не знижують загальне позитивне враження про дисертацію. Робота добре оформлена та проілюстрована. Зміст автореферату відповідає основним положенням дисертації, стиль викладення відповідає прийнятому в науковій літературі.

Підсумовуючи вищесказане, можна зробити загальний висновок, що подана дисертаційна робота є актуальною, містить наукові положення та науково обґрунтовані результати у галузі геофізики, що розв'язують важливу наукову проблему, має новизну й практичну цінність, а її науковий рівень відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», які висуваються до докторських дисертацій, а автор дисертації Верпаховська Олена Олегівна заслуговує на присвоєння їй наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22 – геофізика.

Головний науковий співробітник
Інституту механіки імені С.П.Тимошенка
НАН України,
доктор фізико-математичних наук Маслов Б.П.

Підпис Б.П.Маслова «Засвідчую»
Вчений секретар