

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

ГРИНЬ ДМИТРО МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 550.834+550.34.097

**МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ РОЗЛОМНО-БЛОКОВОЇ СТРУКТУРИ
ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА ЗА ДАНИМИ СЕЙСМОРОЗВІДКИ**

04.00.22 – геофізика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Київ -2021

Дисертацією є рукопис

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

Науковий консультант доктор фізико-математичних наук,
Верпаховська Олександра Олегівна,
старший науковий співробітник,
Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України,
провідний науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
Стародуб Юрій Петрович
Львівський державний університет безпеки
життєдіяльності,
професор кафедри цивільного захисту і
комп'ютерного моделювання екогеофізичних
процесів

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

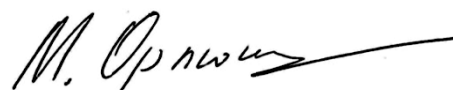
доктор геологічних наук, доцент;
Лісний Георгій Дмитрович,
ТОВ «ГЕОЮНІТ»,
радник генерального директора

Захист відбудеться 13 травня 2021 року о 10 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, просп. Палладіна, 32.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України за адресою: 03680, м. Київ-142, просп. Палладіна, 32 та на електронному ресурсі: <http://www.igph.kiev.ua>

Автореферат розіслано 12 квітня 2021 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради Д.26.200.01
доктор геологічних наук



М. І. Орлюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Вивчення глибинної будови Землі сейсмічними методами зазвичай закінчується побудовою моделей. За результатами глибинного сейсмічного зондування (ГСЗ) будують швидкісні моделі, за часовим розрізом спільної глибинної точки (СГТ) — моделі, які складаються з відбиваючих границь, отриманих в контрастному середовищі. Для побудови швидкісних моделей використовують сейсмічні хвилі, які розповсюджуються на декілька сотень кілометрів, практично у горизонтальному напрямку. У глибинному методі СГТ хвильовий фронт рухається декілька десятків кілометрів, ортогонально до відбиваючої границі і від неї. Унаслідок порівняння цих моделей, часто з'являються неузгодження, інколи протиріччя, котрі необхідно пояснювати.

Обидві моделі є фізичними, вони відображають різні фізичні властивості геологічного середовища, підкреслюючи лише окремі деталі реального геологічного розрізу. Тобто ці моделі не є моделями геологічними. Використання їх у якості геологічних може призвести до недостовірних висновків про геодинамічні процеси і явища та будову досліджуваного регіону.

Враховуючи довгий шлях проходження сейсмічного фронту як по горизонталі, так і по вертикалі, велику кількість різних за властивостями і формою геологічних об'єктів, для методу ГСЗ постає необхідність розробки способів виділення годографів із слабкою енергією відбитих хвиль від глибинних горизонтів і визначення їхньої істинної форми. Ці годографи використовуються для побудови швидкісних моделей, від кількості та якості годографів залежить правильність рішення кінцевої оберненої задачі.

Впродовж десятиліть залишається відкритим питання про можливість використання сейсмічних методів для картування глибинних розломів різних реологічних типів, тектонічних порушень і зон міжрозломного розуцілення. Підтвердженням цього є світова тенденція до створення великої кількості сейсмічних глибинних градієнтно-шаруватих швидкісних розрізів без розломів. Такі безрозломні, або «формально розломні», моделі з низькою точністю їх просторового розміщення надають недостатньо детальну, а інколи і недостовірну інформацію для подальшої геодинамічної та тектонічної інтерпретації.

Здебільшого розломна будова Земної кори відтворена з використанням інформації, отриманої на її поверхні — геологічного обстеження надрозломних територій, або приповерхневих геофізичних методів спостереження за різними фізичними полями. Ці поля використовують для моделювання можливого просторового розташування розломних структур. Тобто побудова глибинних розломів відбувається зверху вниз і не завжди з урахуванням будови кори та мантії.

Проблематичність виявлення розломів у сейсмічних даних пояснюється невисокою роздільною здатністю кінематичної сейсміки, енергетично слабким відбиттям від міжрозломного заповнювача, великими кутами падіння, зашумленням різними за генезисом хвилями-завадами.

Тому постає необхідність у розробці методів, які б дозволяли максимально спростувати сейсмічні хвильові поля, видаляючи хвилі-завади і тим самим підвищуючи роль слабких корисних хвиль, які містять в собі інформацію про

особливості геологічної будови. Для цього необхідно використовувати математичний апарат без нелінійних процедур, який би мінімізував вплив методичних помилок.

Підвищення роздільної здатності даних СГТ можливе за умови використання спектрального аналізу як у частотній, так і у частотно-часовій області, що дає змогу проводити аналіз в окремо вибраній ділянці, а не у всій часовій області сейсмічного запису. У такий спосіб є можливість підвищити чутливість до незначних змін у дисипативних властивостях геологічного середовища. Найвища роздільна здатність буде у метода, котрий аналізуватиме зміну фізичних властивостей (представлену зміною амплітуд базисних функцій) у кожній часовій дискреті, тобто у кожній точці дискретного запису сейсмограми. Під фізичними властивостями можна розуміти частото-залежне згасання енергії сейсмічних хвиль (якщо ми говоримо про хвильове поле, яке втрачає енергію), або поглинальні властивості геологічного середовища (якщо ми говоримо про геологічне середовище, яке поглинає енергію сейсмічних хвиль).

Вирішення питань, породжених співставленням результатів моделювання різними методами, можливе за умови створення методу, котрий не представляв би кінцевий результат у вигляді ще одного фізичного параметра середовища (тобто мав свої протиріччя з іншими і потребував пояснення), а давав би можливість перейти до найбільш зрозумілого способу представлення геологічної будови – форми підземних об'єктів. Інакше кажучи, створення об'єктно-орієнтованого методу, який би представляв геологічний розріз у вигляді монолітних блоків, розломних структур та міжблокового заповнювача, який не має чітко вираженої структури.

Представлення сейсмічних часових розрізів у вигляді розломно-блокової структури середовища дозволяє використовувати результати роботи не тільки у вирішенні фундаментальних задач, а й широкого спектра прикладних.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана за наступними науковими темами у відповідності з науковою тематикою: 1) *відділу регіональних проблем геофізики ІГФ НАН України: «Вивчення глибинної будови та геодинамічного розвитку літосфери північно-західного шельфу Чорного моря та південно-західної частини Східно-Європейської платформи у зв'язку з перспективами нафтогазоносності»* (2008), № держ. реєстрації 0108U004822; «Геофізичні дослідження літосфери зони зчленування Східно-Європейської та Західно-Європейської платформ у зв'язку з перспективами нафтогазоносності» (2009), № держ. реєстрації 0109U002947; «Геофізичні дослідження глибинної будови і геодинаміки літосфери зони зчленування Східно-Європейської платформи та Скіфської плити для оцінки перспектив нафтогазоносності» (2009–2013), № держ. реєстрації 0109U000103; «Сейсмічні дослідження земної кори і верхньої мантії Землі північно-західного шельфу Чорного моря у зв'язку з перспективами нафтогазоносності (проект DOBRE-5)» (2010), № держ. реєстрації 0110U006596; «Геодинамічний розвиток літосфери України та формування і розміщення родовищ корисних копалин (2012–2016)», № держ. реєстрації 0112U003044; «Сейсмічні дослідження літосфери Центрального та Північного регіонів України для оцінки перспектив нафтогазоносності (GEORIFT)» (2012–2016), № держ. реєстрації 0112U003450; «Геофізичні дослідження глибинної будови, еволюції та геодинаміки

Азово-Чорноморського регіону України та Криму у зв'язку з оцінкою перспектив нафтогазоносності (2014–2018)», № держ. реєстрації 0114U000234; «Сейсмічні та геофізичні спостереження на платформній частині території України у 2014–2018 рр.», № держ. реєстрації 0114U000231; «Узагальнення та аналіз геофізичних даних для Східно-Європейської та Західно-Європейської платформ України» (2017), № держ. реєстрації 0117U000779; «Геофізичні дослідження глибинної будови, еволюції та геодинаміки зони зчленування Східно-Європейської та Західно-Європейської платформ (TESZ – Транс-Європейська структурна зона) у зв'язку з прогнозом пошуків корисних копалин» (2019–2023) № держ. реєстрації 0119U000076; «Створення геолого-геофізичних моделей літосфери зони зчленування Східно-Європейської та Західно-Європейської платформ України» (2020), № держ. реєстрації 0120U102470; 2) *відділу сейсмічної небезпеки ІГФ НАН України* за наступними науковими темами: «Геофізичний моніторинг геодинамічних процесів на території України у зв'язку з вирішенням проблем екологічної та сейсмічної небезпеки» (2012–2016), № держ. реєстрації 0112U003046; «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; «Сейсмічні та геофізичні спостереження на платформній частині території України у 2014–2018 рр.», № держ. реєстрації 0114U000231; «Сейсмічні та геофізичні спостереження на платформній частині території України у 2019–2023 рр.», № держ. реєстрації 0119U000078; 3) *конкурсних робіт*: «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» (2008–2012), № держ. реєстрації 0111U003415; «Вдосконалення програмного забезпечення обробки просторових сейсмічних спостережень з урахуванням особливостей будови приповерхневого геологічного розрізу Донбасу» (2013–2015), № держ. реєстрації 0113U000978; «Створення техніко-технологічного сейсмічного комплексу для інженерних геолого-геофізичних досліджень» (2016), № держ. реєстрації 0116U003999; «Створення дослідного зразка сейсмічного комплексу для вивчення верхньої частини геологічного розрізу» (2017), № держ. реєстрації 0116U003999; «Створення програмно-апаратного сейсмічного комплексу для розв'язку фундаментальних та прикладних задач геофізики» (2018), № держ. реєстрації 0118U001749; «Створення багатофункціонального апаратно-методичного сейсмічного комплексу» (2019), № держ. реєстрації 0119U002818; 4) *прикладні робіт*: «Виконання геофізичних робіт на майданчику будівництва висотної локальної споруди (о. Зміїний) в заданих точках із глибиною зондування до 20 метрів» (2018 р.), № держ. реєстрації 0117U000774; «Надання науково-технічних послуг з аналізу геотехнічної підоснови ґрунту південної частини о. Зміїний Вилківської міської ради Кілійського району Одеської області» (2018 р.), № держ. реєстрації 0118U005253.

Мета дослідження – розробити високороздільний метод визначення розломно-блокової структури геологічного середовища за сейсмічними даними для рішення прикладних і фундаментальних задач геофізики.

Завдання дослідження – за допомогою розробленого методу обробити наявні глибинні дані СГТ і, використовуючи отриманий результат, пояснити відмінності у швидкісній і кінематичній моделі геологічного розрізу. Відтворити геологічну будову тонкошарового шахтного поля в розломно-блоковому вигляді з метою пошуку можливих неоднорідностей, пов'язаних з метаном.

Об'єкт дослідження – хвильові сейсмічні поля (сейсмограми, сейсмічні записи) від глибинних ширококутних сейсмічних досліджень ГСЗ (зарубіжний аналог WARRP) і отримані за методом СГТ від глибинних і приповерхневих робіт хвилі-завади та слабоенергетичні годографи відбитих хвиль.

Предмет дослідження – частото-залежне згасання енергії сейсмічних хвиль, яке відбувається під час проходження фронту сейсмічної хвилі через геологічні об'єкти з різними поглинальними властивостями.

Методи дослідження та достовірність і обґрунтованість отриманих результатів і висновків. Для дослідження відносного згасання енергії сейсмічної хвилі під час проходження її через геологічні об'єкти та визначення їх форми використовувався спектральний аналіз у частотній області, wavelet-аналіз у просторово-частотній, матричний та різницевий в часовій області представлення хвильових полів.

У процесі побудови швидкісних моделей за комбінованим профілем DOBRE-99&DOBRE-2 проводився аналіз середньоквадратичної помилки (розбіжності) – невідповідності між змодельованим та спостереженим часом проходження сейсмічної хвилі. Надійність кінцевої моделі забезпечувалась врахуванням невідповідності між змодельованим та спостереженим часом проходження сейсмічної хвилі, просторової роздільної здатності по товщині осадового басейну, швидкостей (у верхній і нижній корі) й глибині залягання нижньої кори і границі Мохо.

Достовірність результатів розв'язку оберненої динамічної задачі при використанні сейсмічних даних з низьким рівнем корисних сигналів забезпечується багаторазовим зменшенням впливу на кінцевий результат низки завад, які присутні у вхідних сейсмічних даних або отриманих в наслідок використання математичного апарату. Для зменшення впливу суб'єктивізму у відтворенні розломно-блокової структури середовища використовувались статистичні методи накопичення (з багаторазовим перекриттям) проміжних значень частото-залежного згасання енергії сейсмічних хвиль з підсиленням спільних та відкиданням недовизначених елементів геологічного середовища.

Можливість відтворення правильної форми рукотворних підземних споруд на великих глибинах у вирішенні прикладних задач свідчить про високу роздільну здатність методу і достовірність та обґрунтованість результатів обчислення оберненої динамічної задачі.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Розроблений спектральний метод визначення фізичних параметрів середовища з високою дискретністю за глибиною (часом), яка відповідає дискретності сейсмічного запису, вперше дає можливість вивчати дрібні деталі будови геологічного середовища навіть на великих глибинах.

2. Запропоновано комплекс методів, який дає змогу суттєво зменшити енергетичну складову хвиль-завад різного походження, зокрема і методичного, які виникають при використанні обмежених у часі функцій, а також використовувати сейсмічні записи з низьким рівнем корисного сигналу.

3. Вперше за допомогою методу визначення розломно-блокової структури за сейсмічними даними відтворена і пояснена будова осадового чохла, кори і коромантійної суміші, яка знаходиться на глибині 35 км. Пояснено відмінності у формування різних частин Донецької складчастої споруди.

4. Вперше проведено порівняльний аналіз моделей середовища, які побудовані за однією теорією, але представляють різні фізичні властивості ґрунтів. Використано швидкісну модель, кінематичну (відбиваючі границі) і модель поглинальних властивостей середовища, представлену в розломно-блоковому вигляді. Встановлено причини виникнення розбіжностей між ними у вигляді швидкісних аномалій.

5. Запропоновано методику адаптивної технології проведення сейсмічних спостережень. Її використання дає змогу отримати високоякісні сейсмічні дані (під час польових робіт) для визначення дисипативних параметрів середовища.

6. Запропоновано метод виявлення та продовження в часі слабких годографів відбитих від глибинних горизонтів хвиль. Використання методу дозволило зменшити зону невпевненої глибинної інтерпретації під Азовським і Чорним морями.

7. Для вирішення прикладних задач запропоновано автоматизований пошук на тонкошарових вуглевмісних шахтних полях розломів та монолітних структур за даними просторових поглинальних властивостей тривимірного середовища, використовуючи властивості wavelet-перетворення виявляти нестационарні явища в стаціонарних хвильових полях.

Практичне значення отриманих результатів.

Результати дисертаційної роботи мають широкий спектр використання – від інженерної геофізики до пояснення глибинної будови Землі. Розроблений метод використовується для вивчення будови складних геологічних об'єктів з великою кількістю геологічних шарів, блоків, складок, тріщин, розривних порушень (тектонічних скидів, зсувів, насувів).

Більшість сучасних профілів ГСЗ перетнули нафтогазоносні області України і, як видно з швидкісних моделей, мають багато спільного – товстий осадовий чохол, де накопичуються вуглеводні, тонку розущільнену розломами кору, наявність високошвидкісного тіла. Детально вивчаючи мантийно-корову будову запропонованим методом можна пояснити глибинні причини утворення родовищ і шляхи міграції вуглеводнів у верхні, осадові, породи.

Метод дає змогу детально вивчати вертикальні, або близькі до вертикальних, геологічні об'єкти розломного типу, використовуючи сейсмічні дані. Вирішення такої задачі є важливим, оскільки 94 % родовищ і рудопроявів пов'язані саме з зонами розломів.

Дані про глибинність та протяжність розривних порушень необхідні для визначення сейсмічності регіонів і встановлення рівня сейсмічної небезпеки, особливо на платформній малодослідженій частині України.

Розроблену методику дослідження детальної будови шахтних полів можна використовувати для визначення місць можливого проникнення води і підтоплення шахт. Це питання особливо актуальне для сходу України.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати та висновки, викладені в дисертаційній роботі, одержані автором особисто та опубліковані в журналах, які входять до затвердженого МОН переліку наукових фахових видань України з фізико-математичних наук. Здобувач брав участь в усіх ширококутних сейсмічних дослідженнях, які проводились в Україні за останні 22 роки, починаючи з проведення польових робіт і первинної обробки отриманих даних та закінчуючи геологічною інтерпретацією кінцевих моделей. Всі дослідження виконувалися в співробітництві з закордонними партнерами з геофізичних установ Польщі, Данії, Німеччини та багатьох інших. Результати цієї роботи здобувача відображені у монографії [Кендзера та ін., 2019].

У статті [Гринь та ін., 2007] здобувач запропонував методику визначення фазових і групових швидкостей сейсмічних хвиль для неоднорідного геологічного середовища. Для підвищення коректності вирішення цієї задачі здобувач запропонував спосіб видалення різношвидкісних хвиль-завад з сейсмічного поля, отриманого в тонкошаровому геологічному середовищі [Gryn et al., 2010].

У серії робіт, присвячених вивченню глибинної будови землі [Старостенко та ін., 2009; Starostenko et al., 2013a,б, 2015, 2017, 2018, 2020; Janik et al., 2020, Starostenko et al., 2020], здобувачу належить формування польових сейсмічних записів, детальний аналіз вихідного хвильового сейсмічного поля, ідентифікація відбитих і заломлених хвиль, моделювання синтетичних сейсмограм і порівняння їх з спостереженими, участь в розрахунках швидкісних моделей.

У роботі [Starostenko et al., 2016] здобувач займався виявленням та ідентифікацією типів хвиль, використовуючи запропоновану ним методику пошуку слабоенергетичних відбитих від границі Мохо хвиль для збільшення глибини дослідження, та підбором швидкісної моделі на основі трасування сейсмічних променів і порівняння результату моделювання зі спостереженими даними.

Дисертант приймав участь у створенні та узгодженні комплексної моделі [Пашкевич и др., 2018] глибиною 220 км та довжиною 770 км, де використовувалась створена ним комбінована швидкісна модель з системою розломів за профілем DOBRE-99 + DOBRE-2.

У статтях [Роман та ін., 2011–2013, 2015] здобувач запропонував методику модифікованої адаптивної технології проведення польових сейсмічних робіт для суттєвого зменшення впливу верхньої частини сейсмічного розрізу й отримання високоенергетичних і повночастотних сейсмічних даних необхідної якості для детального відтворення розломно-блокової будови сейсмічного розрізу. Створене дисертантом програмно-апаратне обладнання для високороздільної адаптивної технології описане в публікаціях [Гринь та ін., 2019а, г] та патентах на винахід № 116423 [2018] і № 119203 [2019]. У праці [Сапужак та ін., 2019] здобувачем представлено результати використання елементів математичного апарату обробки сейсмічних даних для вирішення прикладних задач.

У публікаціях без співавторів [Гринь, 2011, 2019б, 2019в, 2020а–в] описані методи підвищення роздільної здатності слабоенергетичних та зашумлених сейсмічних даних, визначення розломно-блокової будови глибинного та тонкошаруватого тривимірного вугільного середовища з автоматизованим способом виявлення розломів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної доповідались на наступних наукових конференціях і симпозиумах: Всеукраїнська наукова конференція «Моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану» Київ, 2006; Models of the Earth's crust and upper mantle, VSEGEI, St. Petersburg, 2007; Tenth. Geoph. Reading by Fedynsky V.V. name, Moscow, 2008; Всероссийская конференция «Дегазация Земли: геомеханика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы», Москва, 22–25 апреля 2008 г.; 3-я Международная научно-практическая конференция «Современные методы сейсморазведки при поисках месторождений нефти и газа в условиях сложнопостроенный структур», Крым, г. Феодосия, 16–22 сентября 2012 г.; The 33rd General Assembly of the European Seismological Commission (GA ESC 2012), Russia Moscow, Moscow-Obninsk 19–24 August 2012; The 15th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and Their Margins «SEISMIX 2012», (China, Beijing, 16–20 September 2012); European Geosciences Union General Assembly 2013 (Austria, Vienna, 07–12 April 2013) ; 16th SEISMIX International Symposium (Spain, Barcelona–Castelldefels, 12–17 October 2014); Final symposium «Evolution of the Black Sea to Central Asia Tethyan Realm since the Late Paleozoic», Paris, France, December 8–9, 2014; 17th International SEISMIX Symposium, Macdonald Aviemore Resort, Aviemore, Scotland, 15–20 May 2016; European Geosciences Union General Assembly 2017, 23–28 April, Vienna, Austria; III міжнародна наукова конференція, м. Київ, 3–5 жовтня 2017 р.; Міжнародна наукова конференція, присвяченої 100-річному ювілею Національної академії наук та Геологічної служби України, 2–4 жовтня 2018 р.; 18th International SEISMIX Symposium Seismology between the Poles, 17–22 June 2018, Cracow, Poland; European Geosciences Union General Assembly 2019 Vienna, Austria, 7–12 April 2019; SEISMIX 2020 –19th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and their Margins, 15–20 March 2020, Perth, Australia; European Geosciences Union General Assembly, 4–8 May 2020.

Структура й обсяг дисертації. Робота виконана на 332 сторінках машинописного тексту, складається з анотації, вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 281 сторінки. Робота ілюстрована 125 рисунками та 2 таблицями. Список використаних джерел містить 203 найменувань.

Подяки. Здобувач висловлює подяку академіку НАН України, доктору фіз.-мат. наук, професору Віталію Івановичу Старостенку за всебічну підтримку.

Автор дисертаційної роботи висловлює подяку науковому консультанту Верпаховській Олександрі Олегівні за поради, наукові консультації та всебічну підтримку при виконанні роботи.

Здобувач висловлює щире подяку керівнику відділу Регіональних проблем геофізики Омельченку В.Д. за всебічну підтримку у наукових починаннях.

Дисертант висловлює подяку ДГП “Укргеофізика” і особисто Першому заступнику генерального директора А.П. Толкунову за багаторічну плідну співпрацю та допомогу в проведенні польових випробувань створених автором зразків сейсмічного обладнання.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми роботи, її мета і окремі завдання, наведено методи досліджень, матеріали про наукову новизну одержаних результатів, особистий внесок здобувача, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами та практичне значення отриманих результатів.

У **першому розділі «Методика виділення розломно-блокової структури геологічного середовища за даними глибинного методу СГТ»** представлено розроблений дисертантом метод визначення середнього значення частотозалежного згасання енергії сейсмічних хвиль у геологічному середовищі. Визначення цієї дисипативної властивості середовища відбувається з високою роздільною здатністю, яка відповідає частоті просторової та часової дискретності сейсмічних даних СГТ, які використовуються в якості вхідного матеріалу. Розроблений метод визначає *еквівалентне* частотозалежне згасання енергії сейсмічних хвиль. Для оконтурення глибинного геологічного об'єкта чи виділення зони тектонічного розлому природа поглинання не має значення. Використання сумарного ефекту згасання робить аномалії більш контрастними і вираженими.

Динамічні особливості хвильового поля виявляються в зміні форми або амплітуди відбитого сигналу в часі або просторі, які пов'язані з аномальними характеристиками конкретних геологічних об'єктів. Розв'язання цього типу задач дає змогу вивчати літологію, пористість, флюїдонасиченість пластів. На сьогодні відомо понад 50 різних динамічних параметрів сейсмічних записів (Степанов, 2013). Їх можна поділити на групи — амплітудні, частотні, енергетично-спектральні та зміни форми імпульсу.

Основним математичним апаратом, який використовувався для вивчення змін поглинальних властивостей порід, які відображаються в сейсмічному хвильовому полі, був спектральний аналіз. За його допомогою є можливість досліджувати обрану ділянку, а не всю сейсмічну трасу, виокремлюючи таким чином локальні аномалії. Один із методів розв'язку оберненої динамічної задачі — використання як характеристики поглинання безрозмірної величини, яку називають логарифмічним декрементом згасання. *Декремент загасання* показує, у скільки разів зменшується

амплітуда за одне коливання, $\gamma = \frac{A(t)}{A(t+T)} = e^{\beta t}$, де $A(t)$ — амплітуда коливання,

$A(t+T)$ — амплітуда коливання через період T , t — час, β — коефіцієнт згасання (чим він більший, тим швидше зменшується амплітуда наступних коливань). Використання такого способу визначення дисипативних властивостей можливе за умови збереження в сейсмічних записах всіх динамічних особливостей сейсмічного хвильового поля. Однак більшість сейсмічних даних (сейсмічних профілів) проходять стандартний граф обробки, який передбачає присутність нелінійних математичних методів, зокрема використання процедури АРУ — автоматичного

регулювання рівня запису. Така процедура незворотно ушкоджує всі індивідуальні особливості хвильового поля а також ліквідує прояви згасання енергії сейсмічної хвилі при проходженні через середовище, яке проявляється у експоненціальній кривій.

Алгоритм визначення розломно-блокової структури геологічного середовища передбачає етап підготовки сейсмічних даних до інтерпретації (вилучення неінформативних хвиль-завад, зміщення спектра з низькочастотної області у високочастотну, аналіз амплітудно-частотного складу сейсмічних записів), вибір форми передавальних функцій для фільтрів гаусового типу з урахуванням частотного діапазону, мінімізація впливу ефектів Гіббса, розрахунок обвідних груп базисних функцій, розрахунок згасальних властивостей сейсмічних хвиль на певній ділянці геологічного середовища.

Згідно з теоремою Фур'є, кожену функцію, яка задовольняє умовам Діріхле, можна представити у вигляді суми нескінченної кількості синусоїдальних складових, які ще називають базисними функціями (рис. 1). У сейсміці перетворення Фур'є використовується для перетворення часової функції в частотну область. Пряме перетворення Фур'є: $F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$, $S(\omega) = \sqrt{A(\omega)^2 - jB(\omega)^2}$ – амплітудний спектр.

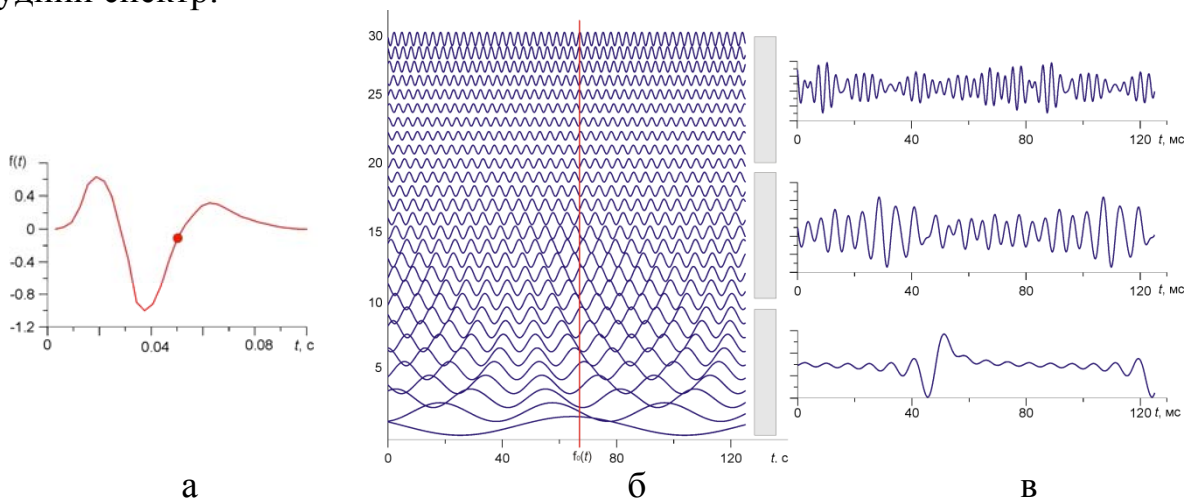


Рис. 1. Елементарний сигнал (а), базисні функції з нормованою амплітудою і фазовим зсувом, отримані за амплітудно-фазовим спектром елементарного сигналу (б), сумарна сейсмограма з групи базисних функцій: 1–10 Гц, 11–20 Гц, 21–30 Гц (в).

У запропонованому здобувачем методі для обчислення згасання енергії сейсмічної хвилі необхідно визначити вузькосмугові базисні функції, за допомогою яких визначаються обвідні перехідні характеристики. Алгоритм визначення функції згасання сейсмічних хвиль у просторі передбачає обчислення вузькосмугових обвідних сейсмічних трас з використанням фільтрів, які мають вигляд функції Гауса. За умови браку частотного діапазону для рішення динамічних задач необхідно максимально ефективно використовувати наявну низькочастотну складову сейсмічних записів. Однак проводити фільтрацію смуговим фільтром з однаковою смугою пропускання без внесення артефактів і неконтрольованих змін у

низькочастотну область неможливо (рис. 2). Похибки виникають через зміну довжини передавальної функції фільтра, формування П-подібного фільтра в околі нульової частоти, а відтак і появи різночастотних ефектів Гіббса.

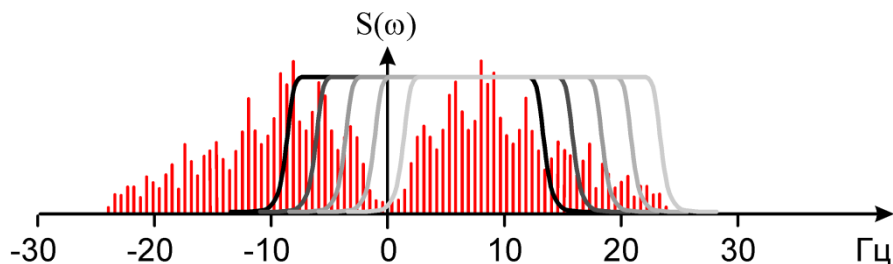


Рис. 2. Амплітудний спектр сейсмограми і п'ять передавальних функцій фільтрів гаусового типу з поступовим зміщенням у частотній області на 2 Гц.

Одна з небагатьох можливостей коректно вирішити цю проблему – зсунути спектр у більш високочастотну область на частоту $\pm\omega_0$. Це можливо зробити, використовуючи механізм модуляції сейсмограм. При цьому форма амплітудного спектра не змінюється. Багатотональний балансно-модульований сигнал має подвійний симетричний спектр відносно частоти ω_0 , яка в нашому випадку становить 25 Гц (рис. 3),

$$u(t) = \frac{A_i}{2} \left\{ \sum_{i=1}^I M_i \cos[(\omega_0 + \Omega_i)t + \Phi_i] + \sum_{i=1}^I M_i \cos[(\omega_0 - \Omega_i)t - \Phi_i] \right\}, \text{ де } M - \text{ коефіцієнт}$$

амплітудної модуляції, який знаходиться у межах від 0 до 1, A_i – амплітуда коливань, Φ_i – фази гармонік Ω_i (Гумен та ін., 2017). Такий спосіб дозволяє спектр корисних сигналів пересунути від наднизькочастотної області, у якій під час фільтрації виникають непоправні методичні похибки – артефакти.

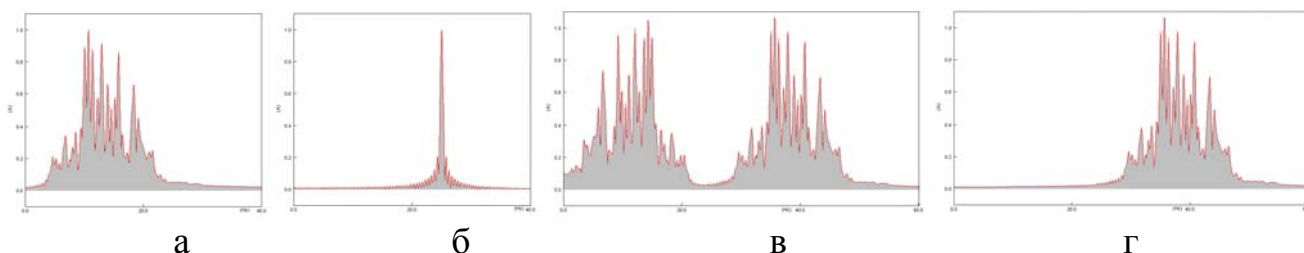


Рис. 3. Поетапність перенесення спектра з низькочастотної області у високочастотну. Спектр сейсмограми (а), спектр модулюючої частоти $\omega_0 = 25$ Гц (б), здвоєний спектр модульованої сейсмограми (в), права частина здвоєного спектра (г).

У рішенні обернених динамічних задач сейсміки використовувалась права частина спектра з видаленою лівою частиною (рис. 3, г). Завдяки цьому виключались значні похибки, пов'язані з необхідністю застосовувати максимально широкі оператори фільтрів (невизначеність Гейзенберга) для обчислення вузьких базисних функцій, які відповідають за просторову роздільну здатність сейсмограм.

Значну увагу дисертантом було приділено вибору форми передавальних функцій для фільтруючого оператора гаусового типу, оскільки потрібно мінімізувати

незворотні спотворення в інформативній частині сейсмічних записів СТГ, які з'являються через вимушене обмеження кількості спектральних складових, та забезпечити максимальну часову (глибинну) роздільну здатність, враховуючи необхідність інтерпретації даних з великих глибин.

Необхідність використовувати часові або частотні обмеження в перетворенні Фур'є призводять до появи ефектів Гіббса – затухаючого коливання на всьому частотному або часовому проміжку (Кононюк, 2011). Тому на практиці намагаються послабити цей тип завад за рахунок зменшення детальності фільтрованих даних або використовуючи інші вагові функції (Лиференко, Сердюков, 2009), окрім функції Гауса, зокрема функції Хемінга, Лапласа, Кайзера.

Для визначення форми обвідних використаємо інтегральне перетворення Гільберта (Гумен та ін., 2017, Кононюк, 2011), яке має загальний вигляд

$$\tilde{x}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\lambda)}{\pi(t-\lambda)} d\lambda, \text{ де } x(t) \text{ – теоретична сейсмограма. Перетворення Гільберта є}$$

важливим для сейсміки, оскільки воно розділяє кінематичну й енергетичну складову сейсмічного хвильового поля (Степанов, 2013).

Сумарна сейсмограма групи базисних функцій, отриманих у результаті фільтрації вхідної сейсмограми $F(t, \omega)$ буде мати вигляд: $\Omega_k(t, \omega_i) = \sum_{i=1}^k F(t, \omega_i)$, де $k = 1, 5$ – кількість використаних передавальних функцій фільтра, $\omega_i \in (\omega_{L_k} \div \omega_{H_k})$, де ω_{L_k} і ω_{H_k} – полоса пропускання передавальної функції смугового фільтра (рис. 4).

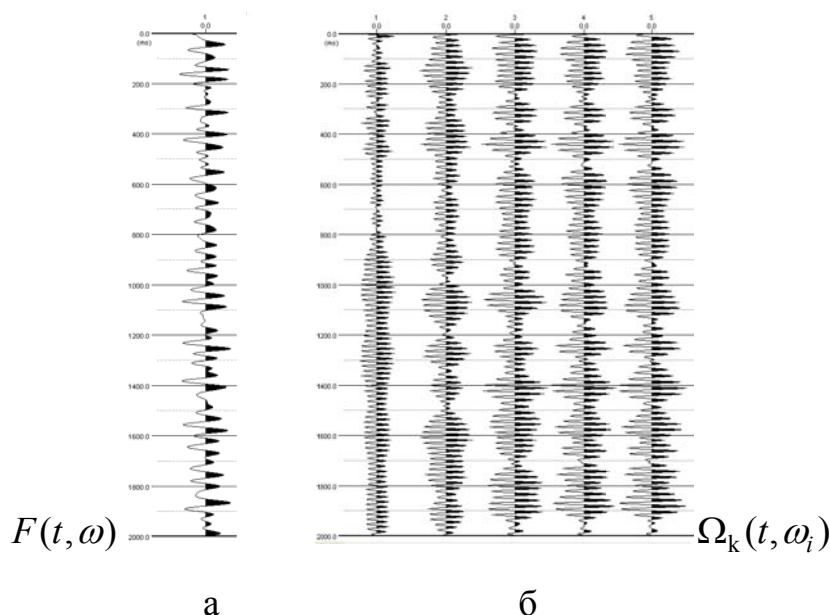


Рис. 4. Перехід від сейсмограми до обвідної базисних функцій: а – частина сейсмограми ($\Delta t=12 \div 14$ с) з профілю СТГ DOBREfraction2000; б – сумарні сейсмограми $\Omega_k(t, \omega_i)$ з групи базисних функцій.

Обвідні сумарної сейсмограми $\Omega_k(t, \omega_i)$ базисних вузькосмугових сейсмотрас з урахуванням частоти і часу перепишемо у вигляді $A_k(t, \omega_i) = \sqrt{x^2(t, \omega_i) + \tilde{x}^2(t, \omega_i)}$.

Для подальшої реалізації алгоритму методу визначення розломно-блокової структури середовища запишемо відношення обвідних до третьої обвідної:

$$B_k(t, \omega_i) = \frac{A_k(t, \omega_i)}{A_3(t, \omega_3)}, \text{ де } i = 1, n.$$

Детальний аналіз особливостей функцій згасання в точці простору залишимо за рамками дисертаційної роботи. Обмежимося найпростішим аналізом – знаходженням середнього значення згасання: $\Theta(t) = \sum_{k=1}^5 \frac{B_k}{B_3} / N$, де N – кількість обвідних вузькосмугових базисних функцій сейсмограми, на практиці їх використовувалось 5, (рис. 5).

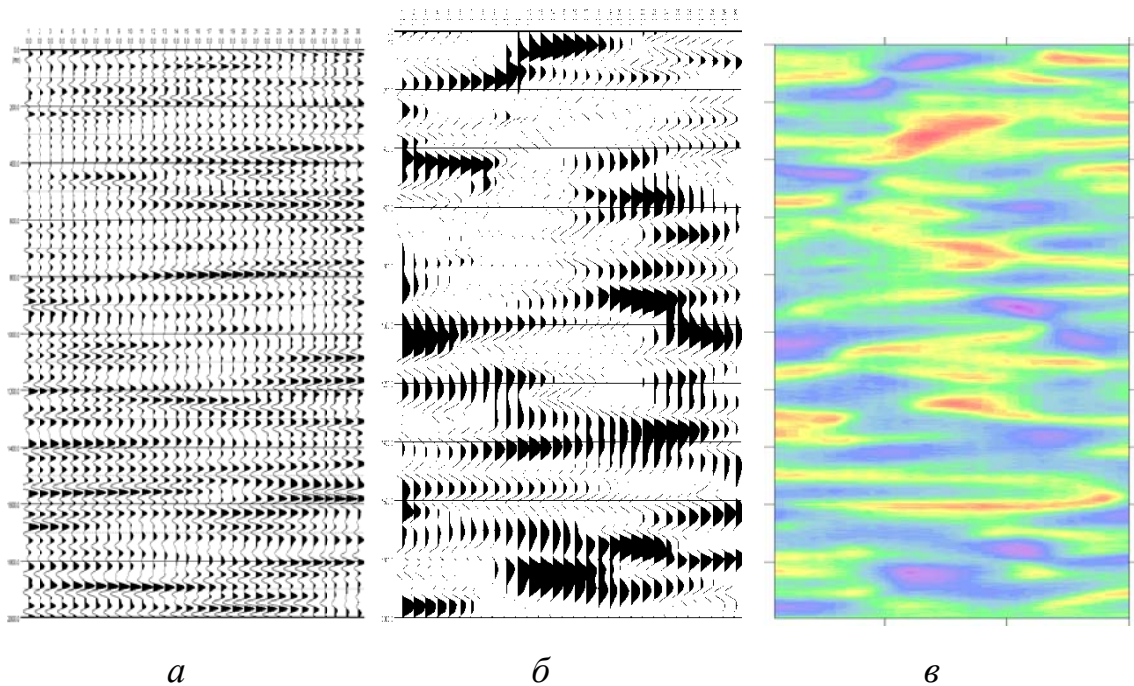


Рис. 5. Частина сейсмічного профілю СГТ DOBREReflection2000 (без хвиль-завад) на часі $t = 11 \div 13$ с (глибина приблизно 40 км), довжиною 525 м: *а* – вхідна сейсмограма, *б* – частотозалежне усереднене згасання енергії сейсмічної хвилі у вигляді гармонічної функції, *в* – частотозалежне усереднене згасання енергії сейсмічної хвилі (ділянка короманійної суміші) у кольоровому вигляді, де мінімальні і максимальні значення представлені червоними і синіми відтінками відповідно.

Для коректного визначення розломно-блокової будови середовища необхідно використовувати сейсмічні записи, які відповідають чітким критеріям якості цифрових даних. На сейсмічних записах мають бути відсутні когерентні та некогерентні природні хвилі-завади. Когерентні хвилі зазвичай прослідковуються на декількох трасах одночасно. До цього типу хвиль належать поверхневі хвилі Релея, Лява, Стоунлі, відбиті та відбито-заломлені від поверхневих структур зони малих швидкостей, кратні хвилі, залишки низькошвидкісних поверхневих хвиль або хвиль, що утворилися на клиноподібному розриві (ефект дифракції) відбивного горизонту та за різкої зміни його поглинальних властивостей та інші. Для видалення нецільових

хвиль запропоновано різницевий алгоритм, який реалізовано за переважаючим (горизонтальним) напрямком осей синфазності інтенсивних реперних хвиль на сейсмічному профілі. Задача, яка вирішується у цій частині розділу – завершити формування хвильового поля цільових хвиль згідно з алгоритмом глибинного методу СГТ, який відрізняється від стандартного використанням лише незначної найбільш енергетичної частини відбитої хвилі, яка знаходиться в точці формування її годографа. Достатність енергії для виділення відбиваючих горизонтів забезпечується статистичним накопиченням відбиттів від глибинних горизонтів під час багаторазової роботи джерела сейсмічних хвиль на одному пункті вибуху.

Представимо сейсмічний профіль глибинного методу СГТ у вигляді прямокутної матриці $A = \|a_{un}\|$, де стовпці і рядки задані множиною дискретних відліків з кожної траси за часом $t = u\Delta t$, $u = 1, 2, \dots, U$ і простором $x = n\Delta x$, Δx — крок між точками спостереження $n = 1, 2, \dots, N$.

Для того, щоб отримати горизонтальні, або з невеликим нахилом відбиваючі границі, спочатку визначимо залишкові хвилі і завади, а потім, використовуючи їх, — цільові. Побудуємо алгоритм усереднення векторів у деякому біжучому вікні на інтервалі k точок спостережень за матрицею $\|a_{un}\|$. Загальний вираз сумотраси з K

$$\text{векторів у біжучому вікні матриці буде } \tilde{a} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K a_{m,k}. \quad (1)$$

На основі виразу (1) за матрицею A з урахуванням горизонтальності осі синфазності відбитої хвилі від реперного горизонту часовий розріз можна представити у вигляді матриці з елементами: $\tilde{A} = \|\tilde{a}_{mn}\|$.

Усереднення виразу (1) за напрямком найбільш близьке до значення відбитої горизонтальної цільової хвилі. Отже матриця \tilde{A} буде складатися з нецільових хвиль-завад. Для відновлення реперного горизонту (цільових хвиль) у часі та близьких за напрямком відбиттів слід відняти від матриці A матрицю \tilde{A} : $S = A - \tilde{A}$.

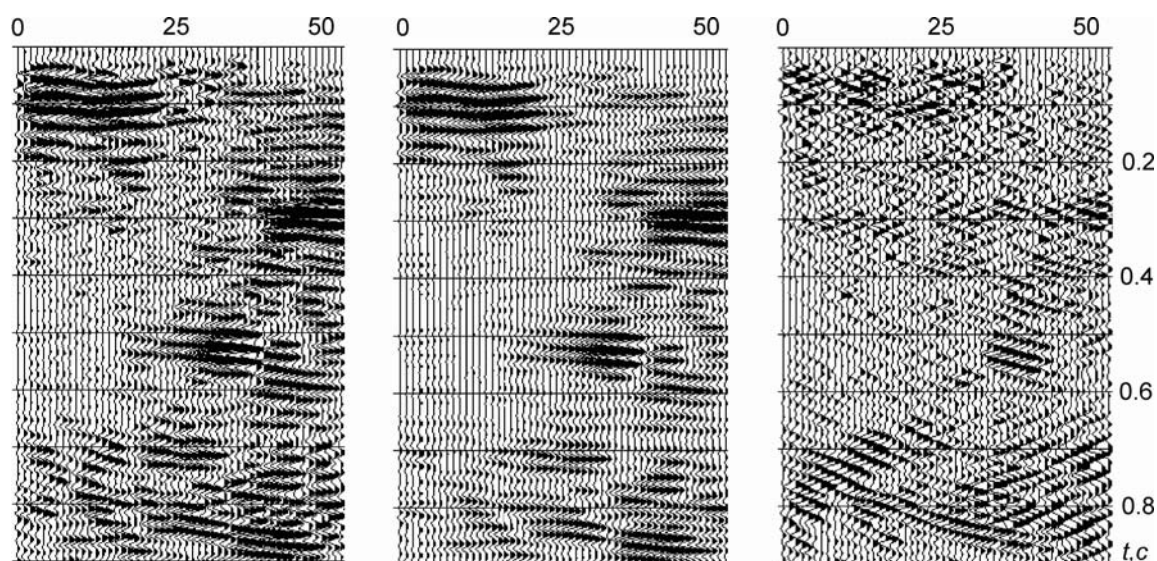


Рис.6. Сейсмічний профіль СГТ КЛ-71/1020, який проходить перпендикулярно до Богданівського скиду і розділений на корисне хвильове поле та поле завад.

Математичне сподівання хвиль, що не збігаються з напрямком осі синфазності відбиттів від реперного горизонту, особливо випадкових складових, згідно з виразом $\lim_{n \rightarrow R} \frac{1}{R} \sum_{n=1}^R b_{mn} \rightarrow 0$ зменшується або наближається до нуля.

Для прикладу показано видалення штучних хвиль складної форми, які утворюються за відсутності достовірної інформації про розподіл швидкостей в геологічному середовищі для міграції Кірхгофа. В такому випадку на мігрованих сейсмічних розрізах з'являються характерні дугоподібні штучні хвилі, які не мають геологічної основи. Така ситуація часто зустрічається на коротких профілях з малою кількістю сейсмограм (рис. 6).

Оскільки якість вхідних сейсмічних даних є вирішальною для визначення дисипативних параметрів середовища, розглянуто питання створення адаптивної технології проведення сейсмічних робіт, метою використання якої є отримання в польових умовах сейсмічних даних з мінімальним впливом верхньої частини сейсмічного розрізу на наповнення спектрального складу сейсмограм. Адаптивне функціонування сейсмокомплексу в процесі відпрацювання фізичних спостережень здійснюється відповідно до результатів порівняння заданих і фактично отриманих спектрів відношення сигнал-завада, що призводить до керованої зміни форми СВІП сигналу. Для вібраційних сейсмокомплексів границі дефіцитних ділянок отриманого спектра визначають діапазон частот вібрації, а глибина дефіцитних ям – енергію зондувальних сигналів.

У другому розділі «Глибинна будова літосфери південно-східної частини України за даними ГСЗ та СГТ попередніх років» представлена вивченість території сейсмічними методами СГТ і ГСЗ і глибинні дані, які використовувались дисертантом для створення початкової швидкісної моделі по профілям DOBRE-99 і DOBRE-2. Загальна довжина комбінованого профілю складає 775 км. Він перетинає Воронезький кристалічний масив, Донецьку складчасту споруду (ДСС), Азовський масив, який є частиною Українського щита, Азовське море, Керченський півострів і північ Східночорноморського басейну.

У результаті сейсмічних досліджень 60—70-х років ДСС була отримана інформація про будову басейну та поверхні фундаменту. Протягом наступних трьох десятиліть уздовж наявних профілів були побудовані швидкісні моделі за Р-хвилями за допомогою різних методик. Деякі швидкісні моделі представлені в публікаціях (Павленкова, 1996; Ільченко, 1997; Stephenson et al., 2001). В них показано, що границя Мохо на кілька кілометрів нижче осі (між бортами басейну в дніпровській частині ДДБ) і майже горизонтальна у ДСС. Зі свого боку, товщина кори субосадового шару зменшується з 30–35 до 20–25 км відповідно. Ці дані ГСЗ використовувались впродовж багатьох років для пояснення геодинамічних процесів і будови ДСС, включаючи визначення регіональної геометрії кристалічного фундаменту та поверхонь границі Мохо (наприклад, (Сологуб та ін., 1977; Chekunov et al., 1992; Ільченко, 1992; Ільченко, Степаненко, 1998)). Згідно з публікаціями (Chekunov et al., 1992; Stephenson et al., 1993, 2001) вважалося, що границя Мохо заглиблюється під ДСС.

Для вивчення ДДБ та ДСС з використанням сучасних технологій було проведено регіональне рефракційне ширококутне сейсмічне дослідження DOBRE'99, ініційоване Європейським науковим фондом EUROPROBE. Основна мета проекту DOBRE'99, яка була вирішена за участі дисертанта, – вивчення глибинної будови ДСС, та визначити процеси формування рифтового басейну (розриву) і можливих інверсій, встановлення механізмів внутрішньопластової тектоніки та динаміки осадового басейну.

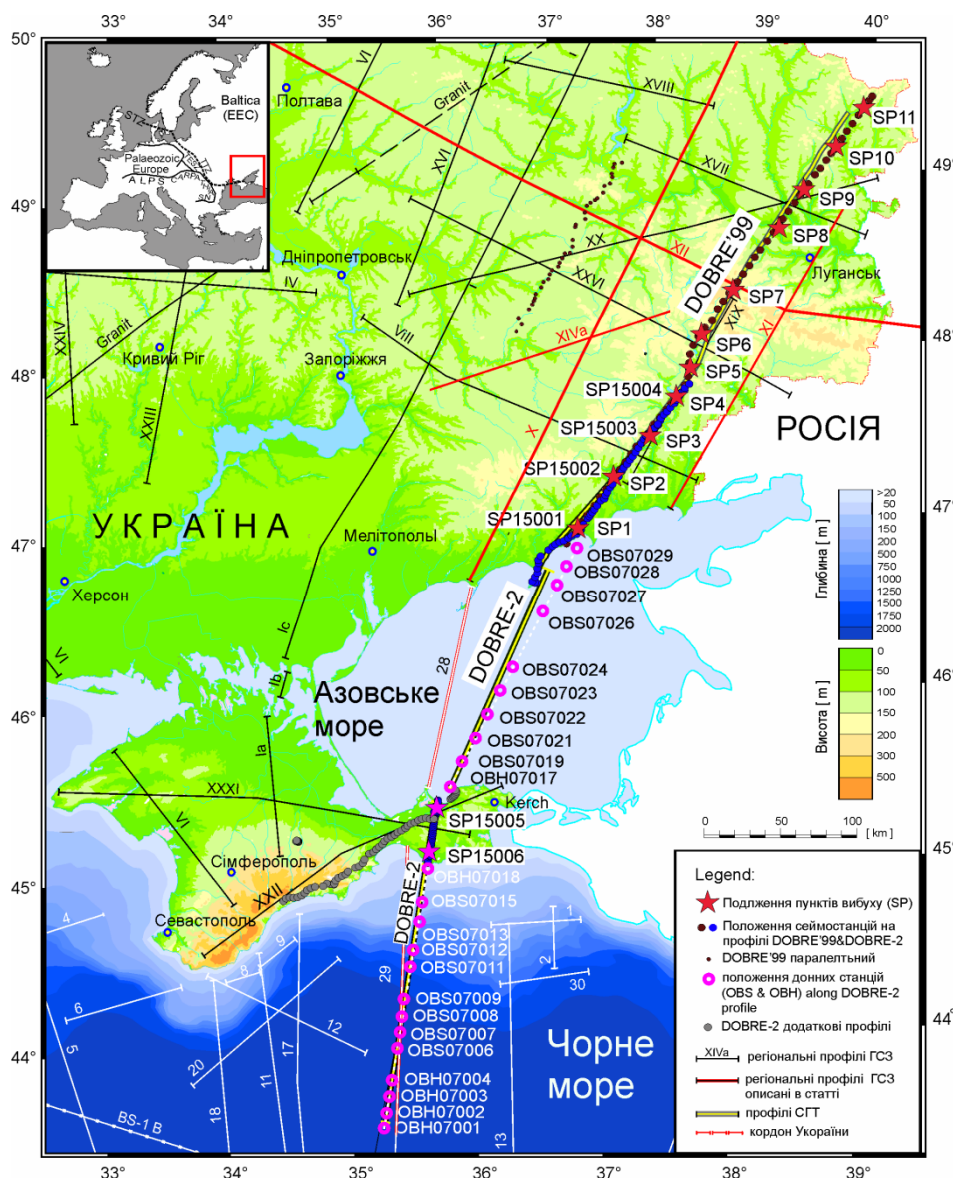


Рис. 7. Карта південно-східної частини України з розташуванням регіональних профілів ГСЗ, які були відпрацьовані до 1980 року (чорні та червоні лінії), червоні лінії – профілі ГСЗ, інформація про геологічну будову яких використовувалась для побудови початкової моделі DOBRE'99 і DOBRE-2.

Профіль DOBRE-2 (Азовське – Керченський п-ів – Чорне море) був прокладений майже по лінії профілів 28 і 29. Особливість глибинної будови Чорного моря уздовж профілю, яка була виявлена за результатами робіт 1970-х років, – відсутність гранітного шару у глибоководній Східночорноморській западині. Границя Конрада,

що характеризує поверхню базальтового шару, знаходиться на глибині 10–12 км. Глибина залягання поверхні гранітного шару ближче до Криму становить ~13 км, а поверхня базальтового шару – 22 км. Поверхня Мохо в центральній частині Чорного моря, згідно з (Москаленко, Маловицкий, 1974) знаходилась на глибині 18–22 км.

В розділі представлені основні ідеї сучасної геодинаміки території дослідження, які описані в ряді робіт. Зокрема, по Азово-Чорноморського регіону (Stovba, Stephenson, 1999; Гожик та ін., 2006; Stovba, Hriachtchevskaiia, 2011; Sydorenko et al., 2017; Starostenko et al., 2017; Nikishin et al., 2017) та Донбасу (Wilson, Lyashkevich; 1996; Kuszniir et al., 1996; Stephenson et al., 2001).

У третьому розділі «Глибинна будова за даними регіональних ширококутних сейсмічних досліджень по профілях DOBRE-99 та DOBRE-2» представлені результати двох польових експериментів, проведених за методом ширококутних досліджень ГСЗ, в яких дисертант приймав безпосередню участь від польових робіт до створення швидкісних моделей, тобто відображення геологічної будови у фізичній величині – швидкості розповсюдження сейсмічних хвиль у просторі.

У результаті проведення польових робіт були отримані сейсмічні записи (секції від кожного пункту вибуху). Профіль DOBRE-99 складається з 11 секцій, які мають редуцію швидкості 8,0 км/с та нормування за амплітудою. На них відмічені основні зафіксовані сейсмічні фази. Щоб виділити записані фази S-хвилі, використовувались секції з часовою шкалою 55 с. S-хвилі приходять пізніше, оскільки мають меншу швидкість. Фази заломлених P- і S-хвиль з горизонтів у осадових породах і корі (P_{sed} , S_{sed} , P_g , S_g) легко ідентифікуються, як і відбиті P_mP -хвилі, (зміщення приблизно 70 км), виділяються також і заломлені (P_n) хвилі від Мохо. На секціях були виділені внутрішньокорові ($P_{HVB}P$) та внутрішньомантіїні (P_{II}) фази хвиль.

Перші вступу сейсмічних хвиль поблизу пунктів вибуху проявляють значну часову мінливість через наявність осадової структури грабена в центральній частині профілю. Для південних та північних точок спостереження першими приходять фази хвиль P_g з позірною швидкістю біля 6,0 км/с. На противагу цьому, перші вступу хвиль P_{sed} у центральній частині профілю, де він перетинає ДСС, показують менші швидкості, що відповідають швидкостям надкорової осадової частини. У більшій частині ДСС швидкість перших вступів знаходиться в межах 4,0–5,8 км/с, що відповідає швидкостям палеозойських осадових відкладів.

Положення фундаменту осадового басейну (верхня частина кристалічної кори) зафіксоване відбиттями у всіх пунктах вибуху в центральній частині профілю. Внутрішньокристалічні відбиття практично не представлені у хвильовому полі.

Відбиття P_mP від границі Мохо присутнє на всіх хвильових полях від хімічних вибухів і має яскраво виражену фазу з високою амплітудою. Відбивна здатність від нижньої кори та навколо границі Мохо є найвираженішою для точок відбиття в центрі профілю. Фаза відбитої хвилі P_n спостерігається на всіх сейсмічних ділянках із видимою швидкістю від 8,0 до 8,3 км/с, але найінтенсивнішою і найпротяжнішою вона є у хвиль, які спостерігаються в північній частині профілю.

Швидкісна модель була побудована здобувачем в Датському університеті (м. Копенгаген, Данія), використовуючи алгоритм трасування та інверсії променів (Zelt, Smith, 1992) (рис. 8).

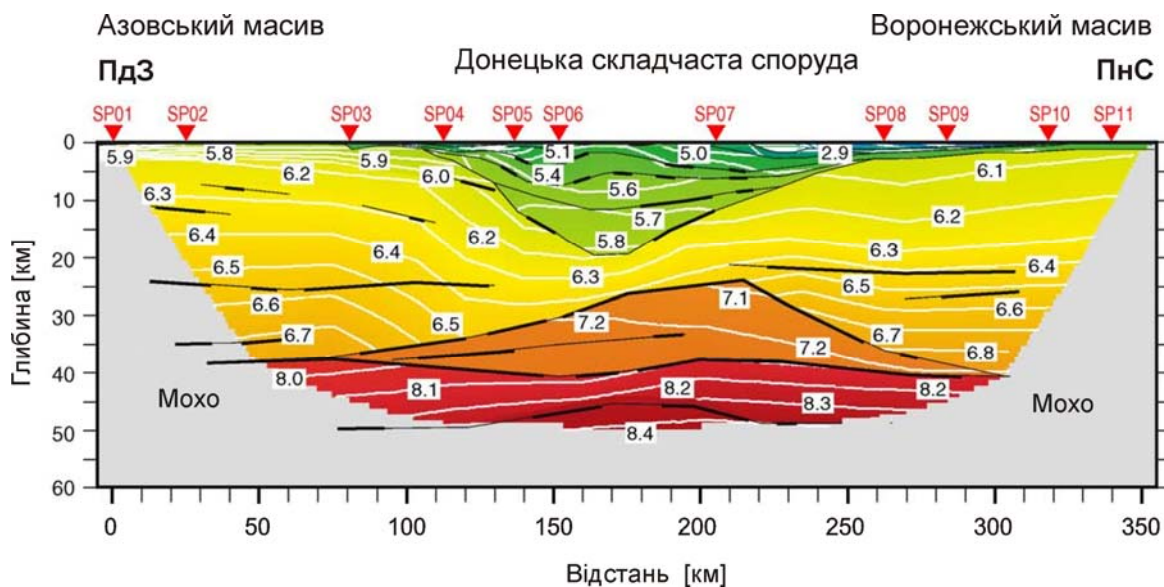


Рис. 8. Двовимірний швидкісний профіль DOBRE'99, побудований з використанням поздовжніх хвиль. Межі горизонтів та «плаваючі» границі позначені лініями. Товсті лінії позначають місця з сильним відбиттям променів.

Побудовано графічне зображення роздільної здатності моделі, яке базується на покритті променями заломлених та відбитих фаз модельного розрізу, і обчислено середньоквадратичну помилку – невідповідність між змодельованим і спостереженим часом проходження сейсмічної хвилі.

Встановлено, що максимальна товщина осадового басейну, згідно з результатами швидкісного ширококутного моделювання, приблизно 20 км, а його форма асиметрична. Найбільший кут нахилу кристалічної поверхні фундаменту знаходиться біля Приазовського масиву. Основний кристалічний шар кори уздовж профілю DOBRE'99 має швидкість 5,8–6,8 км/с. Він значно зтоншується під центральною частиною осадового басейну. В цьому місці високошвидкісне тіло (можливо нижня кора, або суміш кори і мантії), починає потовщуватися. Швидкість високошвидкісного тіла 6,9–7,2 км/с. Воно також має асиметричну форму, але найбільш крутонахилена поверхня знаходиться під північно-східним краєм басейну (біля Воронежського кристалічного масиву). Саме високошвидкісне тіло інтерпретується як зона розриву кори (Ervin, McGinnis, 1975) з високою ймовірністю міжпластового діапїризму. Такі високошвидкісні об'єкти зазвичай зустрічаються в нижній корі під вісю рифту в багатьох великих осадових басейнах. Глибина границі Мохо практично однакова по всьому профілю (40 ± 2 км).

Продовженням профілю DOBRE-99 став профіль DOBRE-2 зі 100-кілометровим перекриттям. Окрім морських і наземних робіт були отримані «перехресні» дані, коли наземні вибухи реєструвались донними станціями, а хвилі згенеровані повітряними гарматами – наземними станціями в прибережній зоні.

Дисертант приймав участь у всіх етапах роботи над профілем DOBRE-2, за його безпосередньої участі були сформовані кінцеві SEG-Y секції та початкові варіанти швидкісних моделей профілю в Центрі дослідження океану (Helmholtz Centre for Ocean Research GEOMAR, Kiel, Germany).

З сейсмічних даних від наземних вибухів були виділені фази Р-хвиль та використані для моделювання. Зокрема, на секціях легко ідентифікувати та виділити сейсмічні фази (включаючи перші вступи), що представляють заломлення від осадових шарів (P_{sed}), верхньої і середньої кристалічної кори (P_g) і заломлену хвилю Мохо від верхньої мантиї (P_n). У більш пізніх відбиттях найсильнішою є фаза, пов'язана з відбиттями від границі Мохо (P_{MP}). Відбиття від вибухів з середньої кори (P_cP) спостерігаються на деяких записах. Секції сейсмічних записів мають значну мінливість хвильового поля, що є наслідком відмінності тектонічної структури по лінії профілю.

Під Чорним морем найглибші заломлені фази спостерігаються від кристалічного фундаменту (P_g).

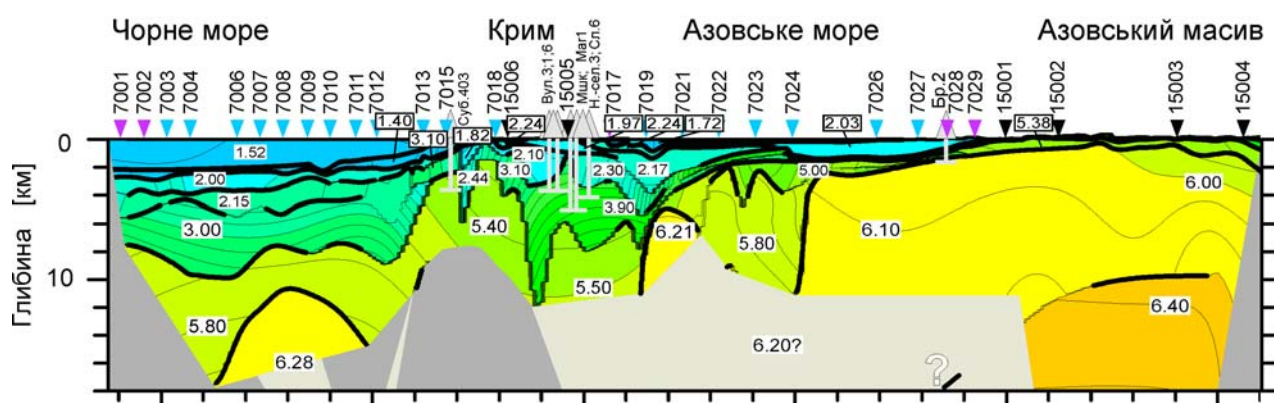


Рис. 9. Двовимірний швидкісний профіль сейсмічних Р-хвиль осадового чохла, кори та верхньої мантиї уздовж профілю DOBRE-2.

Моделювання проводилось методом проб і помилок з використанням трасування променів програмою SEIS83 (Cerveny, Psencik 1984) з використанням графічного інтерфейсу моделі (Komminaho, 1998) і ZPLOT (Zelt, 1994). У початковій швидкісній моделі верхньої кори використовувались дані з 12 свердловин, розташованих на профілі або поблизу, а також попередніх інтерпретацій (Khortov, Neprochnov, 2006; Tsiokha et al., 2008; Стовба и др., 2009; Yegorova, et al., 2010; Гожик и др., 2011; Никишин, Петров 2013). Швидкісна модель більш глибоких шарів розраховувалась інтерактивно: часи приходу хвиль були розраховані для початкової швидкісної моделі і порівнювались з фактично зафіксованим часом приходу хвиль. Потім модель була змінена з метою мінімізації нев'язки. Моделювання також включало розрахунок синтетичних сейсмограм і порівняння амплітуд синтетичних і спостережених даних. Це забезпечило додаткові обмеження для градієнтів швидкості. Ітерація тривала до тих пір, поки не було отримано задовільну якість подібності між фактичними даними і розрахунковими синтетичними сейсмограмами в часах пробігу і амплітудах для основних фаз. Розбіжності в швидкостях і глибинах у моделі трасування променів обумовлені

насамперед неточністю визначення часу приходу хвилі. Там, де якість даних для обох заломлених і відбитих хвиль була хорошою, трасування променів на моделі співпали з фактичними даними з високою точністю.

Швидкісна модель, побудована з використанням Р-хвиль, показана на рис. 9.

Використовуючи побудовану швидкісну модель, проведено інтерпретацію глибинної будови території дослідження, де виділені структури узгоджуються з ранніми публікаціями (Gozhyk et al., 2006; Ulanovskaia et al., 2011; Нікішин та ін., 2011; Керімов, 2004; Паніна, 2009; Gobarenko et al., 2015; Старостенко та ін., 2015a).

На великій відстані від ПВ (400–600 км), де енергія корисних хвиль мінімальна, а вплив хвиль-завад є переважаючим, практично неможливо виділити фази корисних хвиль і використати їх для моделювання. Напрямки зменшення впливу хвиль завад висвітлені в ряді публікацій, зокрема, Дядюра, Соколовський (1984) пропонували методи на основі статистики. Harlan (1984) запропонував спосіб фокусування для збільшення статистичної незалежності між цільовими і випадковими сигналами гаусового та завадами негаусового типу. Hendrick (2006) розробив метод спектрально-матричної фільтрації (SMF), який зменшує вплив приповерхневих високоамплітудних хвиль. Для наземних і морських записів сейсмічних станцій розроблено фільтр розкладання на годографи *P*- і *S*-хвиль (Renterghem et al., 2018), який ґрунтується на пружнодинамічній теоремі (Wapenaar, Heim, 1990; Amundsen et al., 2000). Автрами роботи (Sollberger et al., 2018) запропоновано використовувати не три-, а шестикомпонентну (6-К) модель поляризації.

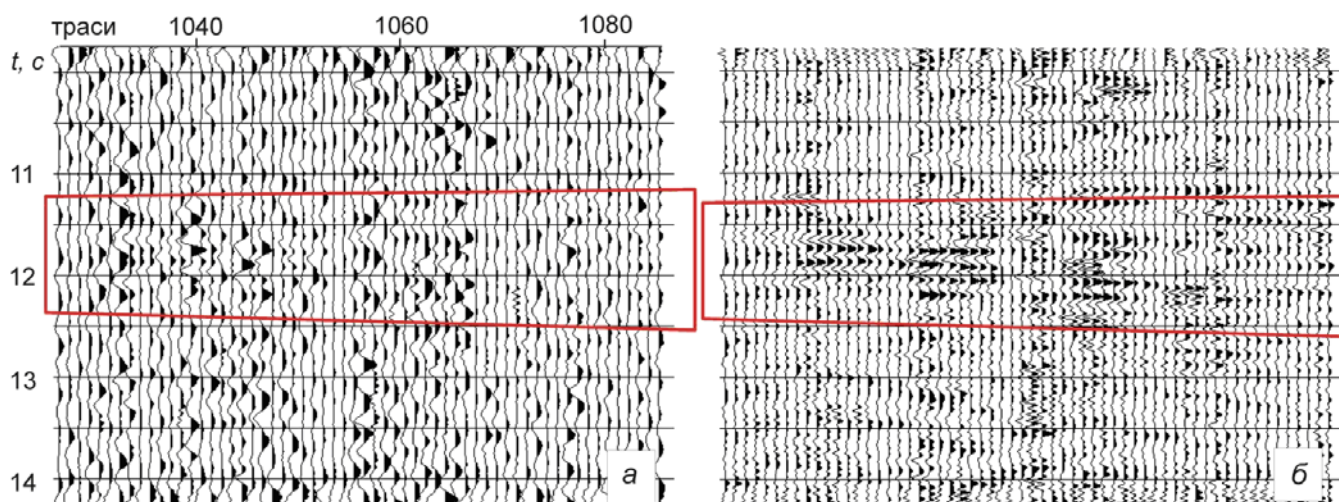


Рис. 10. Частина енергетично слабкої, відбитої від границі Мохо хвилі: а – ускладнена хвилями-завадами; б – очищена від хвиль-завад.

Для визначення ослаблених годографів (або їх частини) дисертантом запропоновано різницевий алгоритм. Він реалізується за визначеним напрямком осі синфазності високоамплітудних коливань реперної відбитої хвилі на профілі, наприклад від фундаменту або границі Мохо. За цією схемою спочатку вилучають або послаблюють спільні елементи годографів відбитих (або інших) хвиль, а потім залишають ті складові, за якими вони різняться у заданому напрямку простору. Різниця між вхідним і залишковим полями є цільовим полем, яке інтерпретують.

Залишковим полем є годографи регулярних і нерегулярних хвиль-завад. Процес виділення цільових хвиль із залишкового поля може бути продовжений за напрямком домінуючих годографів інших типів хвиль або відбитих від глибших горизонтів.

У Чорному морі годографи відбитої від фундаменту цільової хвилі знаходяться на відстані 10—25 км від джерела сейсмічних хвиль. В Азовському морі (Starostenko et al., 2016) зона пошуку відбитих хвиль від границі Мохо знаходиться на відстані 110—130 км (рис. 10) від джерела сейсмічних хвиль. Ці хвилі непомітні на поверхні, їх не використовують у моделюванні.

Використання запропонованого методу пошуку енергетично слабких годографів і їх використання в моделюванні дало змогу збільшити точність та глибинність швидкісної моделі.

Більшість профілів глибинного сейсмічного зондування, які відпрацьовані за останні 20 років, були прокладені через нафтогазоносні регіони України. Поверхневий аналіз свідчить про наявність під ними високошвидкісних тіл на глибинах 20–25 км, сильно стоншеної і розконсолідованої кори, та товстого шару осадових порід, де формуються пастки вуглеводнів. Тому важливим є створення методик, які дозволили виявляти регіональні розломи, які можуть вказувати на шляхи міграції вуглеводню з глибоких надр Землі.

У четвертому розділі «Рішення фундаментальних задач сейсміки за методом визначення розломно-блокової структури середовища» представлено інтерпретація профілю DOBRReflection-2000, виконану з використанням методу визначення розломно-блокової будови середовища. Проведено порівняльний аналіз з швидкісною і кінематичною моделями і пояснено причини відмінності між двома фізичними моделями.

Питання про можливість використання сейсмічних методів для картування глибинних розломів різних реологічних типів і зон розущільнення, пов'язаних з ними, залишається відкритим. Підтвердженням цього є велика кількість сейсмічних глибинних градієнтно-шаруватих швидкісних розрізів без розломів (Grad et al., 2003; Starostenko et al., 2013a,b, 2015), у побудові яких автор брав активну участь. Такі безрозломні, або «формально» розломні, моделі з низькою точністю просторового розміщення розломів надають недостатньо детальну інформацію для геодинамічної та тектонічної інтерпретації. Крім цього, сейсмічні моделі здебільшого є фізичним відображенням геологічної будови середовища, поведінки сейсмічних хвиль в ньому, а не геологічним розрізом, як його розуміють геологи.

У більшості випадків розломна будова земної кори побудована з використанням інформації, отриманої на поверхні Землі – геологічного обстеження надрозломних територій або використанням приповерхневих геофізичних методів спостереження за різними фізичними полями, які використовуються для математичного моделювання їх можливого положення. Тобто побудова розломних зон (структур) відбувається зверху вниз.

Для запису сейсмічних хвиль, породжених розломами, необхідно використовувати методи з просторово-частотною дискретністю, меншою за розміри елементів зони розлому та пов'язаних з ним тріщин сколювання й відриву

внутрішньорозломного заповнювача (цемент з уламками гірської породи, розплавлені інтрузивні магматичні породи), кліважу. Інакше кажучи, чим більше точок спостереження (сейсмостанцій і частота дискретизація сейсмограм), тим менші об'єкти проявлятимуться у хвильовому полі. З огляду на велику глибинну протяжність розломів, для накопичення енергії вторинних відбитих хвиль від елементів розлому необхідно використовувати потужні хімічні вибухи. Вони генерують не тільки високоамплітудні, а й максимально високочастотні сейсмічні хвилі.

Сейсмічні дані по профілю DOBReFlection-2000 відповідають вимогам щодо роздільної здатності, необхідної для методу визначення розломно-блокової структури середовища. Дискретність простору – $17,5 \times 11,5$ м. Методику проведення польових робіт та обробки сейсмічних даних детально описано в публікаціях (Maystrenko et al., 2003; Stovba et al., 2006). Просторовий амплітудно-частотний аналіз хвильового поля за профілю DOBReFrcnion2000 показує однорідність та лінійність спектрального складу, як результат використання автоматичного регулювання рівня запису, якій нівелює динамічні особливості згасання енергії з глибиною. За цими унікальними даними побудовано глибинний сейсмічний профіль СГТ, геологічну інформацію з якого використовували для пояснення геодинамічної будови Східноєвропейської платформи багато авторів з України та інших держав (Carpentier, 2009; Старостенко, 2011; Гончар, 2019).

З метою підвищення об'єктивності результатів інтерпретації поглинальних властивостей геологічного середовища в алгоритмі побудови розломно-блокової структури вводяться елементи статистичного накопичення інформації. Елементи статистики використовуються для підсилення аномалій поглинальних властивостей середовища і зменшення впливу нерегулярних завод та підвищення точності й достовірності у виділенні протяжних розломних структур.

Представимо сейсмічний профіль СГТ DOBReFlection2000 у вигляді просторово-часової прямокутної матриці. Її фізична розмірність – 10470 значень за простором (строчок) і 3500 за часом (стовпці). Сумарно маємо матрицю, яка складається з 36 645 000 значень.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} = (a_{ij})_{M_k \times N},$$

де стовпці і рядки задані множиною дискретних відліків з кожної траси за часом $t = m\Delta t$, $m = 1, 2, \dots, M$ і простором $x = n\Delta x$, Δx — крок між точками спостереження $n = 1, 2, \dots, N$, $N = 10470$.

Створимо підматриці A_k , з частиною часових строк M_k : при $k=1$, $m \in [1 \dots 500]$; при $k=2$, $m \in [250 \dots 750]$; $k=3$, $m \in [500 \dots 1000]$; ... $k=13$, $m \in [3000 \dots 3500]$. Підматриці матимуть нову, однакову розмірність $500 \times n$ значень:

$$A_1 = (a_{ij})_{i=1, j=1}^{500, n}, \quad A_2 = (a_{ij})_{i=250, j=1}^{750, n}, \quad A_3 = (a_{ij})_{i=500, j=1}^{1000, n}, \quad \dots \quad A_{13} = (a_{ij})_{i=3000, j=1}^{3500, n}.$$

Створені матриці A_k використовують для незалежних розрахунків згасання енергії сейсмічних хвиль, зменшуючи таким чином ймовірність накопичення методичних помилок. Завершивши рішення оберненої динамічної задачі, отримуємо 13 частин профілю шириною за часом 2 с, що приблизно відповідає 5,5 км за глибиною, і за простором більше 186 км.

По кожній з матриць A_k проводиться аналіз розломно-блокової будови, який завершується побудовою розломних структур, відбиваючих поверхонь монолітних блоків та виявленням заповнювача – геологічних порід, які не мають сталої форми і приймають її від оточуючих геологічних об'єктів.

Для підсилення не випадкових аномалій була зроблена сума 13 матриць A_k з часовим зсувом 1 с, тобто 250 дискрет за часом. Сумарна матриця B згасаючих властивостей середовища вважається кінцевим результатом

$$B = \sum_{k=1}^{13} A_k .$$

Для прикладу можливостей виявлення розломних структур у гранітах були використані сейсмічні дані СГТ DOBREFraction2000, де знаходиться найбільший на Донбасі Ялинський насув, вертикальне зміщення якого майже 2 км.

Перед рішенням оберненої динамічної задачі були видалені різні за походженням хвилі-завади різницею методом: залишки поверхневих хвиль, артефакти, створені міграцією, що виникли через відсутність точних швидкостей розповсюдження сейсмічної хвилі в середовищі, залишки дифракційних хвиль.

Розломи верхньої частини фундаменту, невидимі для кінематики, проявляються у вигляді протяжних, майже вертикальних, тонких лінійних структур, які особливо помітні на контакті двох геологічних пластів з діаметрально протилежними фізичними властивостями (рис. 11). В розломних зонах осадових порід зазвичай знаходиться заповнювач з високим поглинанням (флюїдонасичені розконсолідовані породи), тому вони чіткіше проявляються на часових розрізах.

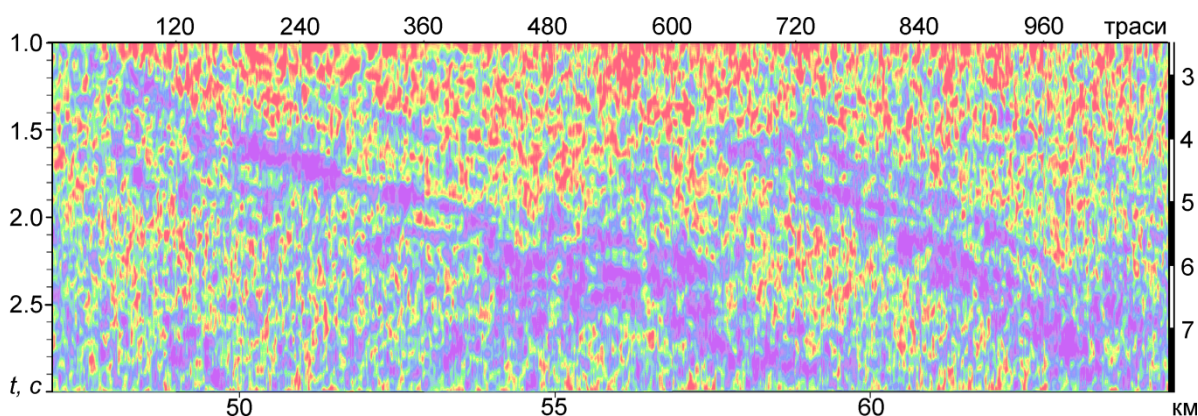


Рис. 11. Часові розрізи згасання енергії сейсмічних хвиль у місці переходу від осадового чохла до фундаменту (південно-західна частина ДДС).

За результатами рішення оберненої динамічної задачі під Ялинським насувом був виявлений мантийний прорив на глибині 36 км з можливою інтрузією розплавленої магми. На рис. 12 зображено геологічний об'єкт, який залягає із змінним нахилом, занурюючись під кристалічну кору Приазовського масиву. Загальна довжина

виявленої структури 12,6 км. Починаючи з 5 км нахил кривлі структури змінює кут, її структура перестає бути монолітною, з'являються різні за розміром блоки. Перепад за висотою між найнижчою і найвищою точкою більше 3 км. На 720 трасі (на 12,6 км) змінюється характер згасання енергії сейсмічних хвиль, з'являються заокруглені форми обтікання, притаманні розплавленим породам.

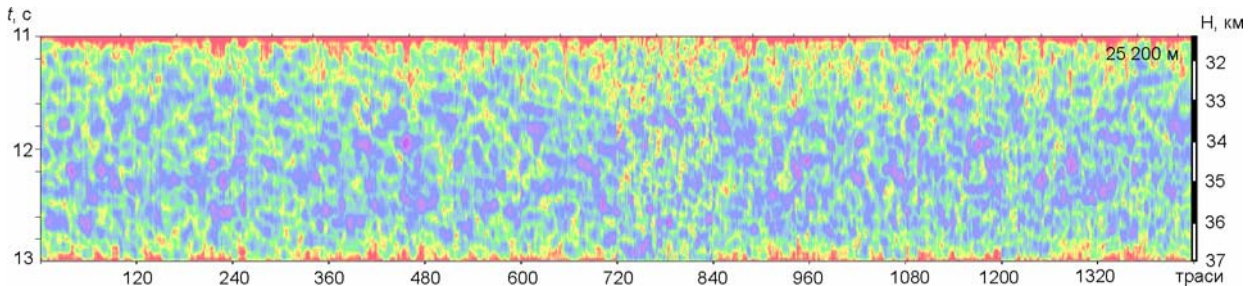


Рис. 12. Місце розуцільнення границі Мохо і проникнення мантийних порід у нижню кору.

Найглибша ділянка, на якій виділяються чіткі структурні закономірності, на площі більше 80 км² знаходиться під Воронежським кристалічним масивом на глибині 34,5–40 км (рис. 13). Вона є частиною “високошвидкісного тіла”, виявленого на швидкісній моделі DOBRE-99. На цій ділянці бачимо різнонаправлені протяжні відбиваючі границі, найдовша з яких майже 9 км. Одне з можливих пояснень такого явища – наявність крихких розломів або тріщин, в яких міжрозломний простір заповнений низькопоглинаючим заповнювачем. Аналогічне місце, але з меншою кількістю прямолінійних границь, можна побачити біля місця розуцільнення границі Мохо під Азовським масивом.

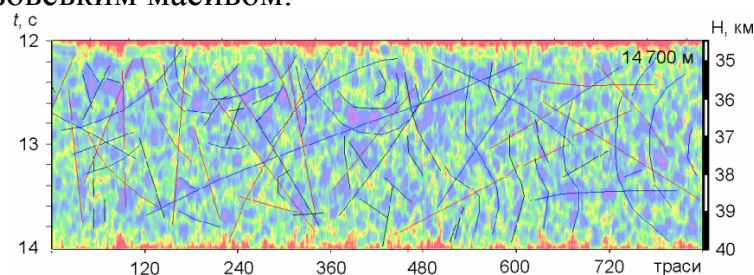


Рис. 13. Лінійні структури високошвидкісного тіла, виявлені на глибині 35–40 км, під Воронежським кристалічним масивом.

Аналізуючи результати об'єктно-орієнтованої моделі (рис. 14) геологічного розрізу за профілем DOBREfraction2000 можна виділити наступні структурні елементи:

- зона розриву твердих мантийних порід (які можливо належать Воронежському кристалічному масиву) знаходиться на глибині 40 км і має довжину 32 км;
- у зоні розриву коромантийної суміші проявляється мантийний діапїризм (Соллогуб и др., 1977; Чекунов, 1997);
- коромантийна суміш має різну будову і структуру на різних ділянках;
- у коромантийній суміші, яка залягає під Воронежським кристалічним масивом, присутнє високошвидкісне тіло, можливо міжпластовий діапїр.

- середня і нижня кора під ДСС складається з монолітних блоків, перемішених під час тектонічного стискання;
- між 65 і 75 км профілю спостерігається зона вертикального видавлювання через тектонічне стиснення;
- унаслідок вертикального видавлювання порід виникли чотири насуви – Старобешівський, Ялинський, Мушкетівський та Повздовжній;
- у південно-західній частині ДСС геотектонічні процеси складкоутворення відбувались активніше, ніж у північно-східній, умовною межею поділу є Головна антиклиналь.

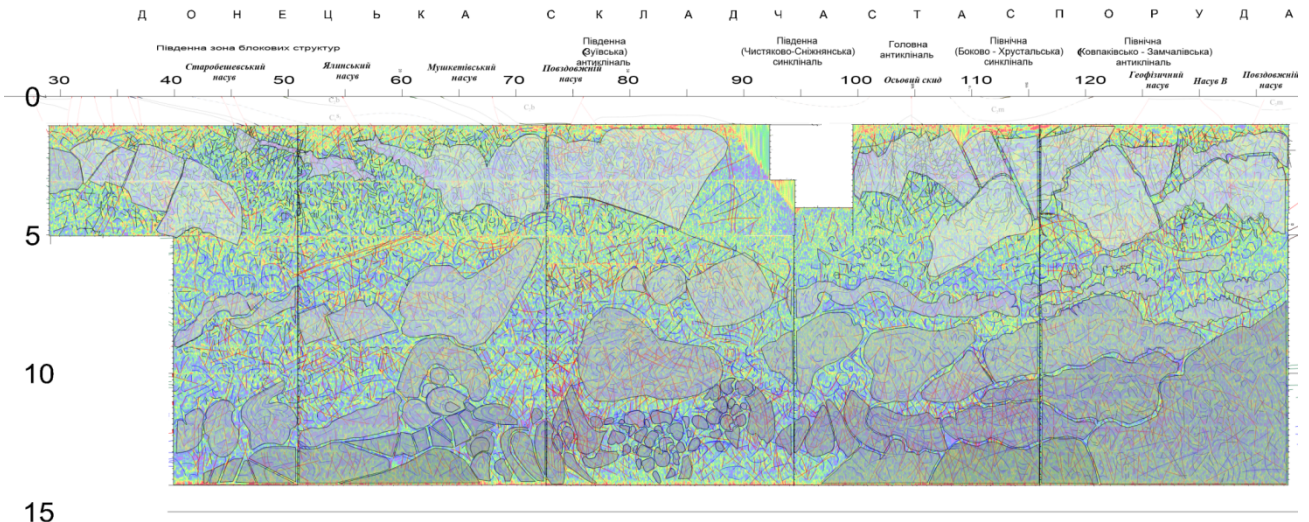


Рис. 14. Розломно-блокова геологічна модель середовища по профілю DOBREfraction2000.

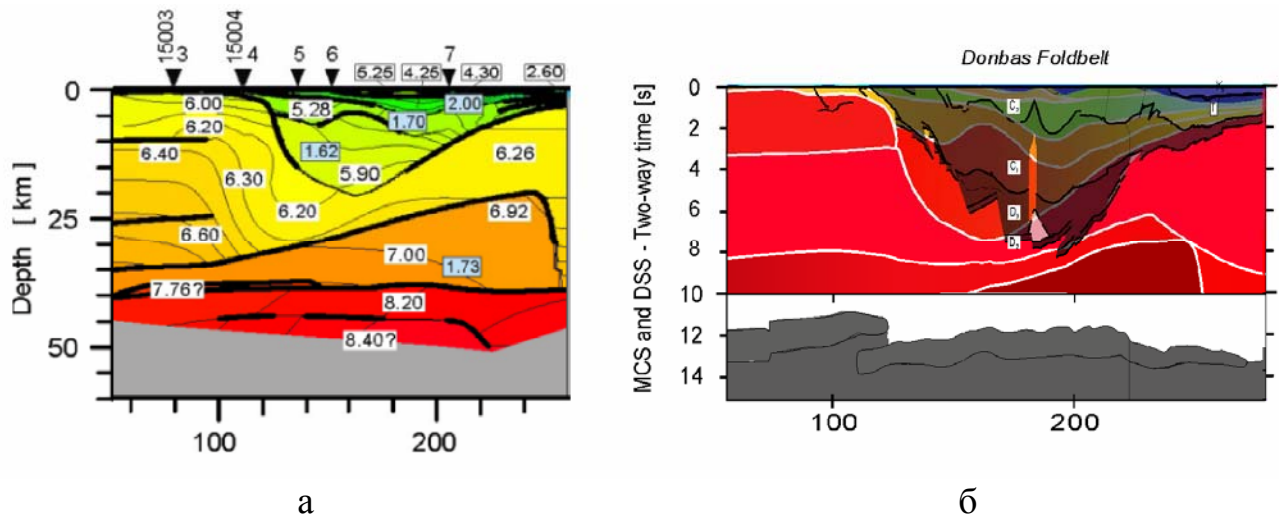


Рис. 15. Порівняння двох фізичних моделей – DOBRE-2 і DOBRE-99: а – швидкісна модель, порахована за профілем DOBRE-2 (глибина виражена у кілометрах), б – накладені два профілі: профіль DOBRE-2 і профіль DOBREfraction2000 (глибина перерахована у час).

Швидкісна модель DOBRE-99, яка по вертикальній осі виражена у кілометрах, була перерахована у часову область. Тепер стало можливим порівнювати кінематичну модель DOBREfraction2000 і швидкісну DOBRE-99. На частині

швидкісної моделі (рис. 15, а) профілю DOBRE-2 виділяється швидкісна аномалія, за якою на глибині 30 км присутні швидкості 6,2–6,4 км/с. Горизонтальні розміри аномалії – 180 км. Такі самі швидкості на відстані 20 км (80-й кілометр профілю) спостерігаються на глибині 10 км.

Тобто очевидним є факт наявності геологічного об'єкта, який причетний до формування крупної швидкісної аномалії. Однак на часовому розрізі СГТ будь-які тіла, які б могли пояснити аномалію, відсутні. Крім цього, на швидкісній моделі відсутні будь-які прояви контрастної границі, яку виділяє метод СГТ, на схилі Воронезького кристалічного масиву (рис. 15, б). Отже, бачимо неузгодженість у фізичних моделях, які потребують додаткового пояснення, без якого неможливе істинне відтворення геодинамічної історії регіону.

Для порівняння розломно-блокової моделі (будова представлена у вигляді геологічних об'єктів) і моделі, побудованої за даними СГТ (геологічний розріз представлений відбиваючими границями або їх кореляцією на великі відстані), накладемо їх одна на одну в однаковому масштабі (рис. 16). Легко помітити велику спорідненість у більшості елементів геологічної будови, визначених за різними методами. Нахили об'єктів, які породжують групи відбиттів, співпадають з нахилом контрастних відбиваючих границь. Наприклад, короткі синфазні відбиття (сині лінії), отримані від границі Мохо, майже ідеально повторюють форму і структуру коромантійної суміші, відтвореної у вигляді різних за генезисом об'єктів. Зокрема, це видно в центральній частині – області мантийного діпіризму, або високошвидкісного тіла (правий кут, зелені лінії). Висока ступінь співпадіння спостерігається і в будові фундаменту ДСС, де повторюється положення розломів, окремих монолітних блоків та їхній нахил. Співпадає структура верхньої частини розрізу, зокрема будова насувів, положення синкліналей ДСС і гранітного Азовського блока.

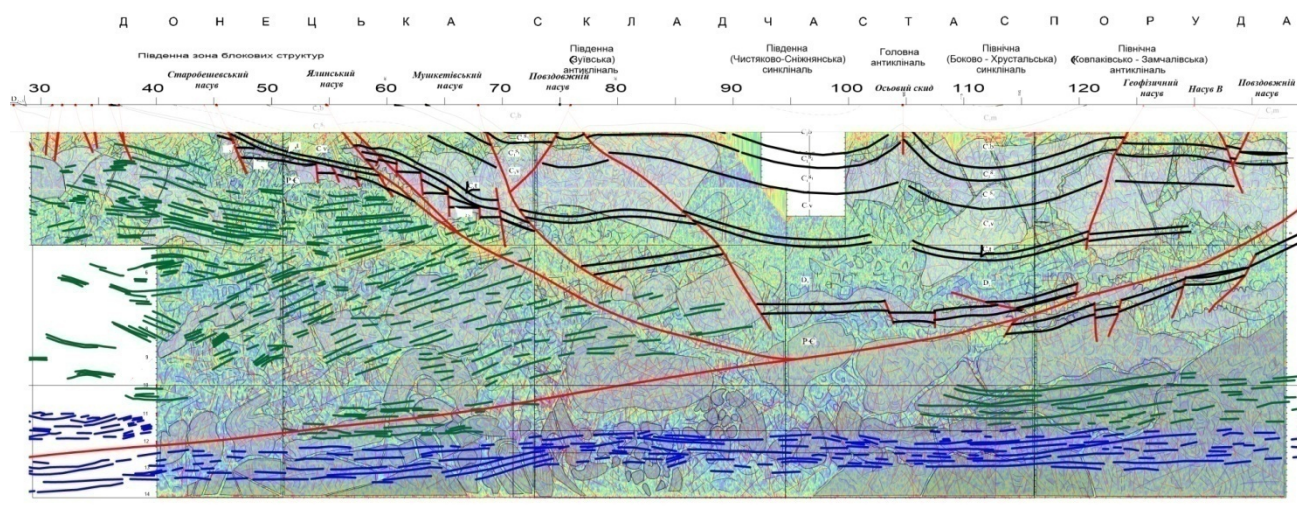


Рис. 16. Порівняння розломно-блокової і кінематичної моделі середовища, отриманих за даними СГТ.

Додамо до двох вищеописаних моделей ізолінії третьої – швидкісної моделі (рис. 17). У такий спосіб отримуємо інформацію про один геологічний глибинний розріз трьома різними моделями, які в своїй основі мають різні фізичні властивості і

доповнюють уявлення про детальну будову геологічно складного регіону України. Всі моделі представлені у часі, тому співрозмірні.

На глибині 45 км присутній відбиваючий горизонт, який співпадає з одним з трьох температурних максимумів (Пашкевич та ін., 2018), що свідчить про наявність мантийних високотемпературних порід. Положення відбиваючого горизонту співпадає з положенням місця з мантийним діапїризмом.

Високошвидкісна зона (рис. 15, а) з швидкостями $\sim 7,0$ км/с проходить практично по границі Мохо, охоплюючи високошвидкісне тіло, яке лежить на Воронезькому кристалічному масиві (глибина 29–33 км).

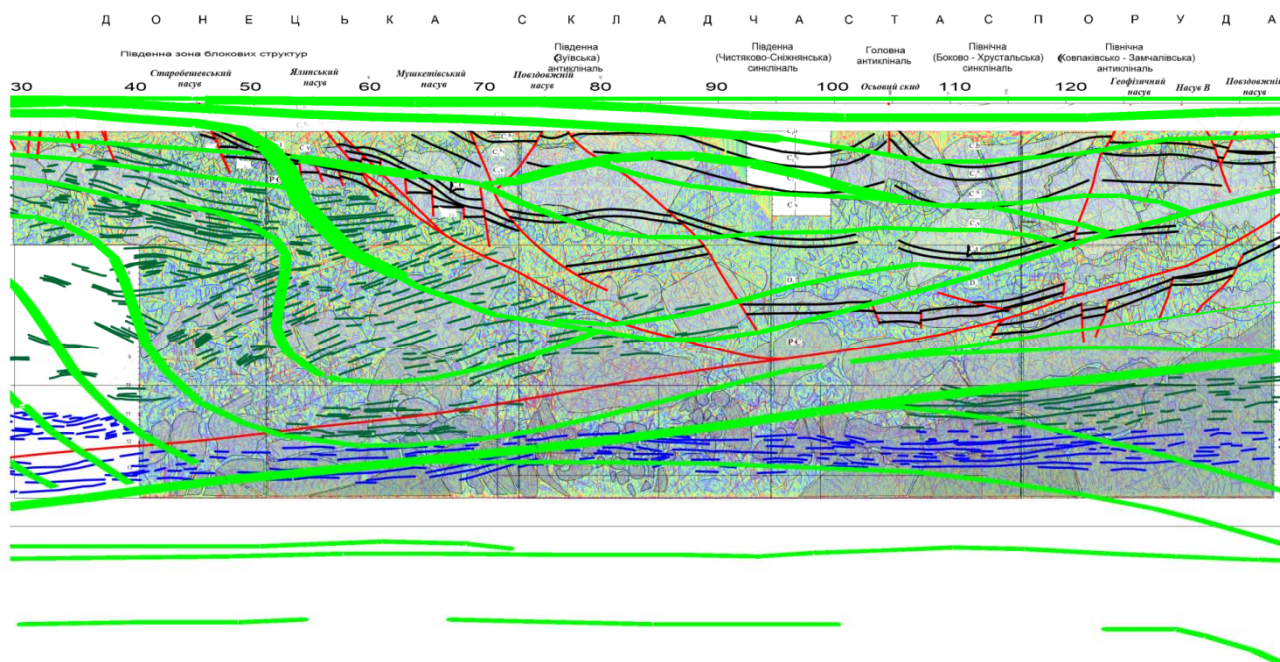


Рис. 17. Накладені три моделі з різними фізичними властивостями. Салатові лінії – ізолінії швидкостей швидкісної моделі за даними профілю ГСЗ DOBRE-99.

Горизонтальний градієнт зміни швидкості низькошвидкісної зони під Старобешівським, Ялинським, Мушкетівським і Повздовжнім насувами пояснюється складчастою зоною з наявним видавлюванням розуцільнених мас у верхні шари кори та, ймовірно, присутністю гранітів верхньої кори Азовського масиву, зтягнутих під Український щит.

У п'ятому розділі «Рішення прикладних задач сейсміки з використанням методу визначення розломно-блокової структури» метод визначення розломно-блокової структури середовища використано для рішення прикладних задач – визначення просторового поширення глибинних й приповерхневих розломів, насувів, локальних тріщинуватих зон, розуцільнень, в яких може накопичуватись метан. Виявлення положення та прив'язка у тривимірному просторі рукотворних і небезпечних геологічних об'єктів відбуваються автоматично під час розрахунку поглинальних властивостей середовища. Використання методу дає змогу простежувати локальну зміну поглинальних властивостей середовища, пов'язаних з малоамплітудними розломами і міжблоковими зсувами.

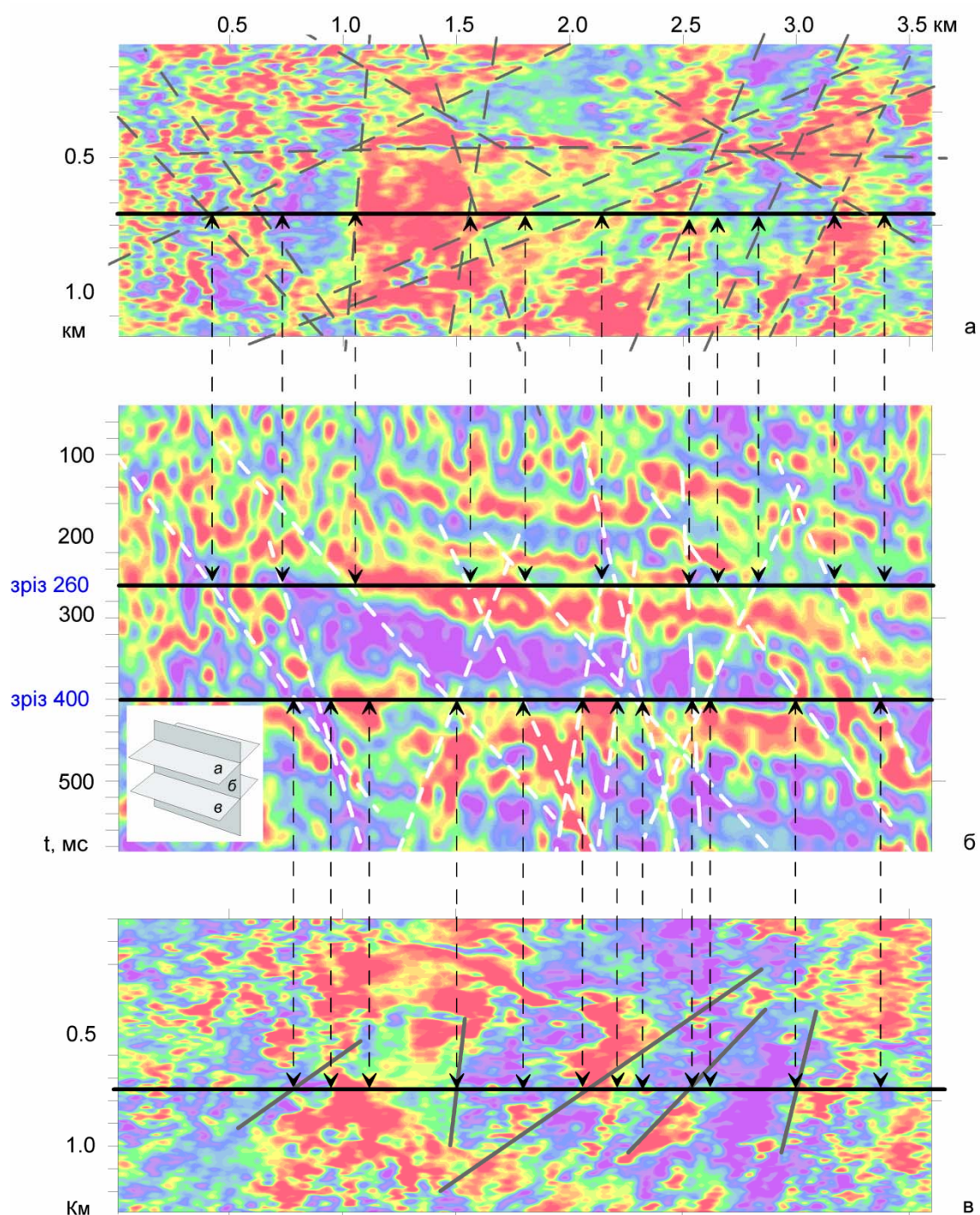


Рис. 18. Поєднання горизонтальних і вертикальних зрізів поглинальних властивостей середовища, визначених за сейсмічними даними куба СГТ 3D з поміченими точками розломів на верхній і нижній площинах.

Для розв'язання оберненої задачі в якості початкових використовувались сейсмічні дані МСГТ 3D, які отримані ДГП «Укргеофізика» на шахтному полі шахти «Краснолиманська». Шахта «Краснолиманська» розташована у висячому крилі Центрального насуву з амплітудою до 310 м, який є північно-західною межею шахтного поля. Моноклінальне залягання порід ускладнене диз'юнктивними порушеннями типу скидів з амплітудами до 95 м (Вергельська, 2012; Король,

Скобенко, 2013; Волкова, Шарина, 2016, Гринь, 2019). Шахтне поле перетинають великі скиди — Глибокоярський, Федорівський, Грачевський, Грушевський, а також менші за амплітудами скиди № 1, 5, 6, 12, 15, 19.

Детально описано критерії виділення зони розривних порушень з використанням кінематичних особливостей поведінки хвильового поля (Пузырев и др., 1985; Оболенцева, Клем-Мусатова, 1986), поєднання кінематичного і динамічного аналізів (Мушин и др., 2001; Довбнич, 2012; Мендрий, Тяпкин, 2012; Тяпкин и др., 2018). Інколи проявляються годографи дифракційних хвиль із слабкою енергетикою і початком у місці розриву відбивного горизонту (Шерифф, Гелдарт, 1987; Zhou, Natherly, 2012). Багато сучасних програмних комплексів з інтерпретації сейсмічних даних використовують для пошуку розломів набір так званих атрибутів — певних закономірностей, що з'являються (за відсутності артефактів і шумів різної природи) у хвильових полях тільки за наявності тріщинуватих зон (Chopra, Marfurt, 2007; Мендрий, 2013; Qi et al., 2019). На геологічно нескладних ділянках можливе використання методу конволюційної нейронної мережі (Wu et al., 2018).

Сейсмічні данні 3D СГТ відрізняються від даних глибинного профілю СГТ DOBReFlection-2000 значно більшою енергією корисних хвиль і практично відсутнім “білим” шумом. Тому контрастність поглинальних властивостей є також на порядок вищою, що суттєво підвищує детальність виявлених об'єктів.

На рис. 18 показано результат використання методу визначення розломно-блокової структури середовища на двох горизонтальних зрізах куба 3D (на часі 260 і 400 мс) і поєданого з вертикальним зрізом 55-го ін-лайн профілю. На вертикальному профілі білою лінією показано можливі розломні зони. Місця перетину горизонтальних і вертикального зрізів куба відповідають чорній лінії на кожному профілі. Одночасний аналіз інформації про одну й ту саму точку, що відображена на двох площинах, доповнює і конкретизує отриману інформацію.

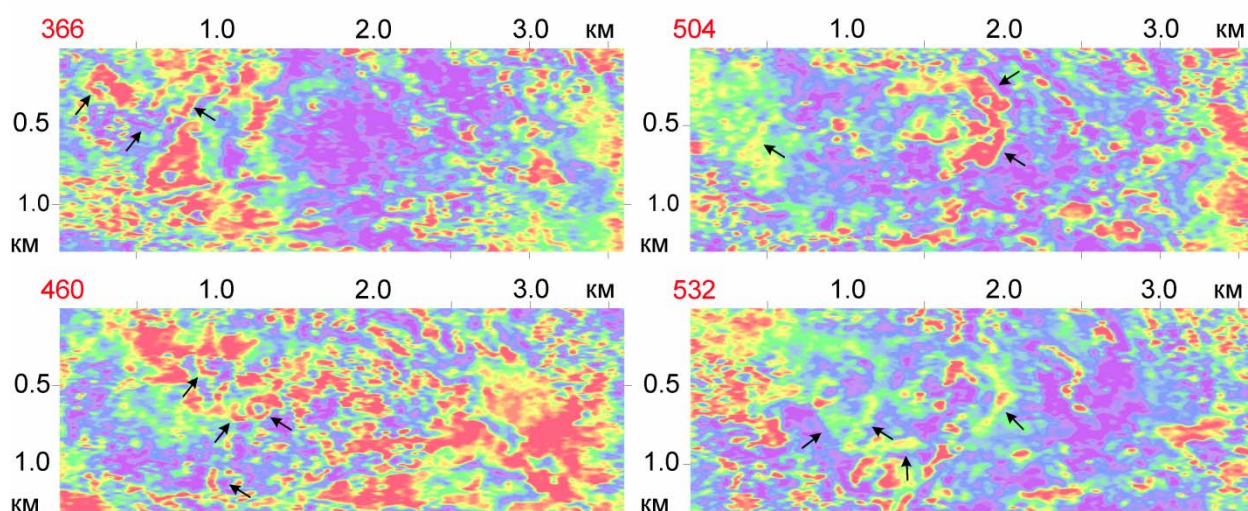


Рис. 19. Аномалії поглинання хвильового поля від можливих підземних об'єктів шахти «Краснолиманська», які позначено стрілками. Горизонтальні часові зрізи на 366, 460, 504, 532 мс відповідно.

Основною ознакою підземних об'єктів, які можна вважати рукотворними, є правильні геометричні форми з гострими кутами, велика просторова видовженість і певна закономірність у їх розташуванні та розгалуженості. Такі закономірності одночасно прослідковуються на 10–12 часових зрізах, що свідчить про їхні розміри у глибину. На рис. 19 показано приклади, на яких присутні аномалії хвильового поля, що утворилися, ймовірно, від підземних конструкції та елементів шахт. На часовому зрізі 366 мс в інтервалі 0–1,0 км по горизонталі і 0–0,5 км по вертикалі розташовані шахтні споруди прямокутної форми. На часовому зрізі 460 мс виділяються колоподібні об'єкти, характерні для вертикального стовбура шахти. Він чітко фіксується на зрізі 452 мс. Встановлення просторового розташування підземних об'єктів у хвильовому полі, де були виділені розломи та тріщинуваті зони, суттєво спрощує їх спільну ув'язку і робить безпомилковим встановлення точного місця перетину розломом шахтної споруди та можливого місця викиду метану.

З урахуванням необхідності встановлення тривимірного розповсюдження тектонічних порушень постає питання щодо створення методики для автоматизованої кореляції порушень у просторі. У числовому зображенні куб СГТ 3D шахтного поля «Краснолиманська» — це тривимірна матриця, яка складається з 27 436 000 чисел, які відображають фізичні властивості середовища. Розмір біну — 10×10 м. Куб 3D містить 152 траси за шириною та 361 трасу за довжиною, тобто спостереженнями покрито площу розміром 1,52×3,61 км, час запису — 1 с, дискретність за часом — 0,002 с. Такий обсяг інформації якісно можна обробити, застосувавши тільки автоматизований режим пошуку та просторової локалізації розломних зон, тобто метод, який би підкреслив локальні особливості нестационарних процесів, а саме різку появу високочастотної компоненти у функції поглинання на дуже малому інтервалі простору.

Нестационарний процес виникає через різку зміну поглинальних властивостей середовища на малій відстані. Така особливість поведінки поглинання виникає внаслідок контакту двох блоків, діаметрально протилежних за фізичними властивостями. Чим більша різниця в поглинанні, тим значніша амплітуда коливання в поглинальних властивостях проявляється в часовому полі згасальних властивостей хвильового поля практично по всьому периметру існування Глибокоярського і Федорівського скидів (рис. 20).

Для виявлення в автоматичному режимі непомітних нестационарних явищ найкраще підходить вейвлет-аналіз. Вейвлети здатні точно визначати локальні особливості сигналів, навіть розривів 1-го роду (стрибка) (Левкович-Маслюк, 1999; Новиков, 1999). Про вейвлети вперше згадується в журналі «Geophysics» у 1982 (Morlet et al., 1982)

Базисні функції, які називають вейвлетами, дають змогу зосередити увагу на локальних особливостях функції поглинання, що не можуть бути виявлені традиційними перетвореннями Фур'є і Лапласа [Астаф'єва, 1996]:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right).$$

Змінна b відповідає за зміщення вейвлету за часом, змінна a — за вибір значення частоти (масштабу). Малі значення a відповідають високим частотам, великі —

низьким. Множник $1/\sqrt{a}$ забезпечує незалежність норми цих функцій від масштабувального числа a (Приоров, 2011).

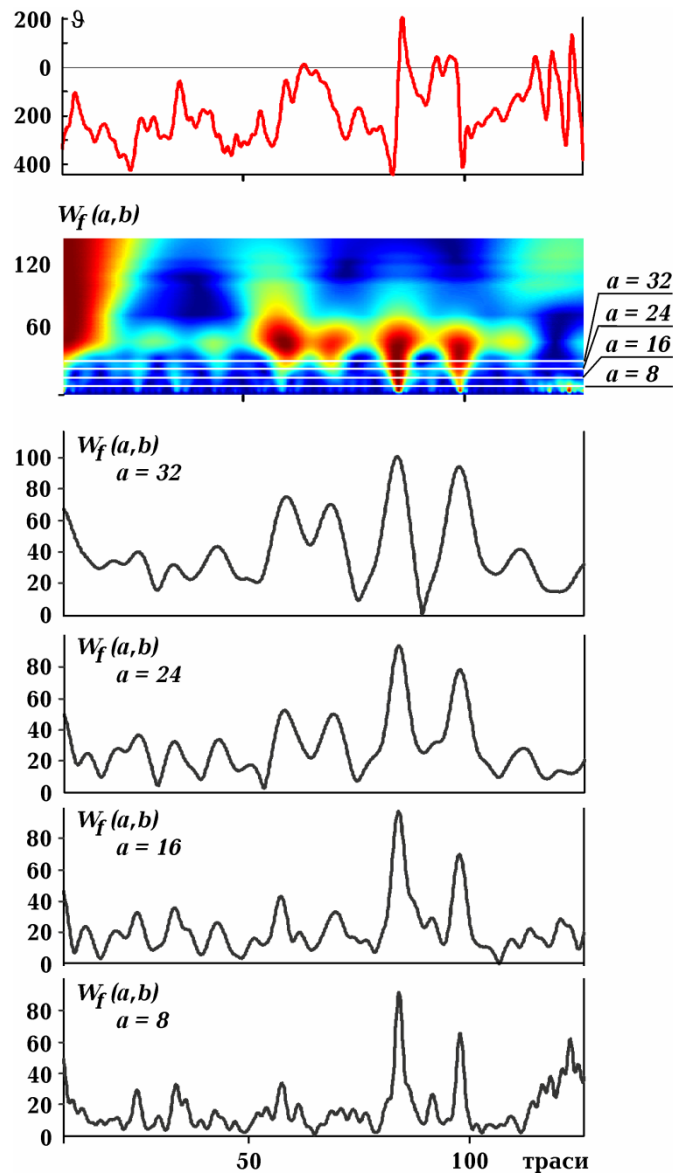


Рис. 20. Приклад розкладання на вейвлет-складові фактичної кривої поглинальних властивостей середовища, отриманої з 150 cross-line перехресних ліній за даними СГТ 3D.

Пряме вейвлет-перетворення має вигляд скалярного добутку часової функції і базисних функцій:

$$W_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt.$$

На відміну від перетворення Фур'є вейвлет-перетворення одновимірних сигналів забезпечує двовимірну розгортку, в якій частоту і координату розглядають як незалежні змінні, що дає змогу аналізувати часові функції відразу в двох просторах.

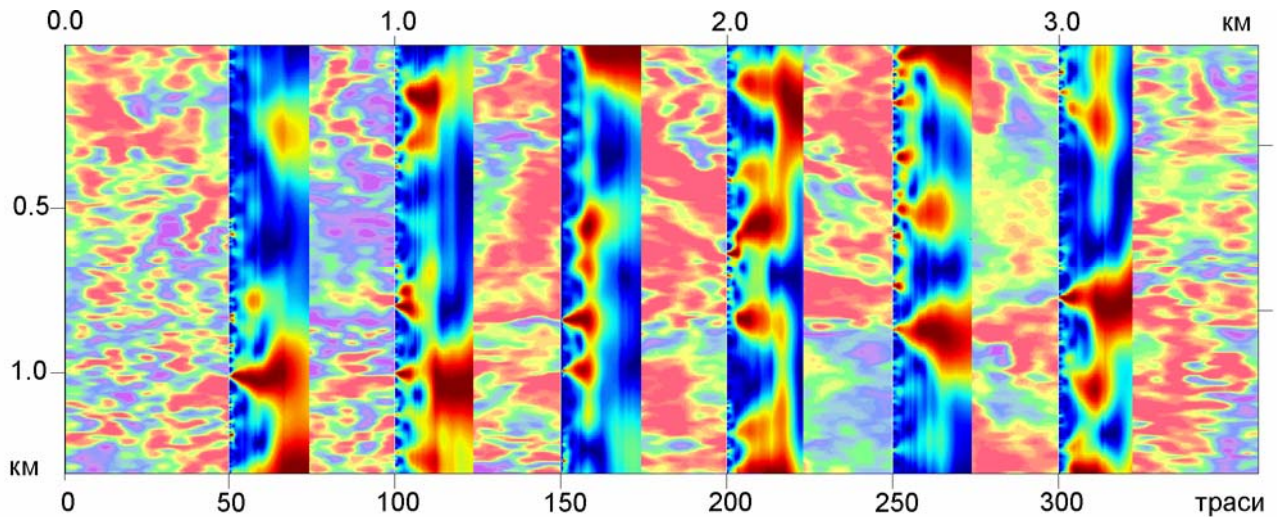


Рис. 21. Приклад пошуку розломних зон за допомогою вейвлет-аналізу. Показано частотно-часові вейвлет-спектри від крос-ланів: 50, 100, 150, 200, 250, 300 трас, які накладено на горизонтальний зріз куба 3D.

Для моделювання було використано криві з різним градієнтом приросту поглинання і з поглинанням, яке стрибкоподібно змінюється з глибиною (рис. 21). Встановлено, що в околі стрибка функції на вейвлет-спектрі наявні високочастотні складові, що відповідають малим значенням $(a_n)_{n=0}^{10}$. Таким чином, наявність нестационарного процесу відображається червоно-жовтими кольорами частотно-часового спектра в області малих значень a . За малих градієнтів зміни поглинальних властивостей середовища високочастотна складова повністю відсутня (синьо-блакитні кольори) і фіксується лише низькочастотна складова функції поглинання, починаючи з $(a_n)_{n=10}^{50}$.

У шостому розділі «Поєднання результатів прикладних і фундаментальних задач для вивчення будови Землі, на прикладі Головного Азовського розлому» представлено один з вагомих результатів, отриманих в дисертаційній роботі при інтерпретації швидкісної моделі по профілю DOBRE-2 – встановлення істинного положення та природи границі між старішою Східноєвропейською плитою, представленою Азовським масивом, і молодшою Скіфською плитою. Наукова дискусія про це питання має довгу історію (Соллогуб, 1986; Юдин, 2001; Гожик та ін., 2006; Khriachlchevskaia et al., 2010; Starostenko et al., 2017; Gobarenko et al., 2017). До проведення сучасних цифрових сейсмічних морських робіт DOBRE-2 була відсутня достовірна інформація про глибинну будову Азовського моря та прилеглих до нього районів. Після побудови швидкісної моделі виявилось, що перехід від Скіфської плити до Східноєвропейської платформи відображається горизонтальним стрибком швидкості по всій видимій глибині (в швидкісній моделі). Цей перехід співпадає з положенням Головного Азовського розлому, який занурюється на південь під кутом 40° щонайменше на глибину 12 км (Starostenko et al., 2017). При комплексному аналізі сейсмічних даних, аномального, магнітного і гравітаційного

поля було обґрунтовано положення та будова границі Східноєвропейської платформи (Пашкевич та ін., 2018).

За даними робіт (Фарфуляк, 2015, Starostenko, 2015) Головний Азовський розлом, будучи південною границею Східноєвропейської платформи, переходить з Кримсько-Азовського сегмента Скіфської плити, розташованого в Азовському морі, в Західночорноморський сегмент (Чорне море), де азимутально (за напрямком) співпадає з Голіцинським розломом, який, ймовірно, пролягає до острова Зміїний (Фарфуляк, 2015) і має довжину в українській частині біля 600 км.

Для вивчення тектоніки плит, положення регіональних розломів, континентальних геодинамічних явищ острів Зміїний, як невеликий клаптик землі посеред моря, є малопомітним, але надзвичайно цінним поєднуючим елементом для формування завершеної концепції створення Азово-Чорноморського регіону. Він знаходиться під впливом сил, які сформували Голіцинський, Істрійський та Тротус розломи. Сьогодні розломно-блокова будова острова фактично не досліджена, оскільки це потребує його детального обстеження з застосуванням сучасного сейсмічного обладнання і методики проведення польових робіт.

Виконуючи інженерно-геофізичні вишукування під будівництво, дисертант проводив сейсмічні роботи згідно з Державними будівельними нормами. У результаті цих робіт були виявлені невідомі розломи та встановлені напрямки їх розповсюдження (азимуту). Азимуту цих розломів співпадають з азимутами найближчих регіональних розломів, які закартовані в акваторії Чорного моря – Голіцинським (яких за напрямком співпадає з Головними Азовським розломом) та Істрійським (рис. 22).

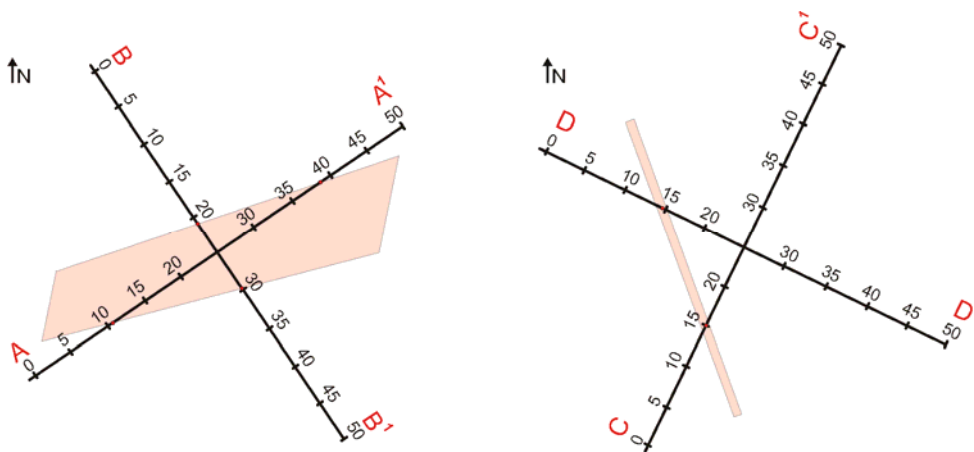


Рис. 22. Ортогональна система профілів з нанесеною розломною зоною від двох ортогональних груп.

Використавши методику визначення розломно-блокової структури, приповерхневе сейсмічне хвильове поле було перераховане у поглинальні властивості середовища. На рис. 23, а проявляються вертикальні тонкі (лінійні) неоднорідності, які можна ідентифікувати як розломи. Деякі з них мають протяжність у часі до 0,250 с. Круто нахилені розломні структури відмічено на рис 23, б червоними лініями, довжина деяких з них більше 40 м. Як було зазначено в попередніх розділах, вони легко виділяються по різкій, неузгодженій, зміні

поглинальних властивостей на великій просторово-часовій ділянці. Такий напрямок занурення розущільнених зон, пов'язаних з розломними структурами, повністю співпадає з топографією поверхні острова на досліджуваній території.

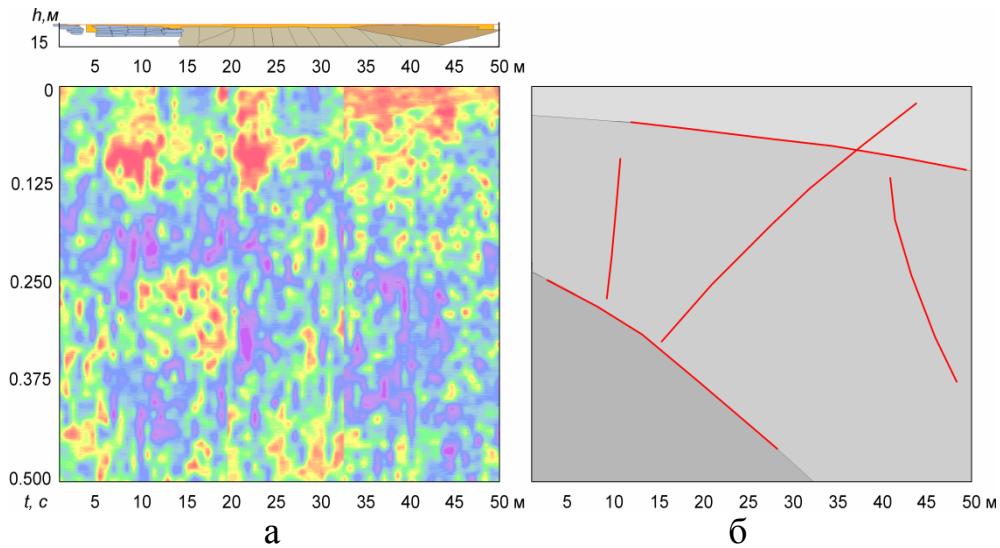


Рис. 23. Просторово-часові поглинальні властивості геологічного середовища по лінії профілю СС¹ (а). Червоно-жовтий колір – велике поглинання, фіолетово-синій – мале; червоні лінії – крихкі розломи з великими азимутами нахилу (б). Вертикальні та слабо нахилені наявні розломи на рисунку не відмічено.

Таким чином, виконуючи геофізичні вишукування, було вивчено фізичні властивості порід, ступінь їх розконсолідованості та наявність внутрішньоблокових розломів. Азимути виявлених на поверхні розломів співпадають з азимутами регіональних у морській частині, що підтверджує гіпотезу (Фарфуляк, 2015) про закінчення Головного Азовського розлому на о. Зміїний.

ВИСНОВКИ

1. Створено об'єктно-орієнтований метод побудови розломно-блокової структури середовища, який дає змогу представити геологічний розріз у вигляді розломних структур відносно монолітних блоків і неструктурованого міжблокового заповнювача. Частотно-залежне згасання енергії сейсмічних хвиль (ефективне поглинання) надає якісну оцінку геологічної будови, представлену в зміні фізичних властивостей геологічних об'єктів. При достатній контрастності (аномальності) поглинаючих властивостей геологічних тіл відбувається їх просторове оконтурення, що допомагає встановити форму об'єкта, не аналізуючи його фізичні властивості, відтворювати його у найбільш зрозумілому вигляді – структурних одиницях: протяжних об'єктах розломного типу, монолітних блоках, складках, насувах, скидах та інших геологічних тіл.

2. Змодельовані два швидкісні розрізи в південно-східній частині України за проектами DOBRE-99 і DOBRE-2. Наявність зони перекриття між профілями дала змогу побудувати профіль загальною довжиною 770 км і глибиною до 70 км, який перетинає Чорне море, Керченський півострів, Азовське море, Азовський масив, Дніпровську складчасту споруду і Воронежський кристалічний масив.

3. Змодельований швидкісний розріз за профілями DOBRE-99&DOBRE-2, перерахований з глибини у час, співставлено з моделлю, побудованою ДПП «Укргеофізика» за даними глибинного профілю СГТ, який було прокладено по тій самій лінії. Отримано геологічний розріз, на якому відпрацьовані різні сейсмічні методики, в основі яких лежать різні фізичні властивості середовища. Порівнюючи дві моделі, можна побачити невідповідність між ними в фундаменті Донецької складчастої споруди, в зоні переходу від Азовського масиву до коромантійної суміші та в будові Скіфській плити, де ізолінії швидкостей не співпадають з відбиваючими границями. На частині швидкісної моделі профілю DOBRE-2 виділяється значна швидкісна аномалія, за якою на глибині 30 км присутні нехарактерні швидкості 6,2–6,4 км/с. Горизонтальні розміри аномалії – 180 км. Такі самі швидкості на відстані 20 км (80-й кілометр профілю) спостерігаються на глибині 10 км. Тобто очевидним є факт наявності геологічного об'єкта, який причетний до формування крупної швидкісної аномалії. Однак на часовому розрізі СГТ будь-які тіла, які б могли пояснити аномалію, відсутні. Крім цього, на швидкісній моделі відсутні будь-які прояви контрастної границі на схилі Воронезького кристалічного масиву, яку виділяє метод СГТ. Виявлені структурні неузгодження між фізичним моделями пояснено розломно-блоковою моделлю.

4. Для виділення слабоенергетичних хвиль, відбитих від границі Мохо або перекритих та ускладнених хвилями-завадами, запропоновано різницевий метод, який дає змогу виявляти і виділяти годографи відбитих хвиль довільної форми – теоретичної або розрахункової. Частотна корекція виявлених відбитих сейсмічних хвиль підвищує високочастотну складову, що призводить до появи чіткої лінії фронту відбитої хвилі, і можливість визначення точного часу перших вступів сейсмічної хвилі. Додатково виявлені сейсмічні хвилі дають змогу точніше побудувати глибинну модель середовищах в акваторії Азовського і Чорного морів.

5. Запропоновано адаптивну технологію проведення польових сейсмічних робіт. Проведення сейсмічних робіт за цією технологією дозволяє у польових умовах досягти максимальної якості сейсмічних даних шляхом експрес-оцінки їх якості та внесення поправки у СВІП сигнал з метою коригування амплітудно-частотної характеристики сигналу. При цьому суттєво зменшується вплив верхньої частини сейсмічного розрізу на кінцеві сейсмічні дані, а відповідно і необхідність використання додаткового математичного апарату, який призводить до появи методологічних помилок.

6. Для видалення різношвидкісних хвиль-завад та математично штучно створених хвиль був розроблений різницевий метод, яким в подальшому оброблялись сейсмічні дані для рішення фундаментальних і прикладних задач.

7. На часовому профілі СГТ DOBREReflection2000, обробленому за методом визначення розломно-блокової будови, проявляється геологічна структура розрізу. Групи відбитих хвиль, в тому числі і енергетично слабкі, представлені у вигляді тіл з однаковими поглинальними властивостями, які мають чітко окреслену форму, яка узгоджується з іншими тілами та геологічними структурами. Фактично відбувається конвертація сейсмічних даних в геологічні. Чітко виділяється фундамент ДСС, яка має різну, згідно з інтерпретацією, геодинамічну історію формування. Ліва частина ДСС сформована під впливом сил стискання, направлених під Азовський масив та

частково вверх. Унаслідок цього відбулось видавлювання значних мас кори на 20-кілометровій ділянці і формування чотирьох насувів – Старобешивського, Ялинського, Мушкетівського, Повздовжнього. Найбільший на Донбасі Ялинський насув має перепад за висотою біля 3 км. Права частина також знаходилась під дією сил стискання, однак ці сили були перерозподілені більш рівномірно, що призвело до внутрішнього складкоутворення та значно менших насувів. Причина таких геодинамічних особливостей пояснюється будовою коромантійної суміші і верхньої частини мантії. Ліва частина ДСС, як видно з результату обробки сейсмічних даних СГТ методом визначення розломно-блокової будови середовищ, заходиться над зоною з активним коромантійним складкоутворенням, мантійним діапїризмом. Права частина ДСС лежить на достатньо консолідованій частині кори, під якою знаходяться монолітні мантійні породи.

Запропонованим методом визначення розломно-блокової будови середовища виділяються тонкі протяжні об'єкти, пов'язані з розломними структурами. Один з ідентифікаторів – різка зміна поглинальних властивостей сусідніх порід у просторі, яка з'являється у випадку зсувних розломів або тектонічних порушень. Інший вид розломів, які чітко проявляються на результатах обробки – розломи з заповнювачем цементом та залишками уламків породи, або проникненням магми у міжрозломний простір. Наприклад, такі лінійні структури виділяються на глибині 35–40 км.

8. Розроблено метод автоматизованого пошуку розломів і монолітних структур на шахтних полях з використанням Вейвлет-аналізу в спектрально-часовій області. Він виявляє непомітні для претворення Фур'є слабоамплітудні нестационарні процеси, пов'язані з різкою зміною поглинальних властивостей на контакті геологічних блоків з діаметрально протилежними фізичними властивостями.

9. Приведено приклад поглинальних властивостей середовища на Дробишівському нестандартному родовищі покладів газу і газоконденсату з покришками малої товщини та слабкими екрануючими властивостями. На результатах обробки проявляються малоамплітудні розломи, лінзоподібні тіла, структурні елементи, пов'язані з крупною зоною стискання та розломоутворенням, не помітною для кінематичної сейсміки.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії

1. Кендзера О.В. Омельченко В.Д., Лисинчук Д.В., Легостаєва О.В., **Гринь Д.М.**, Коломієць К.В., Толкунов А.П., Чулков С.С. (2019). *Глибинна будова літосфери та сейсмічна небезпека території України*. Київ: Наук. думка, 197 с.

2. Сапужак І, Вербицький С, **Гринь Д.**, Когут О. (2019). Сейсмічне мікрорайонування майданчика під будівництво резервуару під ЛВДС "Броди". *Геофізика і геодинаміка: прогнозування та моніторинг геологічного середовища: Збірник наукових праць*. Під заг. ред. В.Ю. Максимчука. Львів: Растр-7, С. 172–174.

Статті у фахових виданнях України

1. Гринь М.Є., Гринь Д.М., Мукоєд Н.І., Гордієнко Л.Я. (2007). Фазові та групові швидкості у дисипативному середовищі, їх дійсні та уявні складові. *Геофизический журнал*, 29(5), 84–100.
2. Старостенко В.І., Омельченко В.Д., Лисинчук Д.В., Коломієць К.В., Легостаєва О.В., Гринь Д.М. (2009). Дослідження глибинної будови земної кори та верхньої мантії за профілем ГСЗ Дебрецен–Мукачеве–Рівне (проект PANCAKE-08). *Геоінформатика*, (2), 25–29.
3. Gryn D., Mukoyed N. (2010). Separation of thin layered geological medium fields. *Геофизический журнал*, 32(4), 53–56.
4. Гринь Д.М. (2011). Часові розрізи логарифмічних декрементів згасання тонкошарового середовища. *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*, (9), 282–290.
5. Роман В.І., Шпортюк Г.А., Гринь Д.М., Мукоєд Н.І. (2011). Адаптивні сейсмічні дослідження: моделі реєстрації сейсмічних полів. *Геофизический журнал*, 33(6), 152–157.
6. Роман В.І., Закариєв Ю.Ш., Рябошапко С.М., Гринь Д.М., Мукоєд Н.І. (2012). Перспективи сейсморазведки. *Збірник наукових праць УкрДГПІ* (4), С. 37–45.
7. Роман В.І., Закариєв Ю.Ш., Рябошапко С.М., Гринь Д.М., Мукоєд Н.І. (2013). Интенсивная сейсморазведка. *Збірник наукових праць УкрДГПІ*, (4), 86–92.
8. Starostenko V., Janik T., Kolomiyets K., Czuba W., Środa P., Lysynchuk D., Grad M., Kovacs I., Stephenson R., Thybo H., Artemieva I.M, Omelchenko V., Gintov O., Kutas R., Gryn D., Guterch A., Hegedus E, Komminaho K., Legostaeva O., Tiira T., Tolkunov A. (2013a). Seismic velocity model of the crust and upper mantle along profile PANCAKE across the Carpathians between the Pannonian Basin and the East European Craton. *Tectonophysics*, 608, 1049–1072. doi:10.1016/j.tecto.2013.07.008.
9. Starostenko V., Janik T., Lysynchuk D., Sroda P., Czuba W., Kolomiyets K., Aleksandrowski P., Gintov O., Omelchenko V., Komminaho K., Guterch A., Tiira T., Gryn D., Legostaeva O., Thybo H., Tolkunov A. (2013b). Mesozoic(?) lithosphere-scale buckling of the East European Craton in southern Ukraine: DOBRE-4 deep seismic profile. *Geophysical Journal International*, 195(2), 740–766. doi:10.1093/gji/ggt292.
10. Starostenko V., Janik T., Yegorova T., Farfuliak L., Czuba W., Środa P., Lysynchuk D., Thybo H., Artemieva I., Sosson M., Volfman Y., Kolomiyets K., Omelchenko V., Gryn D., Guterch A., Komminaho K., Legostaeva O., Tiira T., Tolkunov A. (2015). Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian Platform: the DOBRE-5 profile across the northwestern Black Sea and the Crimean Peninsula. *Geophysical Journal International*, 201(1), 406–428. doi:10.1093/gji/ggv018.
11. Роман В.І., Закариєв Ю.Ш., Рябошапко С.М., Попков В.С., Богаєнко М.В., Гринь Д.М., Мукоєд Н.І. Техніко-технологічні комплекси для адаптивних сейсмічних досліджень. (2015). *Збірник наукових праць УкрДГПІ*, (1), 37–45.
12. Starostenko V., Janik T., Stephenson R., Gryn D., Rusakov O., Czuba W., Środa P., Lysynchuk D., Grad M., Guterch A., Fluh E., Thybo H., Artemieva I., Tolkunov A., Sydorenko G., Omelchenko V., Kolomiyets K., Legostaeva O., Dannowski A., Shulgin A. (2016). DOBRE-2 WARR profile: the Earth's upper crust across Crimea between the Azov Massif and the northeastern Black Sea. In M. Sosson, R.A. Stephenson, & S.A.

Adamia, (Eds.), *Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus*. Geol. Socy. London. Spec. Publ. 428. doi:10.1144/SP428.11.

13. Starostenko V.I., Gintov O.B., Lysynchuk D.V., Kolomiyets E.V., Omelchenko V.D., **Gryn D.N.**, Legostaeva O.V., Janik T., Środa P., Czuba W., Guterch A., Aleksandrowski P., Komminaho K., Tiira T., Thybo G., Tolkunov A.V. (2017a). Crustal And Upper Mantle Velocity Model Along The Dobre-4 Profile From North Dobruja To The Central Region Of The Ukrainian Shield: 1. Seismic Data. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 53(2), 193–204. doi: 10.1134/S1069351317020124

14. Пашкевич И.К., Русаков О.М., Кутас Р.И., **Гринь Д. Н.**, Старостенко В.И., Яник Т. (2018). Строеие литосферы по комплексному анализу геолого-геофизических данных вдоль профиля DOBREFraction'99/ DOBRE-2 (Восточно-Европейская платформа—Восточно-Черноморская впадина). *Геофизический журнал*, 40(5), 98–136. doi:10.24028/gzh.0203-3100.v40i5.2018.147476

15. Starostenko V., Janik T., Yegorova T., Czuba W., Sroda P., Lysynchuk D., Aizberg R., Garetsky R., Karataev G., Gribik Y., Farfuliak L., Kolomiyets K., Omelchenko V., Komminaho K., Tiira T., **Gryn D.**, Guterch A., Legostaeva O., Thybo H., Tolkunov A. (2018). Lithospheric structure along wide-angle seismic profile GEORIFT 2013 in Pripyat-Dnieper-Donets Basin (Belarus and Ukraine). *Geophysical Journal International*, 212(3), 1932–1962. doi:10.1093/gji/ggx509.

16. **Гринь Д.М.**, Вербицкий С.Т. (2019а). Автономні цифрові сейсмічні станції SV. *Геофизический журнал*, 41(4), 125–144. doi:10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177376.

17. **Гринь Д.М.** (2019б). Методика визначення просторового поширення малоамплітудних розломів і тріщин у тонкошаруватому вуглевмісному геологічному середовищі. *Геофизический журнал*, 41(5), 190–205. doi:10.24028/gzh.0203-3100.v41i5.2019.183644.

18. **Гринь Д.М.** (2019в). Автоматизований спосіб визначення неузгодженого залягання геологічних горизонтів за тривимірними сейсмічними даними. *Геофизический журнал*, 41(6), 183–194. doi:10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190075.

19. **Гринь Д.М.**, Вербицкий С.Т., Дмитренко О.В. (2019). Адаптивний сейсмічний комплекс для інженерної геофізики. *Геоінформатика*, (4), 65–73.

20. **Гринь Д.М.** (2020а). Виділення глибинних, енергетично слабких хвиль в сейсмічних записах ГСЗ. *Геофизический журнал*, 42(1), 96–109. doi:10.24028/gzh.0203-3100.v42i1.2020.195479.

21. **Гринь Д.М.** (2020б). Глибинна будова Ялинського насуву ДДЗ за даними сейсмічного профілю DOBREFraction-2000. *Доповіді НАН України*, (2), 45–51. doi:10.15407/dopovidi2020.02.045.

22. Janik T., Starostenko V., Aleksandrowski P., Yegorova T., Czuba W., Środa P., Murovskaya A., Zajats K., Kolomiyets K., Lysynchuk D., Wojcik D., Mechie J., Głuszyński A., Omelchenko V., Legostaeva O., Tolkunov A., Amashukeli T., **Gryn D.**, Chulkov S. (2020). TTZ-South seismic experiment. *Геофизический журнал*, 42(3), 3–15. doi:10.24028/gzh.0203-3100.v42i3.2020.204698.

23. **Гринь Д.М.** Розломно-блокова будова границі Мохо під центральною частинною Донецької складчастої споруди (по лінії сейсмічного профілю DOBReFlection2000). (2020). *Геофизический журнал*, 42(5), 193–204. doi:10.24028/gzh.0203-3100.v42i5.2020.215083.

24. Starostenko V., Janik T., Mocanu V., Stephenson R., Yegorova T., Amashukeli T., Czuba W., Środa P., Murovskaya A., Kolomiyets K., Lysynchuk D., Okoń J., Dragut A., Omelchenko V., Legostaieva O., **Gryn D.**, Mechi J., Tolkunov A. (2020). RomUkrSeis: Seismic model of the crust and upper mantle across the Eastern Carpathians – From the Apuseni Mountains to the Ukrainian Shield. *Tectonophysics*, 794, 228620. doi:10.1016/j.tecto.2020.228620.

Патенти

1. Роман В.І., Попков В.С., Богаєнко М.В., Євстахевич З.М., Дмитренко О.В., **Гринь Д.М.**, Мукоєд Н.І. (2018). Спосіб збудження сейсмічних хвиль. Патент на винахід № 116423 (a2016 13407) від 12.03.2018.

2. Попков В.С., Богаєнко М.В., Роман В.І., **Гринь Д.М.**, Мукоєд Н.І. (2019). Спосіб збудження сейсмічних хвиль. Патент на винахід № 119203 (a2017 12828) від 10.05.2019.

Тези доповідей і матеріали конференцій

1. **Гринь Д.М.** (2006). Траєкторії знеміцнення відкладів у зв'язку з ефектом Рабіндера за даними сейсміки. *Матеріали Всеукраїнської наукової конференції “Моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану”*, Київ. (С. 58–60).

2. Starostenko, V.I., Grad, M., **Gryn, D.N.**, Guterch A., Dannovski, A., Kolomiyets, K.V, Legostaeva, O.V., Lysynchuk, D.V., Omelchenko, V.D., Stephenson, R.A., Stratford, W., Thybo, H., Tolkunov, A.P., Flyuh E., Czuba, W., Shroda, P., Shulgin, A., Janik T. (2007). Integrated geophysical studies of the crust and upper mantle on the southern margin of the East European Craton (Azov Sea–Crimea–Black Sea area). Models of the Earth's crust and upper mantle, VSEGEI, St. Petersburg, (P. 206–207).

3. Starostenko, V.I., Grad, M., **Gryn, D.N.**, Guterch A., Dannovski, A., Kolomiyets, K.V, Legostaeva, O.V., Lysynchuk, D.V., Omelchenko, V.D., Stephenson, R.A., Stratford, W., Thybo, H., Tolkunov, A.P., Flyuh E., Czuba, W., Shroda, P., Shulgin, A., Janik T. (2008). Seismic studies of the lithosphere by the DSS and CDP methods at the junction between the East European Platform and the Scythian plates (Project DOBRE-2). Tenth. Geoph. Reading by Fedynsky V.V. name, Abstr., Moscow, P. 41. (P. 41).

4. Гринь М.Є., **Гринь Д.М.** (2008). Затухание сейсмических волн и прогнозирование путей движения флюидов. *Дегазация Земли: геомеханика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы. Материалы Всерос. конф. Москва. 22–25 апреля 2008 г.* (С. 134–137).

5. Роман В.И., Закариев Ю.Ш., Рябошапка С.М., **Гринь Д.Н.**, Мукоєд Н.И. (2012). Перспективы сейсморазведки. *3-я Междунар. науч.-практ. конф.: Современные методы сейсморазведки при поисках месторождений нефти и газа в условиях сложностроенной структур. Украина, Крым, г. Феодосия, 16–22 сентября 2012*

2. C. 23–25.

6. Starostenko, V., Czuba, W., Grad, M., Gintov, O., **Gryn, D.**, Guterch, A., Hegedűs, E., Janik, T., Kolomiyets, K., Komminaho, K., Kutas, R., Legostaeva, O., Lysynchuk, D., Omelchenko, V., Środa, P., Stephenson, R., Thybo, H., Tiira, T., Tolkunov, A. (2012a). Velocity model of the crust and upper mantle along the profile PANCAKE from Pannonian basin across Carpathians towards the cratonic Europe. *The 33rd General Assembly of the European Seismological Commission (GA ESC 2012), (Russia Moscow, Moscow–Obninsk 19–24 August 2012): Abstracts* (pp. 70–71).

7. Starostenko, V., Czuba, W., Grad, M., Gintov, O., **Gryn, D.**, Guterch, A., Hegedűs, E., Janik, T., Kolomiyets, K., Komminaho, K., Kutas, R., Legostaeva, O., Lysynchuk, D., Omelchenko, V., Środa, P., Stephenson, R., Thybo, H., Tiira, T., Tolkunov, A. (2012b). Velocity model of the crust and upper mantle along the profile PANCAKE from Pannonian basin across Carpathians towards the cratonic Europe. *The 15th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and Their Margins “Seismix 2012”, (China, Beijing, 16–20 September 2012): Abstracts* (P. 84).

8. Starostenko, V., Janik, T., Lysynchuk, D., Środa, P., Czuba, W., Kolomiyets, K., Gintov, O., Omelchenko, V., Komminaho, K., Guterch, A., Tiira, T., **Gryn, D.** (2012b). Velocity model of the lithosphere from Dobrogea Orogen towards the Ukrainian Shield, DOBRE-4 profile. *The 15th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and Their Margins “Seismix 2012”, (China, Beijing, 16–20 September 2012): Abstracts* (P. 86).

9. Starostenko, V., Janik, T., Stephenson, R., **Gryn, D.**, Tolkunov, A., Czuba, W., Środa, P., Lysynchuk, D., Omelchenko, V., Grad, M., Guterch, A., Kolomiyets, K., Thybo, H., Legostaeva, O. (2012r). Velocity model of the crust and upper mantle at the southern margin of the East European Craton (Azov Sea-Crimea-Black Sea area), DOBRE-2 & DOBRE’99 transect. *The 15th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and Their Margins “Seismix 2012”, (China, Beijing, 16–20 September 2012): Abstracts* (P. 85).

10. Starostenko, V., Janik, T., Lysynchuk, D., Środa, P., Czuba, W., Kolomiyets, K., Aleksandrowski, P., Gintov, O., Omelchenko, V., Komminaho, K., Guterch, A., Tiira, T., **Gryn, D.**, Legostaeva, O., Thybo, H., Tolkunov, A. (2013). Mesozoic(?) lithosphere-scale buckling of the East European Craton in southern Ukraine: DOBRE-4 deep seismic profile. *EGU General Assembly 2013 (Austria, Vienna, 07–12 April 2013). Geophysical Research Abstracts*. Vol. 15, EGU2013-4348.

11. Starostenko, V., Janik, T., Yegorova, T., Czuba, W., Środa, P., Lysynchuk, D., Aizberg, R., Garetsky, R., Karataev, G., Gribik, Y., Farfuliak, L., Kolomiyets, K., Omelchenko, V., **Gryn, D.**, Guterch, A., Komminaho, K., Legostaeva, O., Thybo, H., Tiira, T., Tolkunov, A. (2014a). *The GEORIFT 2013 wide-angle seismic profile, preliminary results. 16th SEISMIX International Symposium (Spain, Barcelona–Castelldefels, 12–17 October 2014): Abstracts* (P. 24).

12. Starostenko, V., Janik, T., Czuba, W., Środa, P., Farfuliak, L., Volfman, Y., Kolomiyets, K., Lysynchuk, D., Omelchenko, V., Gintov, O., **Gryn, D.**, Guterch, A., Komminaho, K., Legostaeva, O., Thybo, H., Tiira, T., Tolkunov, A. (2014b). The crust and upper mantle in the Scythian platform: seismic model along DOBRE-5 profile (the northwestern Black sea and the Crimean peninsula). *Final symposium «Evolution of the*

Black Sea to Central Asia Tethyan Realm since the Late Paleozoic», Paris, France, December 8–9, 2014 (pp. 147–149).

13. Starostenko, V., Janik, T., Yegorova, T., Farfuliak, L., Czuba, W., Środa, P., Sosson, M., Volfman, Y., Kolomiyets, K., Lysynchuk, D., Omelchenko, V., **Gryn, D.**, Guterch, A., Komminaho, K., Legostaeva, O., Thybo, H., Tiira, T., Tolkunov, A. (2014B). Seismic structure along DOBRE-5 profile, from the North Dobrogea Orogen across the SW shelf of the Black Sea and Crimea Peninsula, Ukraine. *16th SEISMIX International Symposium, Barcelona, Spain, 12–17 October 2014 (P. 27).*

14. Amashukeli, T., Czuba, W., Grzyb, J., Dragut, A., **Gryn, D.**, Janik, T., Kolomiyets, K., Legostaeva, O., Lysynchuk, D., Mechie, J., Mocanu, V., Okoń, J., Omelchenko, V., Starostenko, V., Stephenson, R., Środa, P., Trzeciak, M., & RomUkrSeis Working Group. (2016). The RomUkrSeis wide-angle seismic profile: preliminary results. *SEISMIX 2016, Seismology at the Crossroads, 17th International Seismix Symposium, Macdonald Aviemore Resort, Aviemore, Scotland, 15–20 May 2016 (P 130).*

15. Starostenko, V., Janik, T., Yegorova, T., Czuba, W., Środa, P., Lysynchuk, D., Aizberg, R., Garetsky, R., Karataev, G., Gribik, Y., Farfuliak, L., Kolomiyets, K., Omelchenko, V., **Gryn, D.**, Guterch, A., Komminaho, K., Legostaeva, O., Thybo, H., Tiira, T., Tolkunov, A. (2016). The GEORIFT 2013 wide-angle seismic profile, preliminary results. *SEISMIX 2016, Seismology at the Crossroads, 17th International Seismix Symposium, Macdonald Aviemore Resort, Aviemore, Scotland, 15–20 May 2016 (P 147).*

16. Starostenko V., Janik T., Yegorova T., Czuba W., Środa P., Lysynchuk D., Aizberg R., Garetsky R., Karataev G., Gribik Y., Farfuliak L., Kolomiyets K., Omelchenko V., **Gryn D.**, Guterch A., Komminaho K., Legostaeva O., Thybo H., Tiira T., Tolkunov A. (2017). *The GEORIFT 2013 wide-angle seismic profile, along Pripyat-Dnieper-Donets Basin. Geophysical Research Abstracts. Vol. 19, EGU2017-PREVIEW, 2017 EGU General Assembly.*

17. Amashukeli, T., Czuba, W., Dragut, A., **Gryn, D.**, Janik, T., Kolomiyets, K., Legostaeva, O., Lysynchuk, D., Mechie, J., Mocanu, V., Okoń, J., Omelchenko, V., Skrzynik, T., Starostenko, V., Stephenson, R., Środa, P., Yegorova, T. (2018). RomUkrSeis: the deep structure of the TESZ where it is obscured by the Eastern Carpathians. *RomUkrSeis Working_Group: Book of abstracts, 18 International SEISMIX Symposium Seismology between the Poles, 17–22 June 2018 Cracow, Poland (P. 12).*

18. Amashukeli, T., Czuba, W., Dragut, A., **Gryn, D.**, Janik, T., Kolomiyets, K., Legostaeva, O., Lysynchuk, D., Mechie, J., Mocanu, V., Okoń, J., Omelchenko, V., Skrzynik, T., Starostenko, V., Stephenson, R., Środa, P., Yegorova, T. (2018). RomUkrSeis: the deep structure of the TESZ where it is obscured by the Eastern Carpathians. *RomUkrSeis Working_Group: Book of abstracts, 18 International SEISMIX Symposium Seismology between the Poles, 17–22 June 2018 Cracow, Poland (P. 130).*

19. Starostenko, V., Janik, T., Mocanu, V., Stephenson, R., Yegorova, T., Amashukeli, T., Czuba, W., Środa, P., Murovskaya, A., Kolomiyets, K., Lysynchuk, D., Okoń, J., Dragut, A., Omelchenko, V., Legostaeva, O., **Gryn, D.**, Mechie, J., Tolkunov, A. (2019). Seismic model of the crust and upper mantle across the Eastern Carpathians – from the

Apuseni Mountains to the Ukrainian Shield. *Geophysical Research Abstracts Vol. 21, Відень, Австрія, 7–12 травня 2019*.

20. Janik, T., Starostenko, V., Aleksandrowski, P., Yegorova, T., Czuba, W., Środa, P., Murovskaya, A., Zajats, K., Głuszyński, A., Kolomiyets, K., Lysynchuk, D., Wójcik, D., Omelchenko, V., Legostaieva, O., Mechie, J., Tolkunov, A., Amashukeli, T., **Gryn', D.**, Chulkov, S. (2020). TTZ-South seismic profile reveals the lithospheric structure along the SW border of the East European Craton in SE Poland and NW Ukraine. *Abstracts of SEISMIX 2020 – 19th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and their Margins. 15–20 March 2020, Perth, Australia*.

21. Janik, T., Starostenko, V., Aleksandrowski, P., Yegorova, T., Czuba, W., Środa, P., Murovskaya, A., Zajats, K., Głuszyński, A., Kolomiyets, K., Lysynchuk, D., Wójcik, D., Omelchenko, V., Legostaieva, O., Mechie, J., Tolkunov, A., Amashukeli, T., **Gryn', D.**, Chulkov, S. (2020). The transition of the East European cratonic lithosphere to that of the Palaeozoic collage of the Trans-European Suture Zone as depicted on the TTZ-South deep seismic profile (SE Poland to NW Ukraine). *Geophysical Research Abstracts Vol. 22, 2020 EGU General Assembly*.

АНОТАЦІЯ

Гринь Д.М. Метод визначення розломно-блокової структури геологічного середовища за даними сейсмозв'язки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22 – геофізика (103 – Науки про Землю). – Інститут геофізики НАН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота виконана з метою створення вискороздільного методу визначення розломно-блокової будови геологічного середовища. Він використовує частозалежне згасання енергії сейсмічних хвиль, які проходять через підземні об'єкти. Метод дає змогу виявляти просторову закономірність у згасальних властивостях сейсмічних хвиль, пов'язану з наявністю геологічних тіл. Різні фізичні властивості геологічних структур у просторі роблять можливим простеження їх просторової ідентичності та структурної відмінності, які проявляються у вигляді трьох типів об'єктів – монолітних тіл, розломних структур та заповнювача, який приймає форму оточуючих об'єктів. Тобто мова йде про створення об'єктно-орієнтованого методу, в якому фізичні властивості відіграють другорядну роль.

Результати інтерпретації сейсмічних даних часто є далекими від істинної геологічної глибинної будови, оскільки подають результат у вигляді фізичних властивостей геології середовища. В останні десятиліття “безрозломні та безблокові розрізи” стали загальноприйнятими, і на їх основі відбувається спроба пояснити складні регіональні геодинамічні рухи. Різні фізичні моделі однієї території часто мають суттєві неузгодженості, які потребують додаткових пояснень.

Використовуючи розроблений метод було відтворено розломно-блокову будову Донецької складчастої структури та прилеглих територій, тонкошарового вуглевмісного середовища шахтного поля шахти “Краснолиманська”, та декількох вишукувальних профілів на о. Зміїний. Проаналізовано відмінності швидкісної

моделі DOBRE-99 і кінематичної СГТ DOBREflection2000 та пояснено причини відмінностей.

Ключові слова: поглинання, згасання енергії, різницевий метод, глибинне сейсмічне зондування, дисипативні властивості, базисні функції, спектральна область, границя Мохо, тектонічні порушення.

SUMMARY

Gryn' D.M. Method for determining the fault-block structure of the geological environment according to seismic data. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript. The dissertation on doctor scientific degree in physical and mathematical sciences on a specialty 04.00.22 – geophysics (103 – Earth sciences). – Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is performed in order to create a high-resolution method for determining the fault block structure of the geological environment. It uses the frequency attenuation of the seismic wavesenergy that pass through the underground objects. The method allows detecting the spatial pattern in the attenuating properties of seismic waves, which are associated with the presence of geological bodies. The different physical properties of geological structures in space make it possible to trace their spatial identity and structural differences, which manifest themselves in the form of three types of objects: monolithic bodies; fault structures; and aggregate, which take the form of surrounding objects. That is, it is about creating an object-oriented method where physical properties play a secondary role.

The results of the interpretation of seismic data are often far from the true geological depth structure, as they present the result in the form of physical properties of the geological environment. In recent decades “fracture-free and block-free sections” have become commonplace, and an attempt is made to explain complex regional geodynamic movements based on them. Different physical models of the same area often have significant inconsistencies that need further explanation.

The developed method was applied in: fractured block structure of the Donetsk folded region and adjacent territories; the thin-layer coal-bearing environment of the mine field of the Krasnolimanska mine; and several prospecting profiles on the Zmeyny (Snake) Island. The differences between the DOBRE-99 velocity model and the CDP DOBREflection2000 kinematic velocity model were analyzed, and the reasons for the differences were explained.

Key words: absorption, energy attenuation, difference method, deep seismic sounding, dissipative properties, basic functions, spectral region, Moho boundary, tectonic faults.

АННОТАЦИЯ

Гринь Д.Н. Метод определения разломно-блочной структуры геологической среды за данными сейсморазведки. – Квалификационный научный труд на правах рукописи. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 04.00.22 – геофизика (103 – Науки о Земле). – Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, 2021.

Диссертационная работа выполнена с целью создания высокораздельного метода определения разломно-блоковой структуры геологической средой. Метод базируется на частотозависимом затухании энергии сейсмических волн, которые проходят через подземные объекты. Высокая разрешающая способность метода разрешает выявлять пространственную идентичность и структурные отличия, которые проявляются в виде трех типов объектов – монолитных тел, разломных структур и заполнителя, который принимает форму окружающих объектов.

Скоростные модели, полученные в результате широкоугольных сейсмических работ по методике ГСЗ, представляют геологию в виде скоростного разреза, подчеркивая вертикальные детали блочной структуры с плавным нарастанием градиента скорости по пространству и глубине. Такие скоростные разрезы, как правило, не отображают резких изменений свойств среды, которые можно было бы ассоциировать с глубинными разломами и имеют вид слоистых разрезов с постепенным изменением скорости в осадочных породах, коре и мантии. В последние десятилетия “безразломные и безблочные разрезы” стали общепризнанными, и на их основе пытаются объяснить сложные региональные геодинамические движения, которые привели к формированию современного геологического строения.

В диссертации представлены два скоростных разреза, полученные соискателем в результате моделирования северо-восточной части Украины по проектам DOBRE-99 и DOBRE-2. Наличие зоны перекрытия позволило построить профиль общей длиной 770 км.

Для выделения энергетически слабых волн, отраженных от границы Мохо либо перекрытых и осложненных волнами-помехами, был предложен разностный метод, который позволил выявлять и выделять годографы отраженных волн произвольной формы. Частотная коррекция выявленных волн повышает высокочастотную составляющую, что приводит к появлению четкой линии фронта отраженной волны и позволяет определить точное время вступления волн.

На временном профиле СГТ DOBREreflection2000, обработанном методом определения разломно-блокового строения, проявляется геологическая структура разреза. Группы отраженных волн, в том числе и энергетически слабые, представлены в виде тел с одинаковыми поглощающими свойствами, с четко очерченной формой, которая согласуется с другими телами и геологическими структурами. Фактически происходит конвертация сейсмических данных в геологические.

Поскольку качество входных сейсмических данных является решающим для определения диссипативных параметров среды, рассмотрены вопросы создания адаптивной технологии проведения сейсмических работ, целью использования которой является получение в полевых условиях сейсмических данных с минимальным воздействием верхней части сейсмического разреза на наполнение спектрального состава сейсмограмм.

Применение метода по определению разломно-блоковой структуры для прикладных задач с использованием сейсмических данных 3D МСГТ показано на примере изучения строения тонкослоистой углесодержащей среды шахты «Краснолиманская».

Приведен пример поглощающих свойств среды на Дробышевском месторождении залежей газа и газоконденсата с горизонтами малой толщины и слабыми экранирующими свойствами. На результатах обработки проявляются малоамплитудные разломы, линзовидные тела, структурные элементы, связанные с крупной зоной сжатия и разломообразованием, незаметной для кинематической сейсмоки.

Ключевые слова: поглощение, угасание энергии, разностный метод, глубинное сейсмическое зондирование, диссипативные свойства, базисные функции, спектральная область, граница Мохо, тектонические нарушения.