

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна

ЛИСИНЧУК ДМИТРО ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 551.24+550.834

**ШВИДКІСНІ МОДЕЛІ ЛІТОСФЕРИ УКРАЇНИ ЗА ДАНИМИ
ШИРОКОКУТНИХ СЕЙСМІЧНИХ ЗОНДУВАНЬ**

04.00.22 – геофізика

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора геологічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України.

Науковий консультант – Віталій Іванович Старостенко, академік НАН України,
доктор фіз.-мат. наук, директор Інституту геофізики ім.
С. І. Субботіна НАН України

Офіційні опоненти: **Вижва Сергій Андрійович**, доктор геологічних наук,
професор, завідувач кафедри геофізики геологічного
факультету Київського національного університету
ім. Тараса Шевченка

Верховцев Валентин Геннадійович, доктор геолого-
мінералогічних наук, завідувач Відділення геохімії,
геодинаміки та мінеральної сировини і відділу
спеціальної металогенії Державної установи «Інститут
геохімії навколишнього середовища НАН України»

Лісний Георгій Дмитрович, доктор геологічних наук,
заступник генерального директора ТОВ "ГЕОЮНІТ",
Київ

Захист відбудеться **“28” грудня 2017 р.** о **10-00** годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 26.200.01 при Інституті геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України за
адресою:

03680, м. Київ-142, пр-т Палладіна, 32.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту геофізики
ім. С. І. Субботіна НАН України за адресою:

03680, м. Київ-142, пр-т Палладіна, 32 та на електронному ресурсі
<http://www.igph.kiev.ua/>.

Автореферат розісланий **“27” листопада 2017 р.**

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради,
доктор геологічних наук



Т. К. Бурахович

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Глибинні сейсмічні дослідження земних надр дають можливість вивчати фізичний стан, будову та склад консолідованої кори нашої планети, а також розуміння механізму її змін та історії розвитку. Основою цих робіт є ширококутні сейсмічні дослідження за відбитими та заломленими хвилями, які вивчають розповсюдження пружних коливань в земній корі та верхній мантії.

Літосфера України представлена різними за складом, віком, глибиною, умовами утворення та розвитку, наявністю покладів корисних копалин масштабними блоками земної кори. Починаючи з докембрійського Українського щита та прилеглих територій до Карпат і транс'європейської шовної зони на заході і Скифської плити на півдні, вони були гарно вивчені геофізичними методами, в першу чергу глибинним сейсмічним зондуванням. Проте, бурний ріст технології сейсмічних досліджень, поява нової цифрової записуючої апаратури та програмних засобів обробки сейсмічної інформації, вирішення прямої та оберненої задачі сейсміки на основі математичного моделювання та інверсії, дозволили провести нові сейсмічні експерименти на сучасному технологічному рівні та проінтерпретувати отримані цифрові дані з допомогою відповідних комп'ютерних програм. В свою чергу, наявні дані про геологічну будову масштабних блоків земної кори, дозволила провести нові дослідження, які були спрямовані на виявлення детальних швидкісних характеристик шарів геологічного розрізу, структури зон контактів великих террейнів та перспектив наявності покладів вуглеводнів та інших корисних копалин.

Дана робота присвячена актуальній задачі отримання нових знань про глибинну будову літосфери України на основі інтерпретації сучасних ширококутних сейсмічних зондувань. Інтерпретація сейсмічних даних як правило передбачає створення швидкісної моделі на основі прямого або оберненого моделювання часів розповсюдження певних фаз коливань у земній корі та мантії з використанням теорії променевого методу. Програми моделювання різняться за умовами параметризації моделі та за наборами даних, що використовуються для моделювання, регуляризації результату і т.д. Пряме та обернене моделювання часів пробігу хвиль в земній корі та верхній мантії дає прийнятний результат для створення швидкісної моделі Р-хвиль. Така модель може розглядатися як перший крок для отримання синтетичних сейсмограм на основі повнохвильового моделювання кінцево-різницеvim методом.

Програми побудови швидкісної моделі, як правило, засновані на променевій теорії і дозволяють протрасувати сейсмічні промені в середовищі з заданими швидкісними характеристиками і отримати відповідні часи пробігу хвилі від пункту збудження до приймачів. Швидкісна модель при цьому модернізується таким чином, щоб зменшити різницю між спостереженими та розрахунковими годографами.

Протягом останніх декількох десятиліть, інверсійне (томографічне) моделювання в основному замінило громіздке пряме, як більш швидкий і ефективний інструмент для визначення розподілу сейсмічних швидкостей, через декілька недоліків останнього способу. Процес ручного підбору моделі методом

проб і помилок, який виконується для декількох пунктів вибуху одночасно, важкий і забирає багато часу, особливо в порівнянні із зворотними автоматичними методами. Крім того, послідовність модифікації моделі залежить від рішень інтерпретатора, що вводить деяку суб'єктивність в остаточному рішенні.

В свою чергу, перевагою прямого моделювання є можливість безперервно контролювати правильність інтерпретації сейсмічних даних (ідентифікація часів вступу даної сейсмічної фази, як заломлення, так і відбиття від конкретного шару / розриву). На кожному етапі інтерпретатор може перевірити ідентифікацію скорельованих сейсмічних фаз. Наприклад, труднощі в моделюванні певної сейсмічної фази за допомогою підгонки моделі, в той час, коли всі інші дані збігаються досить гарно, можуть свідчити, що "підозрювана" фаза насправді може утворюватися на додатковій не включеній в модель 2D-структурі (наприклад, локальній зоні з високою швидкістю). Така ситуація є приводом включення в модель додаткового елемента. В іншому випадку, такі проблемні фази можуть з'являтися, як наслідок бічних відбиттів від похилих границь або дифракція від деякої локальної структури, що розташовані поруч з сейсмічним профілем, за яким проводиться моделювання. Ці фази мають бути виявлені та виключені з розгляду. Таку процедуру можна провести лише під час ручного покрокового підбору моделі. Це допомагає уникнути значних помилок в швидкісній моделі і появи артефактів, які можуть бути помилково додані для моделювання деяких неправильно ідентифікованих сейсмічних фаз хвильового поля, природа яких на перший погляд не є очевидною. Правильна ідентифікація сейсмічних фаз, які використовуються для моделювання, була підкреслена в роботі [Zelt, 1999, с. 184], де стверджується, що "модель, розроблена на основі аналізу сейсмічних ширококутних спостережених даних гарна настільки, наскільки гарно проведено ідентифікацію та кореляцію сейсмічних фаз".

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася у відповідності з наступними науковими темами:

1. «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», № держ. реєстрації 0108U004822.

2. «Геофізичні дослідження літосфери зони зчленування Східно-Європейської та Західно-Європейської платформ у зв'язку з перспективами нафтогазоносності», № держ. реєстрації 0109U002947.

3. «Сейсмічні дослідження літосфери зони зчленування Східно-Європейської платформи та Скіфської плити вздовж профілю Маріуполь-Феодосія-Чорне море у зв'язку з перспективами нафтогазоносності» в 2004-2007, № держ. реєстрації 0107U003123.

4. «Створення комплексної тривимірної геофізичної моделі літосфери Українського щита у зв'язку з магматизмом, тектонікою та утворенням родовищ корисних копалин. № держ. реєстрації 0102U002478.

5. «Сейсмічні дослідження земної кори і верхньої мантії Землі північно-західного шельфу Чорного моря у зв'язку з перспективами нафтогазоносності (проект DOBRE-5)», № держ. реєстрації 0110U006596.

6. цільова тема «Геодинамічний розвиток літосфери України та формування і розміщення родовищ корисних копалин (2012-2016 рр.)», № держ. реєстрації 0112U003044.

7. «Геофізичні дослідження глибинної будови, еволюції та геодинаміки Азово-Чорноморського регіону України та Криму у зв'язку з оцінкою перспектив нафтогазоносності (2014-2018 рр.)», № держ. реєстрації 0114U000234.

8. «Сейсмічні та геофізичні спостереження на платформній частині території України у 2014-2018 рр.», № держ. реєстрації 0114U000231.

Метою роботи є вивчення глибинної будови літосфери території України на основі швидкісних моделей, які розраховані за даними нових експериментальних ширококутних глибинних сейсмічних досліджень для оцінки перспектив нафтогазоносності та вмісту корисних копалин.

Об'єктом дослідження є хвильове поле вздовж чотирьох регіональних сейсмічних профілів, **предметом дослідження** є швидкісні моделі глибинних розрізів земної кори, що розраховані на основі різних методів та програмних продуктів вирішення прямої і оберненої задач сейсміки, та геологічна будова середовища, що визначена за розрахованими моделями.

Методи дослідження. Дані про глибинну будову земної кори та верхньої мантії отримані з допомогою методів геофізичних досліджень, перш за все ширококутної сейсміки за заломленими та відбитими хвилями. Інтерпретація отриманих польових сейсмічних записів та розрахунок швидкісних моделей розрізу земної кори вздовж відпрацьованих профілів проводилась з допомогою спеціальних програм, що забезпечували променеве моделюванням та інверсію часів пробігу заломлених та відбитих хвиль. Крім того використовувалися програми моделювання повного хвильового поля для оцінки динамічних характеристик сейсмічного запису і його відповідності зафіксованим даним.

Більшість запропонованих в роботі швидкісних моделей розраховані з допомогою декількох принципово відмінних підходів та відповідних ним програмних засобів, що забезпечило, по-перше, більшу достовірність одержаних результатів і, по-друге, дозволило дослідити можливості наявних програмних комплексів у вирішенні поставлених задач та виробити методику застосування програм сейсмічного моделювання у вирішенні задач інтерпретації даних ширококутної сейсміки, що зібрані вздовж регіональних профілів.

Основні задачі, які вирішені безпосередньо автором:

1. Цифрова обробка польових сейсмічних записів та візуалізація хвильового поля, побудова файлів даних в спеціальних форматах збереження сейсмічної інформації, підготовка сейсмограм спільного пункту вибуху для наземних експериментів та сейсмограм спільного пункту прийому для морських досліджень, редукція швидкості, фільтрація записів та підсилення корисних сейсмічних хвиль.
2. Аналіз хвильового поля та побудова системи годографів зафіксованих сейсмічних хвиль, ув'язка годографів у взаємних точках, визначення природи та типу хвиль, що виділені у сейсмічному полі та включені в набір фактичних даних часів вступу (часів пробігу) корисних хвиль.
3. Розрахунок швидкісних моделей методом підбору з використанням прямого

променевого моделювання. Інверсія часів пробігу заломлених і відбитих хвиль та розрахунок швидкісної моделі на основі рішення оберненої кінематичної задачі сейсміки.

4. Розрахунок синтетичних сейсмограм спільного пункту вибуху та дослідження елементів швидкісного розрізу за результатами порівняння вихідних та розрахункових сейсмічних розрізів.
5. Аналіз моделей швидкості сейсмічних хвиль в земній корі та верхній мантиї та їх геологічна інтерпретація вздовж профілів ширококутних сейсмічних глибинних зондувань.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Розроблена методика побудови швидкісної моделі, яка базується на комплексному використанні принципово різних алгоритмів та програм, разом з розрахунком синтетичних сейсмограм та перевіркою їх відповідності спостереженому хвильовому полю.

2. Пряме та зворотне сейсмічне моделювання при інтерпретації даних ширококутних сейсмічних досліджень з допомогою загальнозживаних програмних комплексів вперше дало можливість вивчити переваги і недоліки кожного з них, та оцінити достовірність розрахованих результативних матеріалів при принциповому збігу кінцевих моделей.

3. Інтерпретація даних з використанням принципово відмінних алгоритмів і програм комп'ютерного моделювання дала можливість виявити недоліки та переваги загальнозживаних засобів математичної обробки даних для складних сейсмогеологічних умов та запропонувати шляхи вдосконалення програм моделювання.

4. Побудовані швидкісні моделі чотирьох регіональних профілів дозволили отримати суттєво нову інформацію стосовно будови земної кори та верхньої мантиї території України.

5. Структурний аналіз швидкісних розрізів надав можливість виділення перспективних в нафтогазоносному плані осадових басейнів та ділянок з приповерхневим заляганням кристалічних порід, які можуть містити поклади мінеральних корисних копалин.

Основні наукові результати, висунуті на захист, полягають в тому, що:

- створена база експериментальних сейсмічних даних вздовж чотирьох регіональних сейсмічних ширококутних профілів у стандартному сейсмічному форматі SEG-Y.

- запропонована методика побудови швидкісної моделі, яка базується на комплексному використанні принципово різних алгоритмів та програм з наступним розрахунком синтетичних сейсмограм та перевіркою їх відповідності спостереженому хвильовому полю;

- на основі вивчення можливостей комп'ютерних програм розрахунку швидкісних моделей, запропоновані шляхи вдосконалення загальнозживаних комплексів, що дозволить використовувати інверсію для інтерпретації складних форм географів з перекриттям, подвоєнням та петлями;

- детальні швидкісні моделі верхньої частини розрізу забезпечують спрямування пошукових робіт на нафту та газ і нагромадження запасів вуглеводнів

- геологічна інтерпретація розрахованих швидкісних моделей чотирьох регіональних профілів, суттєво доповнює сучасні уявлення про будову земної кори та верхньої мантії території України, детальні швидкісні моделі верхньої частини розрізу забезпечують спрямування наступних пошукових робіт на нафту та газ і нагромадження запасів вуглеводнів, глибинні розрізи показали, що:

(I) виявлені виражені відмінності в структурі сейсмічної швидкості земної кори і верхньої мантії між трьома основними тектонічними блоками, що перетинаються профілем EUROBRIDGE'97. Структура швидкісного розрізу Прип'ятського прогину є типовою для докембрійського кратону, але під ним виявлено потужний 5 км високошвидкісний шар в нижній земній корі. Волинський блок разом з Коростенським плутоном характеризуються дуже високою швидкістю сейсмічних хвиль і їх високим співвідношенням. Натомість Подільський блок за швидкостями близький до типової платформної структури, хоча він характеризується відносно низькою сейсмічною швидкістю і їх малим співвідношенням. У мантії виявлено круто занурений відбиваючий горизонт відразу під поверхнею Мохо, щонайменше до глибини 70 км. Він може представляти собою протерозойський шов між Сарматією і Волго-Уралом, які утворюють структуру зрощення платформи із зоною подальшого зсуву у верхній мантії.

(II) Під Паннонським басейном і Закарпатським прогином (профіль PANCAKE) відсутній мафічний шар у нижній корі. У Карпатах і Передкарпатському прогині не зафіксовано відбиття від підосви осадових порід, що свідчить про відсутність яскраво вираженого кристалічного фундаменту. На глибині близько 15 км інтерпретуються лінзи з низькою швидкістю. Мантіїні субгоризонтальні відбиваючі поверхні спостерігаються на глибинах 60-70 км в північно-східній і центральній частинах профілю під Східно-Європейським кратоном (СЕК). Натомість дві відбиваючі площадки у верхній мантії під Паннонським басейном виявлені на глибинах приблизно 45 і 75 км.

(III) Швидкісна модель профілю DOBRE-4 вказує на загальне занурення доюрського і докембрійського фундаментів СЕК в сторону Добруджі з уточненням положення кордону СЕК. Швидкісний розріз кори і прилеглої частини мантії дозволяє більш виразно говорити про геодинамічну модель формування південно-західної частини СЕК в ранньому докембрії з позиції тектоніки плит.

(IV) Швидкісна модель уздовж профілю DOBRE-5 дозволила виділити чотири характерні структурні одиниці земної кори в послідовності із заходу на схід. У Передобруджінському прогині глибина до Мохо складає 38-40 км, а у Каркінітському прогині вона зменшується в східному напрямку від 38 км до 33 км. Центральне Кримське Підняття має осадовий чохол, який залягає на гетерогенному фундаменті, потужність якого збільшується в східному напрямку від 10 до 20 км. Потужна кора (до 47 км) подібна за швидкісною будовою до платформної тришарової кори СЕК, може свідчити про те, що Скіфська плита сформована з кори докембрійського кратону. Індоло-Кубанська западина на Керченському півострові має потужний осадовий чохол до 10 км глибини з низькошвидкісними осадовими породами.

Практичне значення отриманих результатів. Робота значно доповнює сучасні уявлення про будову земної кори та верхньої мантії території України.

Швидкісні характеристики літосферних структурних блоків, шарів, що їх складають, зон контактів та зрощування окремих одиниць дають нову інформацію про умови утворення, деформації та історії розвитку як окремих тектонічних структур, так і всього регіону загалом. Якість оцінки прогностичних запасів вуглеводнів залежить від повноти знань про геологічне середовище, його глибинну будову і геодинамічні процеси, які привели до його сучасного стану. Чітке знання умов розвитку осадових басейнів, переробки та деформації шарів, яка відображена у зміні швидкостей проходження сейсмічних коливань, дозволяє виділяти ділянки, що є перспективними в нафтогазоносному плані та обґрунтовано планувати відповідні детальні пошукові роботи. Швидкісні характеристики кристалічних порід у приповерхневих шарах, особливо в районі Українського щита, де на ряді профілів визначені крім поздовжніх швидкостей ще й поперечні, чи їх відношення дозволяють прогнозувати мінеральний склад та спрямовувати пошукові роботи для розвитку мінерально-сировинної бази країни.

Особистий внесок здобувача. Автор брав безпосередню участь в усіх ширококутних сейсмічних дослідженнях, які проводилися на Україні за останні 20 років, починаючи з польових робіт і первинної обробки отриманих даних, та закінчуючи геологічною інтерпретацією результативних моделей. Всі ці роботи виконувалися у співробітництві з закордонними партнерами з геофізичних установ Польщі, Данії, Фінляндії та багатьох інших.

Основні наукові результати, що представлені в дисертаційній роботі, одержані автором особисто і опубліковані в фахових геофізичних журналах в Україні та за кордоном. За темою дисертації автором опублікована 21 стаття, загальним обсягом 296 сторінок.

Опубліковані результати моделювання та його геологічне тлумачення сейсмічного експерименту за профілем EUROBRIDGE'97 в роботах: [Thybo et al., 2003; Grad et al., 2006; Bogdanova et al., 2006], автором виконано розрахунок швидкісної моделі та опис швидкісної моделі. В роботах [Лисинчук та ін., 2002; Лысинчук и др., 2002; Град и др., 2003], присвячених дослідженням південно-східного регіону України, автору належить аналіз вихідного хвильового поля, ідентифікація типів хвиль, розрахунок синтетичних сейсмограм та їх порівняння зі спостереженими на профілі DOBRE-99. За матеріалами другого профілю DOBRE-2 опублікована робота [Starostenko et al., 2016], в якій автор виконав аналіз вихідного хвильового поля, ідентифікацію типів хвиль, розрахунок синтетичних сейсмограм та їх порівняння зі спостереженими на профілі. У статтях [Старостенко та ін., 2009; Старостенко та ін., 2011; Starostenko et al., 2013a,б; Starostenko et al., 2015], присвячених інтерпретації матеріалів за профілями PANCAKE, DOBRE-4 та DOBRE-5 автору належить аналіз вихідного хвильового поля, ідентифікація типів хвиль, підбір моделі на основі трасування сейсмічних променів розрахунок синтетичних сейсмограм та їх порівняння зі спостереженими. Матеріали профілю DOBRE-4 опубліковані в роботах [Janik et al., 2016; Старостенко и др., 2017a,б], де автор виконав підбір моделі на основі трасування сейсмічних променів та інверсії часів вступів та аналіз складної будови поверхні Мохо і причин утворення складок літосферного масштабу в підшві земної кори. Застосуванню моделювання у переінтерпретації даних глибинних сейсмічних досліджень попередніх років,

присвячені роботи [Калюжная и др., 2007; Козленко и др., 2009а; Козленко и др., 2009б; Козленко и др., 2013; Коломиец и др., 2013], де автором були розраховані швидкісні моделі та запропонована методика переінтерпретації сейсмічних даних минулих років.

Апробація результатів дисертації. Результати, отримані на різних етапах роботи, були представлені на:

- «Геоінформатика. Теоретичні та прикладні аспекти», Київ-2009; 2011.
- The 15-th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and Their Margins “Seismix 2012”, Beijing, China;
- The 33rd General Assembly of the European Seismological Commission, (GA ESC 2012), Moscow-Obninsk, Russia;
- EGU General Assembly 2013, Vienna, Austria;
- 16TH SEISMIX International Symposium, 2014, Castelldefels, Barcelona, Spain;
- Final symposium «Evolution of the Black Sea to Central Asia Tethyan Realm since the Late Paleozoic», Paris, France, 2014.
- 17th International Seismix Symposium, Macdonald Aviemore Resort, Aviemore, Scotland, 15-20 May 2016
- EGU General Assembly 2017, Vienna, Austria.

Публікації. Основні результати опубліковані в 33 наукових працях: у 21 статті (у тому числі 11 увійшли у базу SCOPUS, h -index=6) і 12-ти тезах доповідей на міжнародних конференціях.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з переліку умовних скорочень і символів, вступу, п'яти розділів, висновків і списку використаних джерел, що включає 366 найменувань. Робота містить 374 сторінки машинописного тексту та 107 рисунків, 5 таблиць, 1 додаток.

Подяка. Дисертація виконана в Інституті геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України. Автор дисертаційної роботи висловлює подяку науковому консультанту – академіку НАН України, доктору фіз. – мат. наук, професору Віталію Івановичу Старостенку за допомогу у постановці задачі, поради, наукові консультації та всебічну підтримку при виконанні роботи. Здобувач висловлює подяку зав.відділом регіональних проблем геофізики, канд. геол.-мін. наук Віктору Даниловичу Омельченку за всебічне сприяння в роботі та поради у підготовці дисертації, закордонним партнерам: Т. Янику, П. Срьоді, В. Шубі, М. Граду (всі з Польщі) за плідну співпрацю, усім співробітникам Інституту геофізики та іноземним колегам, які брали участь в польових експериментах методом ШГСЗ вздовж ряду профілів DOBRE та EUROBRIDGE та в інтерпретації даних і підготовці наукових статей.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У «**Вступі**» наведено загальну характеристику дисертаційної роботи: показана актуальність вибраної теми досліджень та суть наукової проблеми, сформульовано мету роботи, задачі, які треба було вирішити, та методи досліджень, зв'язок роботи з науковими темами Інституту, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У **Розділі 1 «ГЛИБИННА БУДОВА ЛІТОСФЕРИ УКРАЇНИ ЗА ДАНИМИ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ СЕЙСМІЧНИМИ МЕТОДАМИ»**

представлено докладну інформацію про регіональну геологічну будову літосфери України та сейсмогеологічні умови проведення ширококутних сейсмічних зондувань та вивченість районів робіт вздовж чотирьох регіональних профілів, які були відпрацьовані в Україні з 1997 по 2011 роки. Профіль EUROBRIDGE'97 [Thybo et al., 2003], який має суб-меридіанальний напрямок, перетинає Карматію - великий сегмент земної кори Східно-Європейського кратона (СЕК) [Bogdanova et al., 1996; Степанюк и др., 1999]. Профіль проходить через Український щит і девонський Прип'ятський прогин, через палеопротерозойський Волинський блок і Коростенський плутон та архейський Подільський блок [Щербак и др., 1989, Скобелев и др., 1991]. Північний кінець лінії профілю знаходиться в межах (приблизно 2.0 млрд.років) Осніцьк-Мікашевичського магматичного поясу, де перетинає Прип'ятський прогин, який є частиною великого фанерозойського Прип'ять-Дніпровсько-Донецького палеорифту [Айзберг и др., 1987; Гарецкий, Клушин, 1989; Кушнір и др., 1996; Juhlin et al., 1996; Stephenson et al., 2001] (рис. 1).

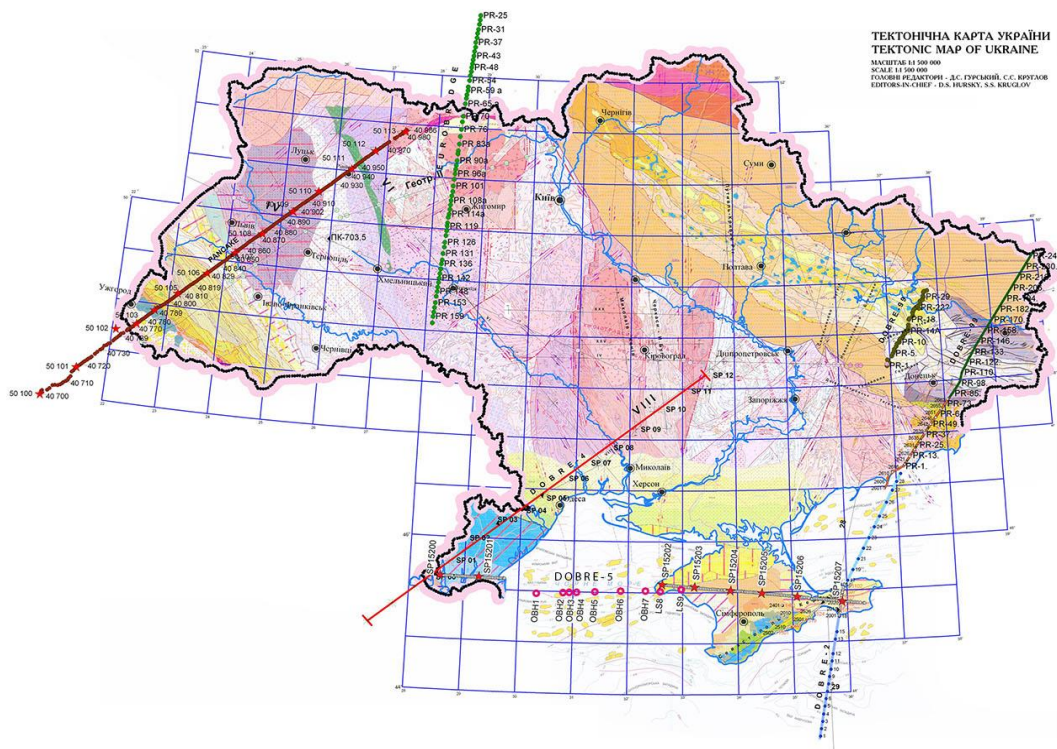


Рис.1. Положення ширококутних профілів, що були відпрацьовані в період 1997-2011 роки, на оглядовій тектонічній карті України [Гурский, Круглов, 2004].

Профіль PANCAKE [Starostenko et al., 2013a; Коломієць, 2015] (рис. 1) був відпрацьований в західній частині України, проходить в напрямку з північного сходу на південний захід через Рівненську, Львівську, Закарпатську області та виходить на територію Угорщини. Профіль перетинає південно-східну частину СЕК, гори Карпати, мікроплиту Алькапа, Середньо-Угорську тектонічну зону та мікроплиту Тиса-Дакія. Дані тектонічні структури мають різне геологічне походження, геодинамічну історію та відрізняються характером структури і будови як земної кори, так і верхньої мантії. Відповідно до геологічної шкали, їх вік походження визначається від архею до четвертинного. [Семененко, 1972; Завьялов и др., 1966; Глушко 1994; Хаин, Леонов, 1998; Csontos, Nagymarosy, 1998; Гурский,

Круглов, 2004; Cloetingh et al., 2004; Kovács et al., 2012].

Профіль DOBRE-4 [Starostenko et al., 2013b; Коломієць, 2015] (рис. 1) проходить уздовж північно-західного узбережжя Чорного моря. У південно-західній частині він проходить через Нижнєпрутський виступ, який представляє собою поховану ділянку альпійсько-герцинського складчастого поясу Північної Добруджі, що розташована на сході від місця нульової відмітки. Далі на північний схід профіль перетинає Переддобруджінський прогин, який належить до західного сегменту Скіфської плити. Далі за профілем розташована Південноукраїнська монокліналь, що містить відклади від пізнього протерозою до палеозою, а на південному заході Східно-Європейської платформи осадовий чохол складений породами крейдяного-неогенового віку [Тектоническая..., 2007]. Ще далі на північний схід профіль досягає територію Українського щита, де протерозойські і архейські кристалічні породи виходять на денну поверхню. Профіль закінчується поблизу Кривого Рогу на Українському щиті.

Профіль DOBRE-5 [Starostenko et al., 2015; Фарфуляк, 2016] (рис. 1) проходить у субширотному напрямку зі сходу на захід через молоду Скіфську плиту, яка розташована між південним краєм ССК на півночі і альпійсько-середземноморським орогенним поясом на півдні. Структурний і геодинамічний розвиток літосфери регіону пов'язується з венд-фанерозойським етапом активації південної частини кратону і еволюцією палео-, мезо- і неотетису [Круглов & Цыпко, 1988; Никишин и др., 1998, 2001, 2011; Saintot et al., 2006; Seghedi, 2001, 2012]. Основними тектонічними одиницями у досліджуваному регіоні є Переддобруджінський прогин і Скіфська плита, яка має складчастий гетерогенний фундамент. Остання територіально розміщена на шельфі Чорного моря, Кримському півострові, та обмежена з південного сходу Кримськими горами, що являють собою частину орогенного поясу Крим - Великий Кавказ, Азовським морем, а з півночі - південним схилом архейсько-нижньпротерозойського ССК. На півдні Скіфської плити знаходиться глибоководна частини Чорного моря, яка складається з двох суб-басейнів з тонкою високошвидкісною суб-океанічною корою або витонченою континентальною корою з глибиною Мохо 20-23 км [Starostenko et al., 2004; Yegorova et al., 2010, 2013].

Перші три профілі виходять на Український щит, який покритий порівняно густою сіткою профілів ГСЗ, результати яких опубліковано в роботах [Соллогуб и др., 1988; Ильченко, 1987; Чекунов и др., 1992 та ін.]. Поруч з розглянутими профілями були проведені дослідження EUROBRIDGE'96, лінія якого перетинає EUROBRIDGE'97 на північному краю, VRANCEA2001 [Hauser et al., 2007], який наближається до східних кінців DOBRE-4 та DOBRE-5. На захід від PANCAKE розташована серія експериментів CELEBRATION 2000 [Guterch et al., 2001; Guterch et al., 2007]. У Прип'ятському прогині відпрацьовані сейсмічні профілі СГТ III і VIII [Каратаев и др., 1993], у Паннонському басейні кілька профілів СГТ та КМЗХ, були відпрацьовані в 1980-х роках [Пошгай, 1988; Posgay et al., 1995; Csontos et al., 1998], профіль СГТ, [Бородулин, Байсарович, 1992] проходить паралельно поблизу DOBRE-4. Ряд профілів у Чорному та Азовському морях переінтерпретовані [Yegorova et al., 2010; Баранова и др., 2011], та геотраверси IV і XXIV [Grad and Tripolsky, 1995], швидкісні моделі для яких розраховані з допомогою трасування

променів.

Таким чином, починаючи з 1997 року нові масштабні сейсмічні дослідження літосфери України були проведені на території, яка гарно вивчена геофізичними методами в попередні роки. Завдяки новій цифровій записуючій апаратурі і сучасним комп'ютерним засобам обробки та інтерпретації сейсмічних даних, це дало можливість зосередити увагу на спірних ділянках і спрямувати дослідження на уточнення будови відомих масштабних структурних одиниць земної кори, структури контактів та зчленування великих террейнів та перехідних шовних зон в зв'язку з перспективами нафтогазоносності та вмісту корисних копалин.

У Розділі 2 «МЕТОДИ ПОБУДОВИ ШВИДКІСНИХ МОДЕЛЕЙ СЕРЕДОВИЩА, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ ПРИ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ДАНИХ У ШИРОКОКУТНИХ СЕЙСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ» показано розвиток основних алгоритмів та програмних засобів для інтерпретації даних у ширококутних сейсмічних зондувань за відбитими та заломленими хвилями. Інтерпретація результатів досліджень, що розглядаються в даній роботі, головним чином здійснюється на основі побудови моделі розподілу сейсмічних швидкостей вздовж досліджуваного глибинного розрізу, для чого застосовуються різні підходи та методичні прийоми [Zelt et al., 1988; Grad et al., 2003; Janik et al., 2016]. В даному розділі розглянуто та запропоновано ряд комп'ютерних програмних засобів для розрахунку чи підбору моделі розподілу швидкісних характеристик вздовж глибинного розрізу. Найбільш широко вживаним є алгоритм прямого моделювання (вирішення прямої задачі сейсміки) для трасування променів, в якому розраховується теоретичний відгук латерально неоднорідного середовища, що багаторазово порівнюється зі спостереженими даними, доки модель розподілу швидкості, для якої побудовані результати прямої задачі, не забезпечить відповідність між обчисленою і спостереженою реакцією [Červený & Pšenčík, 1984; Zelt & Smith 1992]. Основним недоліком такого підходу є дуже великі затрати часу при ручному підборі моделі, та дещо суб'єктивний підхід кожного інтерпретатора в оцінці якості збігу розрахункових і спостережених годографів та визначенні типів зафіксованих сейсмічних хвиль. На відміну від обмежень прямого моделювання, узагальнена лінійна інверсія може забезпечити оцінки невизначеності параметрів, дозвільної здатності і неоднозначності, а також гарантувати, що локальний мінімум певної норми досягається [Hole, 1992; Zelt, Barton, 1998; Hobro et al., 2003].

На основі викладених вище даних було показано, що для успішної інтерпретації даних ширококутних сейсмічних зондувань, необхідні наступні методичні прийоми та комп'ютерні програми: спочатку проводиться аналіз хвильового поля та створюється система годографів, які ув'язуються у взаємних точках; далі проводиться інверсія часів пробігу сейсмічних хвиль та визначається початковий варіант швидкісної моделі будови земної кори; потім вирішується пряма задача з використанням променевого моделювання, модель розраховується методом підбору при покроковому зменшенні розбіжностей між спостереженими та розрахованими годографами; на останньому етапі розраховуються синтетичні сейсмограми [Kostyukevych et al., 2008, 2010], і за мірою їх наближення до зафіксованого хвильового поля робиться висновки про достовірність отриманої швидкісної моделі, або необхідність подальшого її вдосконалення.

У Розділі 3 «ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ ШИРОКОКУТНИХ ГЛИБИННИХ СЕЙСМІЧНИХ ЗОНДУВАНЬ ТА ЇХ ОБРОБКА» представлені експериментальні дані у вигляді сейсмограм спільного пункту вибуху для наземних досліджень та сейсмограм спільної точки приймання для морських. Польові роботи за методикою ширококутних глибинних сейсмічних зондувань проводились в основному в Україні та частково в сусідніх країнах: Білорусі та Угорщині.

Результатом польових робіт стали сейсмограми, в яких з допомогою сейсмічних наземних станцій були записані вимушені коливання, що згенеровані наземними хімічними вибухами та морськими глибинними бомбами. Цифровий безперервний запис кожної сейсмічної станції був переведений із внутрішнього RAW формату у стандартний формат збереження сейсмічної інформації SEG-Y. Відповідно до точних часів проведення вибухів із безперервного багатогодинного запису були вибрані заданої довжини проміжки, які і склали сейсмограми спільного пункту вибуху для наземних робіт і спільної точки приймання – для морських. Сейсмограми профілю EUROBRIDGE'97 сформовані в геофізичному центрі GFZ-Potsdam. Вся інша комп'ютерна обробка даних, в тому числі: первинна обробка польових матеріалів та одержання зведених монтажів сейсмограм для трьох профілів із серії проектів «DOBRE», математична обробка сейсмічних записів всіх чотирьох профілів з метою підвищення співвідношення сигнал-завада, редукція часу і візуалізація матеріалів виконувалися безпосередньо автором.

Під час проекту EUROBRIDGE'97 уздовж 530-кілометрового профілю субмеридіонального простирання на ССК були зібрані сейсмічні дані високої якості, інтерпретація яких дозволила побудувати швидкісні структурні моделі за поздовжніми та поперечними хвилями (рис. 2). Профіль простягається від Прип'ятського прогину в магматичному поясі Осніцьк-Мікашевичі, через Коростенський плутон і Волинський блок в Подільський блок Українського щита. Сейсмічна енергія, що згенерована з 18 пунктів хімічних вибухів, середня відстань між якими складала близько 30 км уздовж профілю, була записана на 120 мобільних трикомпонентних сейсмографах на двох розгортаннях. Фактичний матеріал за профілем EUROBRIDGE'97 склав 18 сейсмограм спільного пункту вибуху, на яких були зафіксовані різні типи сейсмічних хвиль. Сейсмічні фази були пропіковані, часи вступу та відстані джерело-приймач були внесені в систему спостережених годографів зафіксованих сейсмічних хвиль і ув'язані у взаємних точках на зустрічних гілках осей синфазності. Систему годографів склали: заломлені в осадових шарах фази поздовжніх P_{sed} та поперечних S_{sed} хвиль; заломлені у верхній корі фази поздовжніх P_g та поперечних S_g хвиль; заломлені у верхній мантії фази поздовжніх P_n та поперечних S_n хвиль; відбиті фази у корі поздовжніх P_cP та поперечних ScS хвиль; відбиті фаза від поверхні Мохо поздовжніх P_mP та поперечних SmS хвиль; відбита фаза від похилого мантійного горизонту. Надалі вони використовувалися для інтерпретації та розрахунку швидкісної моделі.

Профіль PANCAKE починається у Східній Угорщині, звідки пролягає в північно-східному напрямку через Карпати у Західній Україні і виходить на Український щит у південно-західній окраїні ССК. Збір сейсмічних даних на профілі PANCAKE проходив у жовтні 2008 року.

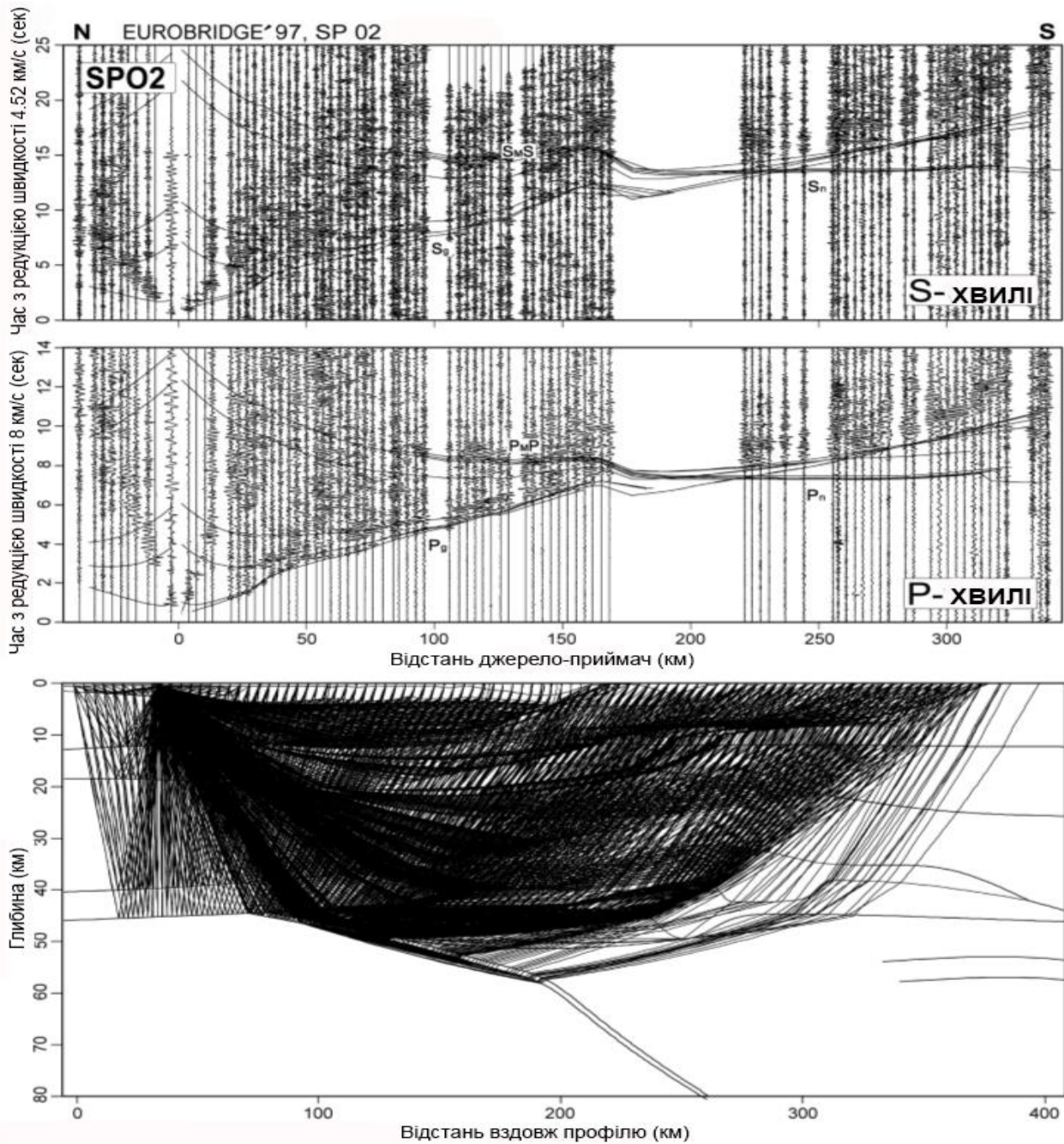


Рис. 2. Приклад амплітудно-нормалізованих сейсмічних записів вертикальної компоненти зі смуговим фільтром 1-8 Гц для пункту вибуху SP02 на профілі EUROBRIDGE'97 зі вступами P- і S-хвиль та накладеними розрахунковими годографами. На верхній діаграмі швидкість редуції 4.52 км/с, вирізаний часовий проміжок, на якому вступають тільки поперечні хвилі. На середній діаграмі швидкість редуції 8.0 км/с, вирізаний часовий проміжок, на якому вступають тільки поздовжні хвилі. На нижній діаграмі показано хід променів через модель.

Впродовж польового експерименту було відпрацьовано 14 хімічних вибухів. Відстань між пунктами вибуху, які знаходилися на лінії профілю, коливались в межах від 35 до 50 км один від одного. На території Угорщини були відпрацьовані 3 перші пункти вибуху, в Україні - останні 11. Запис вимушених сейсмічних коливань, що були згенеровані впродовж хімічних вибухів, проводився з допомогою 261 цифрової сейсмічної станції, які були обладнані

однокомпонентними сейсмоприймачами. Відстань між точками спостереження складала приблизно 2.5 км. Фактичний матеріал за профілем PANCAKE склали 14 сейсмограм спільного пункту вибуху по 261 сейсмічній трасі в кожній. У хвиловому полі були виявлені сейсмічні фази заломлених в осадових шарах хвиль P_{sed} та відбиттів P_{cP} , що утворювалися у верхній частині розрізу; найсильнішим з відбитих хвиль є відбиття від границі Мохо PMP ; на великих виносках спостережені відбиті від границь у верхній мантії хвилі $P1P$; у деяких сейсмограмах присутні закритичні відбиття від границі Мохо $PovP$, які можуть накладатися в часі на більш глибокі заломлені фази рефрагованих хвиль у верхній мантії Pn ; заломлені у верхній та середній корі поперечних хвиль Sg та відбиті від границі Мохо SMS мають гірше співвідношення сигнал-завада в порівнянні з поздовжніми і виділяються набагато складніше, а їх вступи, як правило, закриті кодами поздовжніх хвиль.

Польові роботи за профілем DOBRE-4 проводилися на початку жовтня 2009 року. Були відпрацьовані 13 пунктів вибуху через кожні 30-50 км. Вироблені вибухами сейсмічні коливання були зареєстровані з допомогою 230 сейсмічних записуючих станцій, які розміщувалися вздовж лінії профілю приблизно через кожні 2.5 км. Довжина профілю DOBRE-4 складала приблизно 500 км. Він починається на українсько-румунському кордоні на річці Дунай поблизу м. Рені та продовжується у північно-східному напрямку через Чорноморську прибережну рівнину, мінає місто Одеса в 30 км на північний захід і закінчується трохи не доходячи до м. Кривий Ріг. Починаючи з південного заходу на північний схід, профіль перетинає такі структурні елементи: Нижнєпрутський виступ Північної Добруджі, Преддобруджінський прогин, Південноукраїнську монокліналь, південний схил Українського щита, Криворізько-Кременчуцьку зону розломів на щиті.

Фактичний матеріал за профілем DOBRE-4 склали 13 сейсмограм спільного пункту вибуху. Кількість трас в кожній сейсмограмі складала біля 225 ± 5 в залежності від кількості відбракованих та видалених записів. У хвиловому полі, яке було зареєстровано на профілі DOBRE-4, були виділені, прокорельовані та визначені координати і часи вступів всіх основних інформативних сейсмічних хвиль, що утворились під час вибухів. Заломлені і відбиті фази поздовжніх та поперечних хвиль вказують на складні умови їх утворення і розповсюдження з заломленням та відбиттям. Особливо це проявилось у хвилях, які пов'язані з границею Мохо, що пояснюється її надзвичайно складною будовою вздовж профілю.

Виділені в сейсмічних записах DOBRE-4 хвилі були ідентифіковані та ув'язані у взаємних точках на зустрічних гілках та внесені у систему годографів. В неї увійшли: заломлені хвилі у верхніх щільних шарах осадових відкладів P_{sed} ; заломлені хвилі у верхній та середній кристалічній корі Pg та у верхній мантії Pn ; на декількох пунктах вибуху були зафіксовані хвилі, що розповсюджувалися в мантії P_{mantle} ; відбиті від границь всередині кори хвилі P_{cP} ; відбиті від границі Мохо хвилі PMP ; відбиті від мантійних границь зміни швидкості хвилі $P1P$ та $P2P$; заломлені у верхній та середній корі хвилі Sg ; відбиті від границі Мохо хвилі SMS . Слід відмітити, що так само як і для даних профілю PANCAKE, вступи поперечних

хвиль виділяються набагато складніше і менш впевнено, ніж вступі поздовжніх хвиль. Початок поперечних хвиль часто закритий кодами завад, чи глибоких поздовжніх хвиль, а співвідношення сигнал-завада значно менше на часах вступу поперечних хвиль.

Польові роботи на профілі ширококутних глибинних сейсмічних зондувань DOBRE-5 були відпрацьовані в жовтні 2011 року. В якості джерела сейсмічної енергії були використані вісім хімічних вибухів на суходолі. Реєстрація вимушених коливань вздовж профілю виконувалася з допомогою 203 цифрових сейсмічних станцій TEXAN. Записане хвильове поле дозволило виділити та ідентифікувати корисні сейсмічні хвилі та побудувати систему зустрічних і наздоганяючих годографів. На ділянці Переддобруджі відстань між пунктами вибуху становила близько 60 км, а на території Криму вибухи проводились через 50 – 60 км. Цифрові записуючі сейсмічні станції були розташовані вздовж лінії профілю через приблизно кожні 2.5 км. У Переддобруджі запис виконувався на 48 станціях, а в Криму на 155. Зміна якості одержаних сейсмограм обумовлена різницею у локальних сейсмогеологічних умовах як для збудження, так і прийому коливань, а також величиною маси заряду, який закладався для виконання кожного окремого вибуху.

Фактичний матеріал за профілем DOBRE-5 склали 8 сейсмограм спільного пункту вибуху. Кількість трас в кожній сейсмограмі складала біля 200, що трохи менше загальної кількості станцій, бо декілька з них не спрацювали в штатному режимі. У результативний файл сейсмічних даних автором були додані ще дві сейсмограми спільної точки приймання, які були записані донними гідрофонами на морській ділянці профілю 26 і зберігались у вигляді друкованих діаграм. Вони були оцифровані і переведені в формат збереження сейсмічних даних SEG-Y. Обидві сейсмограми морської ділянки мають по 92 траси, які рознесені вздовж профілю на 1.5 – 2.0 км і покривають дистанцію у приблизно 180 км.

Зареєстровані сейсмічні фази були ідентифіковані та пропіковані (прокорельовані) за записами восьми нових наземних пунктів вибуху та двох донних станцій, часи вступу та дистанції джерело-приймач були занесені в систему спостережених годографів для виділених сейсмічних хвиль, які в подальшому були ув'язані у взаємних точках осей синфазності на зустрічних гілках.

У спостереженому хвильовому полі представлені наступні сейсмічні фази, які зареєстровані у перших вступях: заломлені хвилі у осадових шарах P_{sed} ; заломлені хвилі, що утворилися у верхній та середній кристалічній корі P_g ; заломлені хвилі відразу нижче границі Мохо у верхній мантії P_n . У повторних вступях були зареєстровані наступні відбиті хвилі: відбиття від границь у верхній та середній земній корі P_cP ; відбиття від підшови земної кори PMP . Надалі годографи всіх зафіксованих у хвильовому полі DOBRE-5 сейсмічних хвиль використовувалися для прямого та оберненого моделювання і побудови швидкісної моделі.

Таким чином, весь фактичний матеріал, який був сформований у вигляді наборів сейсмограм для кожного з досліджуваних профілів, та підготовлений для подальшої інтерпретації за безпосередньої участі автора, став основою для розрахунку швидкісних моделей за різними алгоритмами та програмами та розрахунку синтетичних сейсмограм як на основі променевого підходу, так і

повного хвильового поля, що буде обговорено у наступному розділі.

У Розділі 4 «ІНТЕРПРЕТАЦІЯ СЕЙСМІЧНИХ ДАНИХ НА ОСНОВІ РОЗРАХУНКУ ШВИДКІСНИХ МОДЕЛЕЙ ТА СИНТЕТИЧНИХ СЕЙСМОГРАМ» виконано розрахунки швидкісних моделей глибинних розрізів з використанням ряду загальноновживаних програмних комплексів сейсмічного моделювання, які базуються на різних алгоритмах і використовують принципово відмінні підходи у вирішенні як прямої, так і оберненої задачі сейсміки. Застосування декількох програм побудови моделі на одних і тих самих сейсмічних даних дало можливість отримати ряд варіантів рішення, що в свою чергу, дозволило дослідити можливості, переваги та обмеження, які важливо знати для застосування в різних геотектонічних умовах. Збіг основних характеристик моделі, що отримані в різних програмах, також є вагомим фактором, що засвідчує достовірність одержаних результатів.

Програми, які були використані для моделювання, відрізнялися способами параметризації моделі та кількістю і типом даних, що використовуються для моделювання, згладжування результату і т.д. Існують два основних підходи для подібного моделювання. У першому з них, спочатку вирішується пряма задача, коли для заданої вихідної моделі розраховується час проходження хвилі від джерела до приймача; після чого модель модернізується таким чином, щоб поліпшити збіг теоретичних та спостережених часів приходу досліджуваних сейсмічних хвиль. Ці дві процедури: розрахунок теоретичних часів вступу; і редакція моделі для зменшення часових розбіжностей у вступі, повторюються в ітераційному режимі. Такий підхід дозволяє проведення перевірки та вдосконалення кореляції зафіксованих корисних хвиль за сейсмічними даними. Другий підхід, який реалізує інверсію часів вступу заломлених та відбитих часів вступу сейсмічних хвиль, набагато більш автоматизований. Інверсія годографів заломлених та відбитих хвиль представляє собою порівняно простий і швидкий інструмент для отримання загального розподілу швидкісних характеристик вздовж досліджуваного розрізу. Вона передбачає вирішення оберненої задачі сейсміки шляхом мінімізації розбіжностей між спостереженими та розрахунковими часами пробігу сейсмічних хвиль в земній корі та верхній мантії. Комп'ютерні програми, що використовують алгоритм інверсії, дають хороший результат у розрахунках швидкісної моделі за позовжніми хвилями. Отримана на основі інверсії швидкісна модель може розглядатися і як кінцевий результат, придатний для геологічної інтерпретації вирахованих швидкісних неоднорідностей, і як перше наближення моделі для подальших досліджень і вдосконалення з використанням променевого трасування методом підбору розрахункових та спостережених годографів. Програми прямого променевого моделювання, такі як SEIS83 [Červený & Pšenčík, 1984] та RAYINVR [Zelt & Smith 1992], в більшості випадків залишаються основним інструментом розрахунку кінцевих результативних швидкісних моделей. Вони дозволяють побудувати сейсмічні промені і відповідні теоретичні часи пробігу хвилі від пункту збудження до приймачів для моделі із заданими швидкісними характеристиками в шарах, та геометрією границь зміни швидкості, які ці шари розділяють. Швидкісна модель при цьому покроково змінюється таким чином, щоб зменшити розбіжності між розрахунковими та спостереженими

годографами.

У даному розділі роботи представлені варіанти швидкісних моделей за чотирма регіональними ширококутними сейсмічними профілями, які отримані з використанням трьох різних програм, що базуються на алгоритмі томографічної інверсії перших вступів. Всі три програми були використані в інтерпретації сейсмічних даних профілю EUROBRIDGE'97, а програма FAST [Zelt and Barton, 1998] застосовувалася і в розрахунках градієнтної швидкісної моделі за матеріалами профілю DOBRE-4.

Три томографічні швидкісні моделі профілю EUROBRIDGE'97 демонструють схожу загальну структуру розрізу. Різниця проявляється у деталях, розмір яких наближається до роздільної здатності методу. Розбіжності в першу чергу обумовлені відмінностями в процесах розрахунків і алгоритмах регуляризації результатів. Також впливають різні варіанти вибору критеріїв для припинення процедури модернізації швидкісної моделі. Даний параметр суттєво впливає на величину залишкової різниці між спостереженням і розрахунковим часом пробігу хвиль. В наших дослідженнях вони були 120 для ProMax, 89 мсек для INVR [Hole, 1992] і 96 мсек для FAST. Треба підкреслити, що дрібні деталі в ізолініях швидкісних контурів, які присутні на всіх трьох запропонованих моделях, знаходяться нижче дозвільної здатності моделі, що забезпечується системою спостережень. Порівняти якість і точність запропонованих інверсійних моделей досить важко. Алгоритм моделювання у кожній з випробуваних програм був унікальним, до того ж в процесі інверсії були використані різні фази сейсмічних коливань. В програмах FAST і RAYINVR рефраговані хвилі в земній корі P_g використовувалися на першому етапі інверсії, а для JIVE3D [Hobro, 1999; Hobro et al., 2003], весь набір зареєстрованих годографів, які були ідентифіковані у хвильовому полі, використовувався в розрахунку моделі одночасно на кожній з ітерацій. Для всіх отриманих моделей були розраховані статистичні характеристики відповідності теоретичних часів вступу спостереженому хвильовому полю, такі як, середньоквадратичне відхилення між спостереженими і теоретичними часами вступу хвиль RMS, параметр χ^2 , який є мірою відповідності розбіжності у часах пробігу і точності фіксації часових відміток, процент залучення фактичних даних в успішні розрахунки променів і таке ін. Ці параметри дають можливість порівняти формальні результати підгонки розрахункових та спостережених даних, що були використані для інверсії. В той же час, статистичні параметри показують наскільки точно синтетичні дані збігаються зі спостереженими, наприклад, за часом пробігу хвиль, а не те, наскільки запропонована розрахункова швидкісна модель відрізняється від реального геологічного розрізу. Алгоритм томографічних методів інверсії, який направлений на автоматичну мінімізацію розбіжностей і, таким чином, покращення статистичних характеристик результативної моделі, дає кращий збіг спостережених та розрахункових годографів, особливо для заломлених у мантиї хвиль P_n . В той же час, методи інверсії або не дозволяють використовувати повний набір зафіксованих даних, або ж використання певних типів годографів потребує додаткових зусиль інтерпретатора і часу розрахунків, що може невілювати всі переваги такого рішення проблеми побудови швидкісної моделі. В цьому плані пряме променеве

моделювання з допомогою програми SEIS83 має найкращі універсальні можливості для того, щоб використовувати повний набір даних для розрахунку швидкісної моделі.

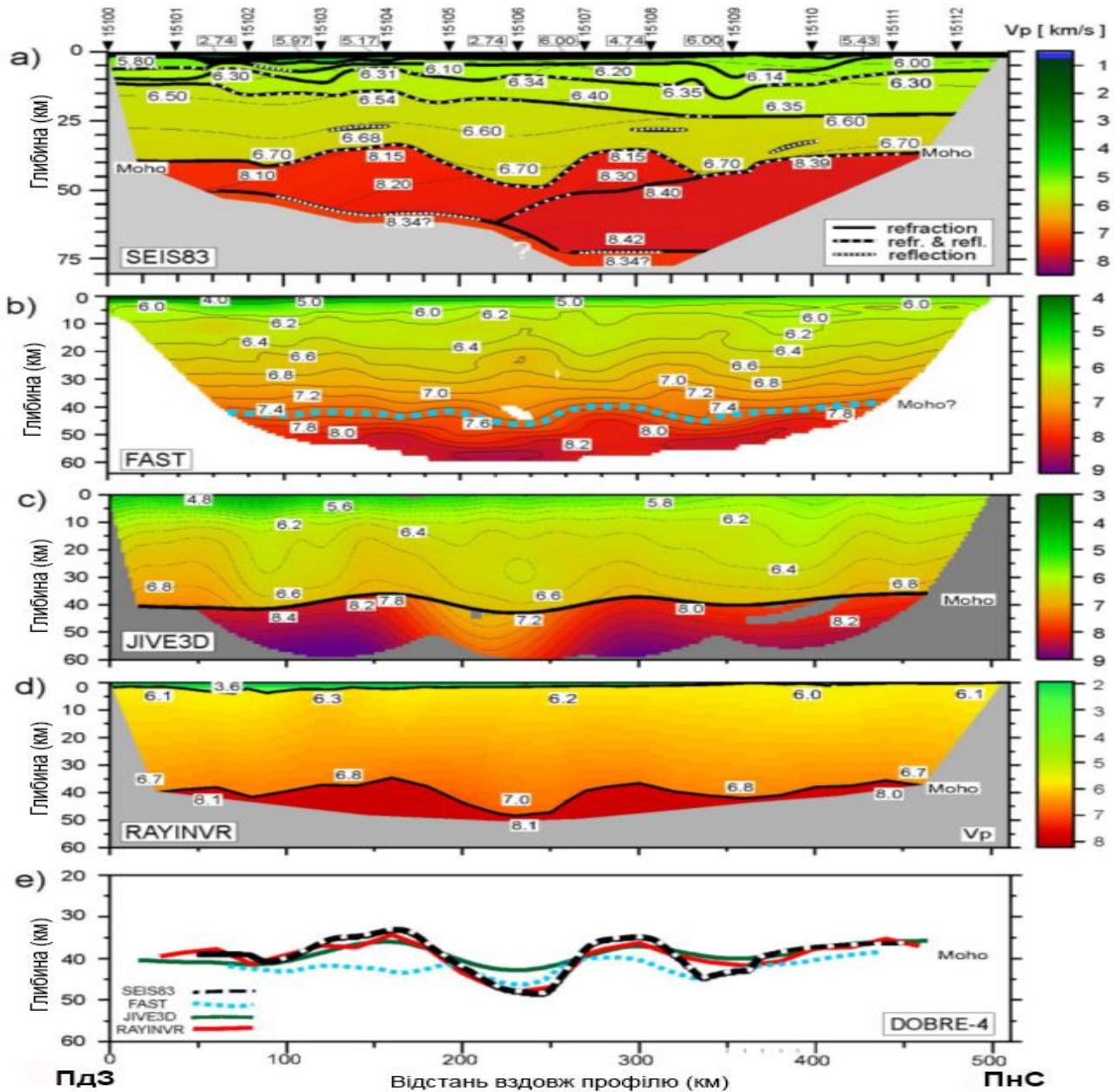


Рис. 3. Порівняння двовірних сейсмічних швидкісних моделей, що побудовані за профілем DOBRE-4: (a) SEIS83 - моделювання трасування променів, з використанням методу проб та помилок; (b) томографічна інверсія за програмою FAST; (c) томографічна інверсія за програмою JIVE3D; (d) томографічна інверсія за програмою RAYINVR; (e) Порівняння положення та геометрії границі Мохо, що побудовані з використанням різних програмних комплексів.

На профілі DOBRE-4 було зареєстровано дуже складне хвильове поле, в якому деякі фази коливань взагалі було важко ідентифікувати з першого разу, наприклад, відбиття від границі Мохо, годограф якого мав форму петлі, гілки якої накладалися одна на іншу. Проблема ідентифікації виділених сейсмічних фаз може завадити успішній побудові швидкісної моделі у будь-якому сейсмічному моделюванні, як променевому, так і на основі інверсії, бо адекватна інтерпретація

неможлива без правильної ідентифікації сейсмічних хвиль. У випадку хвильового поля на профілі DOBRE-4 трасування променів і інверсії проводились у декілька "ітерацій" для встановлення відповідності між фазами сейсмічних хвиль і елементами моделі, на яких ці хвилі утворювалися. Для цього використовувалося саме пряме променеве моделювання, яке дозволяє перевірити відповідність спостережених і розрахункових годографів, а не тільки часів вступу хвилі. Вже після ідентифікації типу хвилі і місця її утворення, що підтверджено на основі трасування променів, годографи використовувалися для проведення інверсії (рис. 3).

Ще одним складним питанням в інтерпретації даних профілю DOBRE-4 було трасування променів заломленої хвилі у верхній мантиї. З огляду наявності глибоких западин у поверхні підшви земної кори, в мантиї відразу під Мохо утворювалися значні тіньові зони, які унеможлилювали трасування заломлених хвиль через ці ділянки моделі. Для подолання цих труднощів застосовувалися два підходи: перший полягав у звичайному трасуванні променів у тих місцях, де це було можливо; другий підхід базувався на розрахунку повного хвильового поля, який забезпечував можливість подолання обмежень променевого моделювання. Подібні проблеми проявилися і в результатах інверсійного моделювання, коли тіньові зони для заломленої у верхній мантиї хвилі, істотно знизили кількість застосованих для інверсії спостережених даних, через неможливість побудувати шлях сейсмічних променів від точки збудження до точки реєстрації.

Істотна мінливість глибини границі Мохо за профілем DOBRE-4 проявилася у результатах моделювання всіх програм інтерпретації сейсмічних даних, які були використані для досліджень. Проте, результати пакетів SEIS83 і RAYINVR збігаються найкраще (рис. 3a,d). Моделювання поведінки границі Мохо з допомогою пакету FAST (рис. 3b) є проблематичним з двох причин: по-перше, формат моделі не дозволяє визначити шари та розриви швидкості на їх границях, а тільки зони підвищеного градієнта швидкості, який імітує саму границю; по-друге, інформація про поверхню Мохо базується тільки на використанні заломленої відразу під Мохо заломленої хвилі P_n , тоді як відбиті фази, що є найбільш інформативні для відтворення топографії Мохо, не використовуються. Програма інверсії годографів заломлених і відбитих хвиль LIVE3D, на наш погляд, дозволила побудувати задовільну проміжну модель (рис. 3c), яка має переваги перед варіантом FAST, але поступається результатам прямого променевого моделювання.

На складних сейсмічних матеріалах профілю було продемонстровано, що не всі програмні засоби можуть розшифрувати подвійні РмР фази з перекриттям гілок годографів, які були зафіксовані на сейсмічних розрізах. Така можливість запрограмована в пакетах SEIS83 та RAYINVR, які дають можливість змоделювати промені сейсмічних хвиль і часи прибуття для відбитих фаз, що перекриваються. Проте, це стосується лише прямої задачі, а на етапі інверсії, в ситуації, коли два чи три вступу відбиття від однієї і тієї ж границі зафіксовані у різні відмітки часу для однакових виносів джерело-приймач, для обчислення інверсії використовується тільки перші за часом відмітки, а всі інші ігноруються. Перекриття годографів в програмі LIVE3D також не допускається, що знижує її ефективність в моделюванні таких складних хвильових полів.

Основним інструментом для розрахунку глибинної швидкісної моделі розрізу для всіх чотирьох профілів, за якими проведені дослідження, був метод проб і помилок в прямому променевому моделюванні, яке виконувалося на основі програмного пакету SEIS83. Вхідні початкові швидкісні моделі були побудовані на основі даних інверсії часів пробігу заломлених та відбитих хвиль, чи на результатах попередніх геофізичних досліджень в районі експериментів, наприклад, сейсмічних рефлекційних профілів СГТ та неглибоких досліджень за заломленими хвилями, також даних дослідження свердловин, за якими визначалися швидкості поздовжніх сейсмічних хвиль. Врахування додаткових поверхневих даних забезпечує зменшення впливу помилок у визначенні швидкостей у верхній частині розрізу і, таким чином, покращує результати глибинної інтерпретації ширококутних сейсмічних даних. Моделювання самої верхньої структури у швидкісній моделі визначається найближчими до пункту збудження заломленими сейсмічними хвилями. За ними підбирається швидкість у верхньому шарі моделі. Після її узгодження починалося моделювання хвиль, які пройшли на більш глибокі рівні. Така послідовність, в якій за заломленими фазами визначалася швидкість у досліджуваному шарі, після чого за відбитими фазами моделювалася потужність шару, дозволила розрахувати всю швидкісну модель, рухаючись від однієї поверхні розділу вниз до іншої. Таким чином, у наступному за глибиною шарі спочатку визначають швидкість за заломленою у ньому хвилею, а потім, за часом пробігу відбитої хвилі і відомою швидкістю її просування, визначають форму підошви та потужність поточного досліджуваного шару. Необхідні зміни в модельні швидкості та глибини границь вносилися на основі порівняння розрахункового і спостереженого часу пробігу сейсмічних хвиль, в намаганні зменшити розбіжності. Такі дії виконувалися в ітеративному режимі до тих пір, доки не вдавалося мінімізувати розбіжності для кожної сейсмічної фази, що була задіяна у розрахунках швидкісної моделі. Моделювання також включало розрахунок синтетичних сейсмограм для якісного порівняння амплітуд спостережених і синтетичних даних. Це забезпечувало додаткові обмеження на величину градієнту швидкості в кожному шарі і амплітуду скачка швидкості на границях розриву швидкості між шарами. Прийнятними вважалися розбіжності між спостереженими та розрахунковими параметрами 0.1 секунди за часом і 30% за амплітудою.

Роздільна здатність кінцевих швидкісних моделей була протестована шляхом внесення похибок у швидкості поздовжніх хвиль, наприклад, в фундаменті ± 0.1 км/с, і в визначену потужність земної кори в межах ± 2 км. Результати цих тестів показали, що точність наших моделей є кращою, ніж значення похибок, які застосовувалися впродовж тестових випробувань.

Розрахунок синтетичних сейсмограм повного хвильового поля виконувався з допомогою програмного комплексу Tesseral2D [Костюкевич и др., 2000], який був успішно адаптований для великих моделей більше 600 км довжини за профілем і до 80 км глибини. Це дозволило провести розрахунок синтетичних сейсмограм для складних швидкісних моделей великих розмірів і дослідити глибинну будову не тільки земної кори, а і верхньої мантиї включно. Модельні результати повного хвильового поля дозволяють простежити проходження як поздовжніх, так і поперечних сейсмічних хвиль через швидкісну модель і побачити заломлення

хвиль у градієнтних шарах та відбиття на границях розриву швидкості [Коломієць, 2015]. Це допомагає точно визначити природу хвиль, які зареєстровані в реальному хвильовому полі, і служить надійним інструментом у правильній ідентифікації виділених годографів, що забезпечує їх вірну інтерпретацію. Також розрахунок повного хвильового поля дає можливість порівняти спостережені сейсмічні записи з розрахованими синтетичними сейсмограмами і зробити висновки про якість побудованої швидкісної моделі і степінь її відповідності зареєстрованим сейсмічним даним.

У Розділі 5 «РЕЗУЛЬТАТИВНІ ШВИДКІСНІ МОДЕЛІ БУДОВИ ЛІТОСФЕРИ ТА ЇХ ГЕОЛОГІЧНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ЗА ДАНИМИ ЧОТИРЬОХ РЕГІОНАЛЬНИХ ПРОФІЛІВ ШИРОКОКУТНОГО ГЛИБИННОГО СЕЙСМІЧНОГО ЗОНДУВАННЯ» представлені кінцеві швидкісні моделі, що розраховані за запропонованою методикою, та результати інтерпретації відповідних швидкісних глибинних розрізів. Під час проекту EUROBRIDGE'97 уздовж 530-кілометрового профілю меридіонального простирання в Східно-Європейському кратоні були зібрані сейсмічні дані високої якості, інтерпретація яких дозволила побудувати швидкісні структурні моделі за поздовжніми та поперечними хвилями. Профіль простягається від Прип'ятського прогину в магматичному поясі Осніцьк-Мікашевичі, через Коростенський плутон і Волинський блок в Подільській блок Українського щита. Сейсмічна енергія, що згенерована з 18 пунктів хімічних вибухів, середня відстань між якими складала близько 30 км уздовж профілю, була записана на 120 мобільних трикомпонентних сейсмографах у двох розгортаннях. Дані були проінтерпретовані за допомогою трьох різних програм томографічної сейсмічної інверсії часів перших вступів поздовжніх хвиль та програми двовимірного трасування променів. Для моделювання були використані годографи прямих заломлених та відбитих поздовжніх та поперечних хвиль. Також були розраховані синтетичні сейсмограми, за якими оцінювалася відповідність динамічних характеристик вступів Р-хвиль. Моделі швидкості сейсмічних Р-хвиль (рис. 4а,б) і співвідношення V_p/V_s свідчать про ряд особливостей земної кори і верхньої мантії за профілем, які будуть перераховані нижче.

Існують виражені відмінності в структурі швидкісної моделі між трьома основними блоками земної кори, що перетинаються профілем. Ці блоки пов'язані з палеопротерозойським об'єднанням кори за рахунок зрощення террейнів з архейським ядром. Отже, тектонічна структура і композиційні відмінності збереглися протягом приблизно 1.8 млрд. років.

Як свідчать дані сейсмічного розрізу СГТ при реєстрації відбитих хвиль з близьким до вертикального падінням, контрастні зміни в сейсмічних швидкостях перетинають занурений мантійний рефлекс, визначений за хвилями з широким кутом падіння. Це вказує на те, що структура сейсмічної швидкості змінилася після утворення кори, хоча виражені контрасти в сейсмічній швидкості також збереглися на кордонах террейнів.

Коростенський плутон інтерпретується у вигляді високошвидкісної аномалії на глибину не менше 15 км, а не 6 км (рис. 4а), як вважалося раніше. Вірогідно, плутон в верхній корі об'єднаний з високошвидкісною аномалією в нижній земній

корі. Відношення V_p/V_s є вищим за середнє значення, що свідчить про основний композиційний склад вміщуючих порід з мафічним тілом, яке утворилося з мантийних розплавів з внеском габброїдних мас з нижньої земної кори.

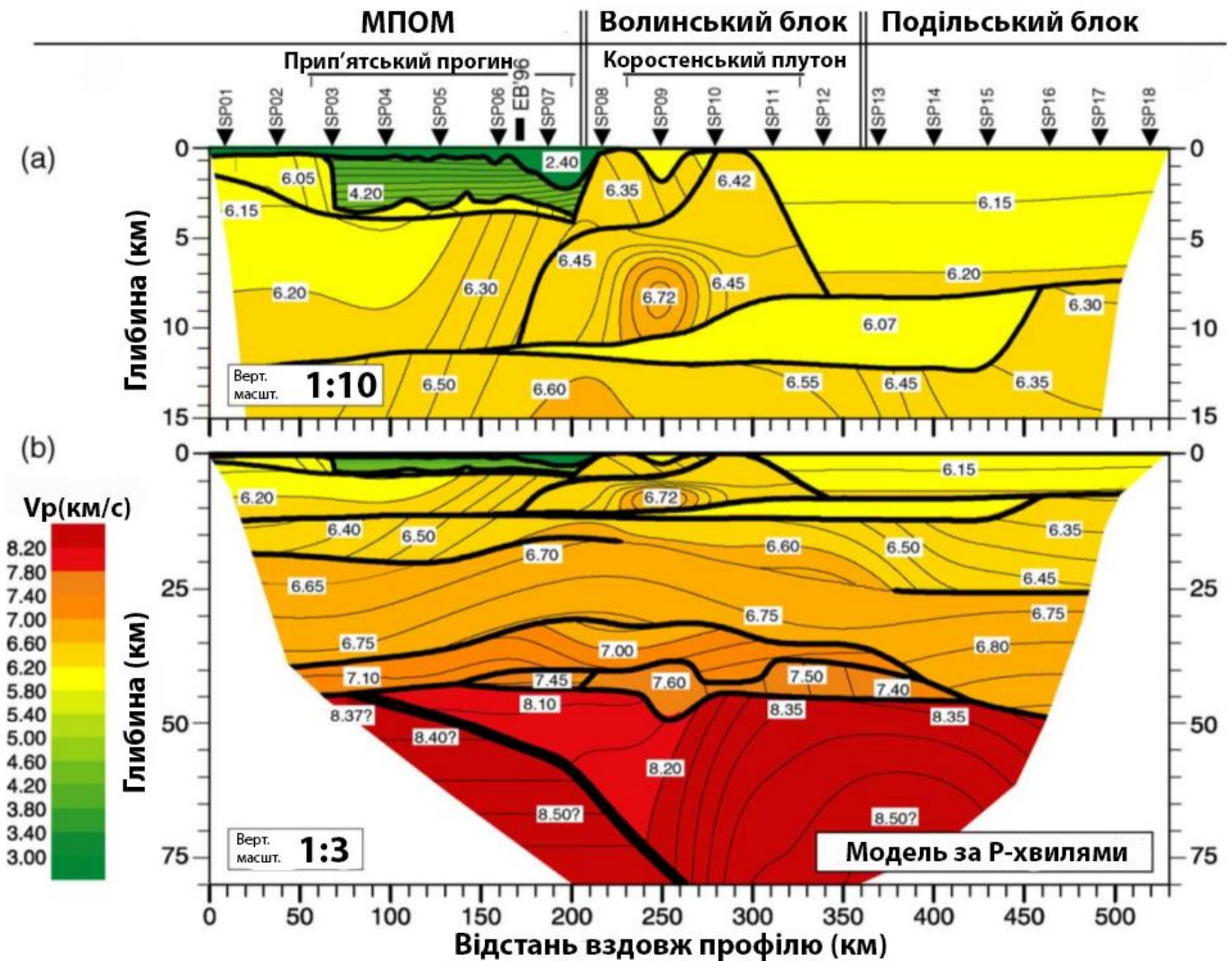


Рис. 4. Двомірний швидкісний профіль поздовжніх сейсмічних хвиль за профілем EUROBRIDGE'97: (a) деталізована верхня частина швидкісної моделі земної кори; (b) повна модель літосфери.

На Українському щиті змодельована типова швидкісна структура кратону, однак, з відносно низькими швидкостями поздовжніх сейсмічних хвиль і дуже малими коефіцієнтами відношення V_p/V_s (рис. 4b).

Північна частина магматичного поясу Осніцьк-Мікашевичі характеризується типовою структурою розподілу сейсмічної швидкості для Балтійсько-Білоруської частини Східно-Європейського кратону, тобто типовою структурою для платформи, яка підстелена особливим тонким шаром з дуже високою швидкістю.

Прип'ятський прогин представлено у вигляді типового рифтового осадового басейну. Під прогином границя Мохо в основному має форму плоскої поверхні, що свідчить про вплив тільки процесів розширення від верхньої до середньої кори, наприклад, шляхом розтягування реологічно сильної літосфери, або, як альтернативна можливість, що процеси магматичного андерплейтінгу маскували витончення земної кори (рис. 4a).

Мантийні породи відразу під поверхнею Мохо мають дуже високі сейсмічні

швидкості уздовж більшої частини профілю, за винятком поясу над зануреним мантийним відбивачем, ширина якого складає приблизно 200-км (рис. 4b).

Дослідження методом ШГСЗ вздовж профілю PANCAKE довжиною 650 км висвітлюють будову земної кори через Транс-Європейську шовну зону (ТЄШЗ). Швидкісна модель дозволяє розділити структуру земної кори в межах профілю PANCAKE на три окремих блоки: південно-західний, де розташований Паннонський басейн та Закарпатський прогин; центральний, який включає гори Карпати і Прикарпатський прогин; північно-східний, де перетинається південно-західна окраїна СЕК.

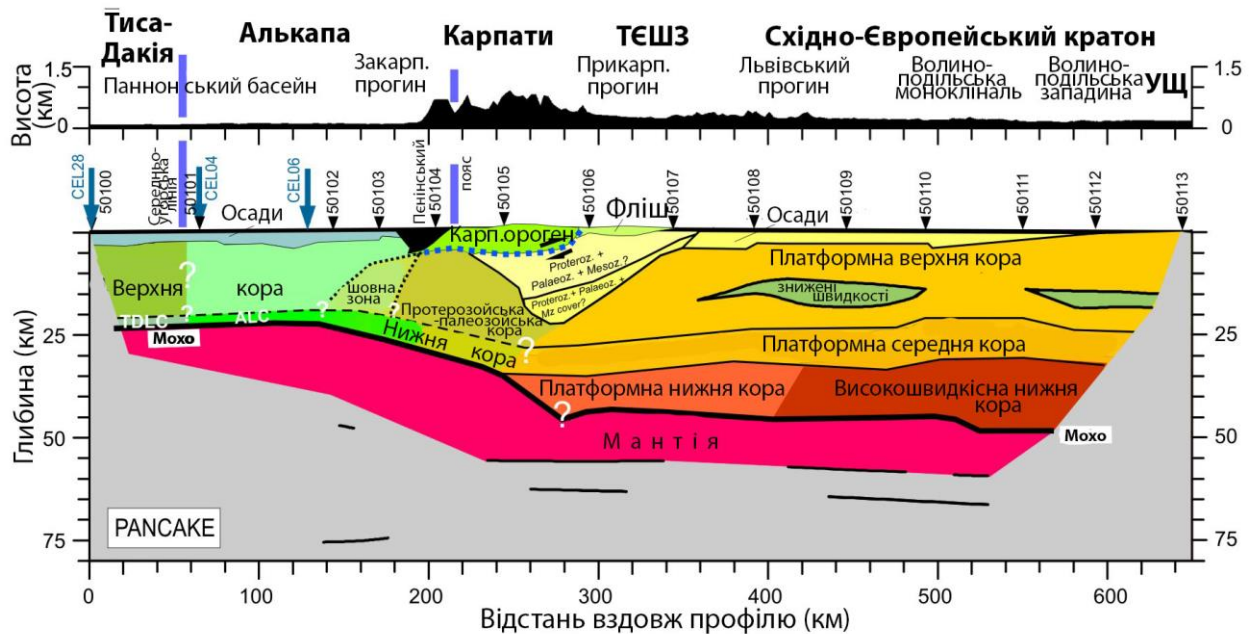


Рис. 5. Тектонічна інтерпретація швидкісної моделі профілю PANCAKE.

Потужність земної кори в межах Паннонського басейну порівняно невелика і складає від 20 до 25 км разом з приблизно від 2 до 5 км пачкою осадових порід, які залягають на низькошвидкісному фундаменті, де поздовжні хвилі розповсюджуються зі швидкістю близько 6.07 км/с нижче Паннонського басейну і 6,24 км/с в районі Закарпатського прогину. На цій ділянці відсутній мафічний шар у нижній корі, а швидкість у верхній мантиї становить близько 8.0 км/с. Карпати і Прикарпатський прогин, де потужність осадового покриву перевищує 20 км і включає приблизно 8 км флішових порід, які залягають на більш древніх метаосадових утвореннях потужністю до 12 км. Відбиття від підосви осадового шару не зафіксовано, що свідчить про відсутність яскраво вираженого кристалічного фундаменту, поверхня Мохо заглиблюється з 22 до 45 км в напрямку СЕК. Північно-східна частина профілю, яка розташована в межах СЕК, має типову для кратону тришарову земну кору з майже постійною потужністю, що не перевищує 48 км (рис. 5). Її швидкісна структура в значній мірі однорідна, а границі зміни швидкості залягають субгоризонтально. На глибині приблизно 15 км інтерпретуються лінзи з низькою швидкістю. Високі швидкості у нижній корі, які складають від 7.2 до 7.4 км/с, в районі Українського щита можуть бути пояснені магматичними інтрузіями. Високі швидкості у верхній мантиї (8.3 км/с) відповідають типовим характеристикам платформних районів. В мантиї СЕК на

глибинах 60-70 км були змодельовані субгоризонтальні відбиваючі границі, які тягнуться з центральної у північно-східну частину профілю. Ще два відбиваючих майданчика у верхній мантії були задокументовані під Паннонським басейном на глибинах приблизно 45 і 75 км (рис. 5).

У Південно-Східній частині України було проведено масштабний ширококутний сейсмічний експеримент DOBRE-4 з метою вивчення глибинної будови земної кори і верхньої мантії. Висока якість сейсмічних даних дозволила змодельовати структури Нижньпрутського підняття (НПП) в Північній Добруджі, Переддобруджінського прогину (ПДП), Південно-Української монокліналі (ПдУМ), південного схилу Українського щита і його відкритої частини.

Швидкісна модель профілю DOBRE-4 (рис. 3а) включає в себе осадові шари зі швидкістю $V_p \approx 2.6-4.7$ км/сек, представлені теригенно-глинистими і вапняними утвореннями ордовік-юрського віку. Вони присутні по всьому НПП, ПДП і ПдУМ.

Фундамент під НПП складається з одного шару зі швидкістю $V_p \approx 5.8$ км/сек, що відрізняється від ПДП, де присутні два шари зі швидкостями $V_p = 5.10-5.15$ км/сек і $V_p \leq 6.0$ км/сек, відповідно. Кордон між ПДП і ПдУМ було виділено в зв'язку зі складною клявіше-подібною структурою фундаменту ПДП, де амплітуда вертикальних зсувів сусідніх блоків досягає 1 км.

Швидкісний розріз показує загальне занурення доюрського і докембрійського фундаментів СЕК в сторону Добруджі з двома важливими особливостями: 1) різка V-подібна западина зі швидкістю поздовжніх хвиль в межах від 2.30 до 5.80 км/с між SP15101 і SP15102, яка відповідає зоні розломів СЕК і дає можливість уточнити положення її кордону; 2) дуже схоже різке занурення між SP15108 +30 км і SP15110 зі швидкістю поздовжніх хвиль, що змінюється від 5.43 до 6.14 км/с, яке відповідає осьовій зоні міжрегіонального тектонічного шва Херсон-Смоленськ.

За сейсмічними даним було виявлено два прогини границі Мохо літосферного масштабу. Перший з них знаходиться між SP15108 і SP15109. Товщина земної кори тут досягає 45 км. Швидкість в низах кори $V_p \approx 6.7$ км/с різко змінюється на поверхні Мохо до $V_p \approx 8.4$ км/с у верхній мантії. Цей прогин Мохо, що пов'язаний з Херсон-Смоленською шовною зоною, був виявлений даними роботами вперше. Даний прогин має інший характер, ніж прогин, що представлений на Геотраверсі VIII і на самому профілі DOBRE-4 між SP15105 SP15106, де товщина кори становить 57 км, а швидкості в мантії - близько 8.2 км/с (рис. 3а).

Прогин мантії між SP15105 SP15106 відповідає Голованівській шовній зоні. Аналогічний прогин встановлений на геотраверсах IV і VIII під Інгuleцько - Криворізькою шовною зоною. Обидва ці прогини Мохо в результаті розтягування літосфери зрушені по відношенню до відповідних шовних зон, які простежуються на поверхні. Відстань між Голованівською та Інгuleцько - Криворізькою шовними зонами становить 70 км на поверхні і 150 км на рівні Мохо. Така різниця в величині розтягування верхньої частини літосфери на двох рівнях, що відрізняються за глибиною всього на 40-50 км, вказує на різну реологію верхньої і нижньої кори в докембрії. Аттачмент, що розділяє верхню і нижню частини кори з різною реологією, фіксується в швидкісному розрізі на глибині 13-22 км (рис. 3а).

Швидкісний розріз кори і прилеглої частини мантії DOBRE -4 дозволяє більш

виразно говорити про геодинамічну модель формування південно-західної частини ССК в ранньому докембрії з позиції тектоніки плит [Старостенко и др., 2017а,б].

Швидкісна модель уздовж субширотного сейсмічного профілю DOBRE-5 (рис. 6), який був відпрацьований за ширококутною методикою реєстрації заломлених та відбитих сейсмічних хвиль, забезпечує нові дані про будову земної кори Скіфської плити, яка оточена на півночі докембрійським Східно-Європейським кратоном і Кримсько-Кавказьким складчастим поясом з Чорноморським басейном на півдні. Відповідно до будови швидкісного розрізу було виділено чотири характерні структурні одиниці земної кори в послідовності із заходу на схід, які можуть бути розділені розломами: Передобруджінський прогин; морська частина Каркінітського прогину на Одеському шельфі Чорного моря; берегові області Центрального Кримського підняття на Кримській низовині Кримського півострова; Індоло-Кубанська западина на Керченському півострові.

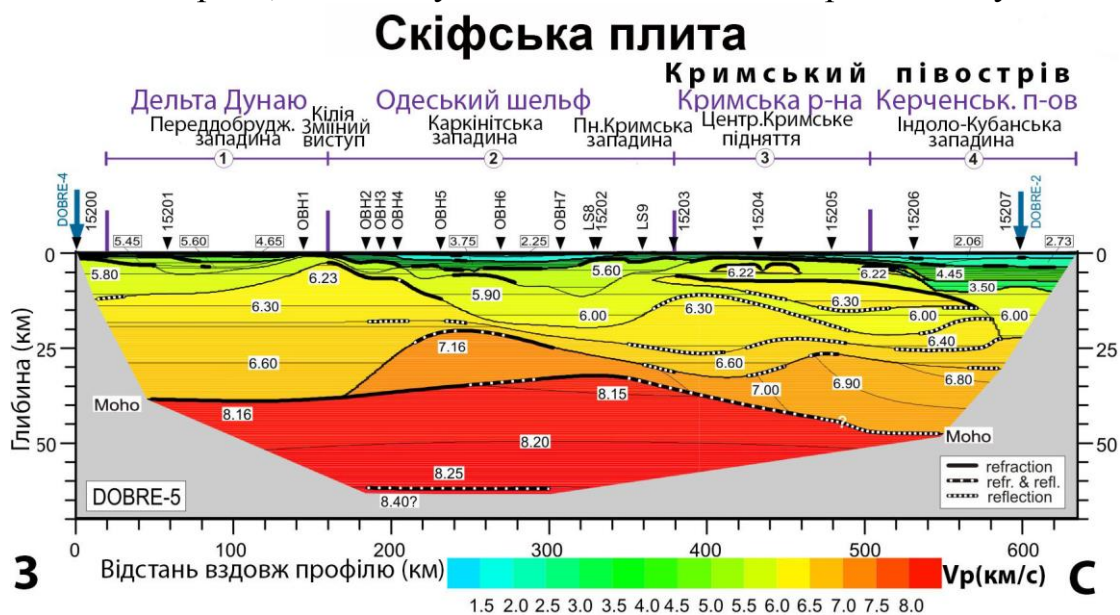


Рис. 6. Двовірна швидкісна модель профілю DOBRE-5 за позовжніми хвилями (за матеріалами роботи [Starostenko et al., 2015], використана в дисертації [Фарфуляк. 2016]).

Передобруджінський прогин має потужний 10-12 км осадовий чохол, який містить у собі товстий шар 8-10 км зі швидкостями позовжніх хвиль $V_p \sim 5.7-5.8$ км/с. У двошаровій кристалічній корі даного структурного елемента відсутня нижня кора. Будова кори вказує на її відмінність від кори ССК. Такий тип земної кори схожий на кору ТЄШЗ і кору варійської Західної Європи. В той же час, потужність кори дещо більша, а глибина до Мохо складає 38-40 км.

Морська частина Каркінітського прогину на Одеському шельфі Чорного моря має осадовий чохол потужністю 6-11 км, в якому 4 км складають породи з низькими швидкостями позовжніх хвиль 2.0-4.0 км/с. Далі на схід потужність осадових порід збільшується за рахунок збільшення високошвидкісних відкладів зі швидкостями 5.6-5.7 км/с від 2 км до 7 км на західному узбережжі Криму. Верхня кора має потужність 12 км, а середня - приблизно 3-5 км. Глибина до поверхні Мохо зменшується в східному напрямку від 38 км до 33 км. Високошвидкісна нижня кора має максимальну потужність приблизно 10 км в західній частині

прогину. Природа високошвидкісного тіла в нижній корі пояснюється мафічним магматизмом з розплавленням або інтрузіями під час крейдового рифтогенезу, який відбувався одночасно з вулканічною активністю в Каркінітському прогині. Перехід між морським Каркінітським прогином і береговим Центрально Кримським підняттям виражений субмеридіональним Західного Кримським розломом, що розділяє регіони, які підпали під дію крейдового розширення/рифтогенезу на Одеському шельфі і компресійної тектоніки в Криму.

Центральне Кримське підняття має осадовий чохол, потужність якого складає приблизно 2-4 км, а швидкість поздовжніх хвиль - 2.7-3.0 км/с. Чохол залягає на гетерогенному фундаменті, потужність якого збільшується в східному напрямку від 10 до 20 км. У верхній корі виявлено три високошвидкісні тіла зі швидкостями поздовжніх хвиль 6.22-6.30 км/с. Потужність верхнього шару земної кори складає 8-16 км. Гетерогенний фундамент був утворений під час варійського, кimmerійського і альпійського тектогенезу. Він складений гранітними інтрузіями, які відбулися під час варійського складкоутворення. Потужна кора (до 47 км) подібна за швидкісною будовою до платформної тришарової кори ССК, що може свідчити про те, що СП сформована на корі докембрійського кратону (ССК).

Індоло-Кубанська западина на Керченському півострові має потужний осадовий чохол до 10 км глибини з низькошвидкісними осадовими породами. Потужність верхньої кори за швидкісною моделлю складає 12 км. Починаючи з глибини нижче приблизно 25 км в даному експерименті відсутні дані про швидкісні характеристики розрізу, хоча за даними профілю 28, який перетинає DOBRE-5, можна стверджувати, що кора на цій ділянці може бути перероблена платформна кора ССК.

ВИСНОВКИ

Виконана автором робота забезпечила отримання глибинної будови літосфери України на основі швидкісних моделей, які розраховані за даними ширококутних глибинних сейсмічних зондувань вздовж регіональних профілів, виділення шарів та масштабних блоків в земній корі, які різняться за швидкісними параметрами та перспективами нафтогазоносності і вмістом мінеральних корисних копалин. Впродовж 1997 — 2011 років при безпосередній участі автора зібрані нові унікальні експериментальні дані вздовж чотирьох регіональних сейсмічних ширококутних профілів на території України: EUROBRIDGE'97 — 530 км завдовжки, 18 пунктів вибуху через приблизно 30 км, спостереження через 3-4 км; PANKACE — 645 км завдовжки, 14 пунктів вибуху через 30-50 км, спостереження через 2.5 км; DOBRE-4 - 500 км завдовжки, 13 пунктів вибуху через приблизно 35-50 км, спостереження через 2.5 км; DOBRE-5 630 км завдовжки, 8 пунктів вибуху в наземній частині через приблизно 50 км, спостереження через 2.5 км. Одержані нові експериментальні дані, обробка та інтерпретація яких забезпечила отримання глибинних швидкісних моделей вздовж регіональних профілів, дозволили вивчити будови земної кори та верхньої мантиї і геодинамічну історію розвитку глобальних тектонічних структурних одиниць на території України.

Автором вперше створена база даних у стандартному сейсмічному форматі SEG-Y, в якій збережені польові записи всіх вибухів, траси зібрані в сейсмограми спільного пункту вибуху для наземних експериментів та спільного пункту

приймання для морських. В подальшому ці дані послужили основою для розрахунку швидкісних моделей та синтетичних сейсмограм з використанням різних алгоритмів та комп'ютерних програм.

Інтерпретація даних глибинної сейсміки на основі ширококутних досліджень за відбитими та заломленими хвилями базується на розрахунку моделі розподілу швидкісних характеристик вздовж лінії профілю. В процесі розрахунку застосовувалися різноманітні підходи та методичні прийоми. Сам процес складався з багатьох етапів чи ітерацій, на виході з яких отримувались моделі для певних глибин чи типів сейсмічних хвиль. Ітерації були організовані у цикли зі зворотними зв'язками. Важливим етапом в інтерпретації даних ширококутних сейсмічних досліджень є аналіз хвильового поля та кореляція регулярних хвиль з наступним визначенням їх типу та природи, пікінгом вступів – фіксацією відстані джерело-приймач та часових відміток на зареєстрованих годографах. В роботі розглянуто ряд загальноновживаних комп'ютерних програмних комплексів, які забезпечують підбір чи розрахунок швидкісної моделі вздовж глибинного розрізу.

В роботі запропонована методика побудови швидкісної моделі, яка базується на комплексному використанні принципово різних алгоритмів та програм, разом з наступним розрахунком синтетичних сейсмограм та перевіркою їх відповідності спостереженому хвильовому полю. Розраховані швидкісні моделі чотирьох регіональних профілів, які висвітлюють будову земної кори та верхньої мантії вздовж ліній досліджень на території України. Робота удосконалює сучасні уявлення про будову земної кори та верхньої мантії території України. Швидкісні характеристики літосферних структурних блоків, шарів, що їх складають, зон контактів та зрощування окремих одиниць дають нову інформацію про умови утворення, деформації та історії розвитку як окремих тектонічних структур, так і всього регіону загалом. Інформація про умови розвитку осадових басейнів, переробку та деформацію шарів, яка відображена у змінах розподілу швидкісних характеристик, дозволяє виділяти ділянки розрізу, що є перспективними в нафтогазоносному плані та обґрунтовано планувати відповідні детальні пошукові роботи. Швидкісні характеристики кристалічних порід у верхніх шарах земної кори, особливо в районі Українського щита, де на глибинних розрізах визначені крім поздовжніх швидкостей ще й поперечні, чи коефіцієнт їх відношення V_p/V_s , дозволяють проводити прогнозування мінерального складу та направлення детальних пошукових робіт, які забезпечують розвиток мінерально-сировинної бази країни.

В інтерпретації ширококутних сейсмічних даних на сьогоднішній день найбільше використовуються алгоритми прямого моделювання для трасування променів. В роботі було запропоновано спочатку проводити аналіз хвильового поля та створювати систему ув'язаних у взаємних точках годографів, проводити інверсію часів пробігу сейсмічних хвиль та визначати початкову швидкісну модель будови земної кори, потім з допомогою променевого моделювання покроково зменшувати розбіжність між спостереженими та розрахованими годографами, а вже на фінальному етапі розраховувати синтетичні сейсмограми, і за мірою їх збігу із зафіксованим хвильовим полем робити висновки про достовірність отриманої швидкісної моделі.

Фундамент дисертаційної роботи склали сейсмічні дані чотирьох сучасних ширококутних профілів: EUROBRIDGE'97, PANKACE, DOBRE-4, DOBRE-5 та система годографів морського профілю 26 разом з двома оцифрованими автором сейсмограмами, що були записані донними станціями. З геологічної точки перші три профілі досліджують такі великі тектонічні структури, як Східно-Європейський кратон, розташовані в його межах Прип'ятський рифтовий прогин та Український щит, зону зчленування кратону з Карпатськими горами і Закарпатським прогином, та з Північною Добруджею. Останній четвертий профіль, який досліджував будову Скіфської платформи, проходив на півдні України через одеський шельф та Крим. Для всіх згаданих профілів розраховані моделі розподілу швидкісних характеристик поздовжніх хвиль, а де було можливим, зроблені розрахунки за поперечними хвилями і визначено розподіл поперечних швидкостей чи, як мінімум, відношення V_p/V_s . Крім того, автором була проведена переінтерпретація ряду профілів ГСЗ, які знаходяться поруч чи перетинаються з досліджуваними геотраверсами, що дозволило використати дані про розподіл швидкісних характеристик з розрахованих моделей для підготовки стартових моделей і розрахунків променевого трасування та інверсії вступів сейсмічних хвиль.

Використання різних алгоритмів та програм розрахунку швидкісних моделей дозволило оцінити достовірність отриманих результатів при принциповому збігу кінцевих моделей, а також визначити переваги та недоліки кожної з програм, які важливо знати для використання в різних геотектонічних умовах. Порівняння програмних пакетів сейсмічного моделювання виконано в різній мірі для кожного з профілів. Найбільш повний комплекс програм було випробувано для даних сейсмічного профілю DOBRE-4, де зафіксовані дуже незвичайні та своєрідні відбиті фази в хвильовому полі.

Головним інструментом для побудови швидкісної моделі розрізу для всіх чотирьох профілів був метод підбору на основі прямого променевого моделювання з використанням програмного комплексу SEIS83. Стартові вхідні швидкісні моделі були підготовлені за результатами інверсії часів пробігу заломлених та відбитих хвиль, чи на основі даних попередніх геофізичних досліджень, таких як СГТ, КМЗХ та даних про поздовжні сейсмічні швидкості зі свердловин. Врахування поверхневих даних дозволяє уникнути зайвих помилок у швидкісній моделі верхньої частини розрізу і, таким чином, покращує результати глибинної інтерпретації ширококутних сейсмічних даних. Швидкісні моделі будувалися пошарово, починаючи із самого верхнього і поступово заглиблюючись до самого нижнього у мантиї. Послідовність, в якій за заломленими хвилями розраховувалася швидкість у поточному шарі, після чого за відбитими фазами визначалася його потужність, дозволила розрахувати всю швидкісну модель. Необхідні зміни у швидкісних параметрах та геометрію границь вносилися після порівняння спостереженого і розрахункового часу пробігу сейсмічних хвиль, з метою зменшити розбіжності між ними. Такі дії виконувалися в ітеративному режимі до тих пір, доки не вдавалося мінімізувати розбіжності для кожної сейсмічної фази, що була задіяна у розрахунках швидкісної моделі. Повнохвильові синтетичні сейсмограми використовувалися для якісного порівняння амплітуд спостережених і синтетичних даних. За цими даними вводилися додаткові обмеження на величину

градієнту швидкості в кожному шарі і контраст швидкості на границях розриву між шарами. Прийнятними вважалися розбіжності між спостереженими та розрахунковими параметрами 0.1 секунди за часом і 30% за амплітудою.

Запропоновані швидкісні моделі чотирьох регіональних профілів, які висвітлюють будову літосфери вздовж ліній досліджень на території України. Швидкісні характеристики структурних блоків земної кори, шарів, що їх складають, зон зрощування та контактів окремих геологічних споруд дають нову інформацію про обставини утворення, деформації та історії розвитку як окремих геотектонічних структур, так і всього регіону загалом. Проведено структурний аналіз швидкісних моделей з виділенням осадових басейнів, які мають перспективи в нафтогазоносному плані та ділянок з близьким до поверхні заляганням кристалічних порід, де можуть міститися поклади мінеральних корисних копалин.

Дані профілю EUROBRIDGE'97 були проінтерпретовані з використанням двомірного моделювання часів пробігу сейсмічних хвиль з допомогою трьох різних програм томографічної інверсії і програми трасуванням променів. Висока якість даних дозволила провести моделювання швидкісного розрізу з використанням Р- і S-хвиль. Виявлені виражені відмінності в структурі сейсмічної швидкості земної кори і верхньої мантії між трьома основними тектонічними блоками, що перетинаються профілем: (I) Прип'ятський прогин, що є осадовим басейном з глибиною приблизно 4 км, який повністю знаходиться в магматичному поясі Осніцьк-Мікашевичі в північній частині профілю. Структура швидкісного розрізу є типовою для докембрійського кратону. (II) Волинський блок разом з Коростенським плутоном, глибина якого не менша 15 км, і нижньою земною корою характеризуються дуже високою швидкістю сейсмічних хвиль і високим співвідношенням V_p/V_s . (III) Подільський блок - за швидкостями близький до типової платформної структури, хоча він характеризується відносно низькою сейсмічною швидкістю і малим співвідношенням V_p/V_s . У мантії виявлено круто занурений відбиваючий горизонт відразу під поверхнею Мохо, щонайменше до глибини 70 км.

Швидкісна модель профілю PANCAKE також розділяється на три масштабні тектонічні одиниці: (I) Паннонський басейн і Закарпатський прогин, де потужність кори порівняно невелика і складає від 20 до 25 км разом з приблизно від 2 до 5 км пачкою осадових порід, які залягають на низькошвидкісному фундаменті, де поздовжні хвилі розповсюджуються зі швидкістю близько 6.07 км/с нижче Паннонського басейну і 6.24 км/с в районі Закарпатського прогину, відсутній мафічний шар у нижній корі, швидкість у верхній мантії становить близько 8.0 км/с; (II) Карпати і Прикарпатський прогин, де потужність осадового покриву перевищує 20 км і включає приблизно 8 км флішових порід, які залягають на більш древніх метаосадових утвореннях потужністю до 12 км. Відбиття від підосви осадового шару не зафіксовано, що свідчить про відсутність яскраво вираженого кристалічного фундаменту, поверхня Мохо заглиблюється з 22 до 45 км в напрямку ССК; (III) Північно-східна частина профілю, яка розташована в межах ССК, має типову для кратону тришарову земну кору з майже постійною потужністю, що не перевищує 48 км. Високі швидкості у нижній корі, які складають від 7.2 до 7.4 км/с, в районі Українського щита можуть бути пояснені магматичними інтрузіями.

Високі швидкості у верхній мантії (8.3 км/с) відповідають типовим характеристикам платформних районів. В мантії ССК на глибинах 60-70 км були змодельовані субгоризонтальні відбиваючі границі, які тягнуться з центральної у північно-східну частину профілю. Ще два відбиваючих майданчика у верхній мантії були задокументовані під Паннонським басейном на глибинах приблизно 45 і 75 км.

Швидкісна модель профілю DOBRE-4 включає в себе осадові шари зі швидкістю $V_p \approx 2.6 - 4.7$ км/сек, які представлені теригенно-глинистими і вапняними утвореннями ордовік-юрського віку. Фундамент під Нижнепрутським підняттям складається з одного шару зі швидкістю $V_p \approx 5.8$ км/с, у Переддобруджінській депресії присутні два шари зі швидкостями $V_p = 5.10-5.15$ км/с і $V_p \leq 6.0$ км/с. Швидкісний розріз показує загальне занурення доюрського і докембрійського фундаментів ССК в сторону Добруджі з двома важливими особливостями: 1) різка V-подібна западина на дистанції 60-90 км дає можливість уточнити положення кордону ССК; 2) дуже схоже різке занурення на дистанції 370-440 км відповідає осьовій зоні міжрегіонального тектонічного шва Херсон-Смоленськ. За сейсмічними даним було виявлено два прогини границі Мохо літосферного масштабу. Перший - на дистанції 200-250 км, де потужність кори досягає тут 47 км, пов'язується з Голованівською шовною зоною, а другий - на дистанції 330-370 км, з потужністю кори 45 км, пов'язується з тектонічним швом Херсон-Смоленськ. Останній був виявлений даними роботами вперше. Швидкість в низах кори $V_p \approx 6.7$ км/с різко змінюється на поверхні Мохо до $V_p \approx 8.4$ км/с у верхній мантії.

Швидкісна модель уздовж профілю DOBRE-5 дозволила виділити чотири характерні структурні одиниці земної кори в послідовності із заходу на схід: (I) Переддобруджінський прогин, що має потужний 10-12 км осадовий чохол зі швидкостями 5.7-5.8 км/с. У двошаровій кристалічній корі відсутня нижня кора, що відрізняє її від кори ССК. Глибина до Мохо складає 38-40 км. (II) Каркінітський прогин має осадовий чохол потужністю 6-11 км, в якому 4 км складають породи з низькими швидкостями 2.0-4.0 км/с. Далі на схід потужність осадових порід збільшується за рахунок високошвидкісних відкладів зі швидкостями 5.6-5.7 км/с від 2 км до 7 км на західному узбережжі Криму. Верхня кора має потужність 12 км, а середня - приблизно 3-5 км. Високошвидкісна нижня кора має максимальну потужність приблизно 10 км в західній частині прогину. Глибина до поверхні Мохо зменшується в східному напрямку від 38 км до 33 км. (III) Центральне Кримське Підняття має осадовий чохол, потужність якого складає приблизно 2-4 км, а швидкість - 2.7-3.0 км/с. Чохол залягає на гетерогенному фундаменті, потужність якого збільшується в східному напрямку від 10 до 20 км. У верхній корі виявлено три високошвидкісні тіла зі швидкостями поздовжніх хвиль 6.22-6.30 км/сек. Потужна кора (до 47 км) подібна за швидкісною будовою до платформної тришарової кори ССК. (IV) Індоло-Кубанська западина на Керченському півострові має потужний осадовий чохол до 10 км глибини з низькошвидкісними осадовими породами. Потужність верхньої кори за швидкісною моделлю складає 12 км.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **Лисинчук Д.В.**, Лисинчук К.В., Омельченко В.Д. Будова земної кори та верхньої мантії Донбасу вздовж профілю ГСЗ Маріуполь – Біловодськ. // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, 2002, №3(4), с.178-180.
2. **Лисинчук Д.В.**, Лисинчук К.В., Омельченко В.Д. Моделювання хвильових полів при інтерпретації ГСЗ на прикладі профілю DOBRE'99. // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, 2002, №3(4), с.180-183.
3. Град М., Гринь Д., Гутерх А., Келлер Р., Ланг Р., Лингси С., Лысинчук Е., **Лысинчук Д.**, Омельченко В., Старостенко В., Стифенсон Р., Стовба С., Тибо Г., Толкунов А., Яник Т. DOBRE-99: структура земной коры Донбасса вдоль профиля Мариуполь – Беловодск. // ФИЗИКА ЗЕМЛИ, 2003, №6, С.33-43
4. H.Thybo, T.Janik, V.D.Omelchenko, M.Grad, R.G.Garetsky, A.A.Belinsky, G.I.Karatayev, G.Zlotski, M.E.Knudsen, R.Sand, J.Yliniemi, T.Tiira, U.Luosto, K.Komminaho, R.Giese, A.Guterch, C.-E.Lund, **D.V.Lysynchuk**, O.M.Kharitonov, T.Ilchenko, V.M.Skobelev, J.J. Doody 2003. Upper lithospheric seismic velocity structure across the Pripyat Trough and the Ukrainian Shield along the EUROBRIDGE'97 profile. // Tectonophysics. -371. -P.41-79
5. M. Grad, A.Guterch, P. Sroda, W. Czuba, V. N.Astapenko, A. A. Belinsky, R. G. Garetsky, G. I. Karatayev, V. V. Terletsky, G. Zlotski, S. L. Jensen, M. E. Knudsen, H. Thybo, R. Sand, K. Komminaho, U. Luosto, T. Tiira, J. Yliniemi, R. Giese, J. Makris, J. Jacyna, L. Korabliova, G. Motuza, V. Nasedkin, R. Seckus, W. Czuba, E. Gaczyński, M. Grad, A. Guterch, T. Janik, P. Sroda, M. Wilde-Piórko, A.Tokarski, M. Rauch, S. V. Bogdanova, C.-E. Lund, R. Gorbatshev, J. J. Doody, T. Ilchenko, O. M. Kharitonov, V. D. Omelchenko, **D.V. Lysynchuk**, V. M. Skobelev, V. I. Starostenko, A. A. Tripolsky, G. R. Keller, K. C. Miller, A. Smirnov 2006. Lithospheric structure of the western part of the East European Craton investigated by deep seismic profiles. // Geological Quarterly.- 50 (1). -P.9–22
6. S.Bogdanova, R.Gorbatshev, M. Grad, A.Guterch, T.Janik, E.Kozlovskaya, G.Motuza, G.Skridlaite, V.Starostenko, L.Taran, V.N.Astapenko, A.A.Belinsky, R.G. Garetsky, G.I.Karatayev, V.V. Terletsky, G.Zlotski, S.L.Jensen, M.E.Knudsen, H.Thybo, R. Sand, K. Komminaho, U.Luosto, T. Tiira, J. Yliniemi, R.Giese, J. Makris, J. Jacyna, L.Korabliova, V.Nasedkin, G.Motuza, A.Rimsa, R.Seckus, P.S'roda, W.Czuba, E.Gaczyn'ski, M.Wilde-Pio'rko, E. Bibikova, S.Claesson, S.A.Elming, C.-E.Lund, J.Mansfeld, L.Page, K.Sundblad, J.J.Doody, H.Downes, V.B.Buryanov, T.P.Egorova, T.V.Il'chenko, O.M. Kharitonov, O.V.Legostayeva, **D.V.Lysynchuk**, I.B.Makarenko, V.D.Omel'chenko, M.I.Orlyuk, I.K.Pashkevich, V. M.Skobelev, L.M.Stepanyuk, G.R.Keller, K.C.Miller 2006. EUROBRIDGE: New insight into the geodynamic evolution of the East European Craton. // Geological Society, London, Memoirs. -32. - P.599–625. -DOI: 0435-4052/06/\$15.00
7. Старостенко В.І., Омельченко В.Д., **Лисинчук Д.В.**, Коломієць К.В., Легостаєва О.В., Гринь Д.М. Дослідження глибинної будови земної кори та верхньої мантії за профілем ГСЗ Дебрецен–Мукачеве–Рівне (проект PANCAKE-

08). // Геоінформатика. - 2009. - №2. - С.25-29.

8. Козленко Ю.В., **Лысинчук Д.В.**, Козленко М.В. Комплексное сейсмоструктурное моделирование перспективных углеводородных структур в западной части Черного моря. // Геолог. и полезн. ископ. Мирового океана. – 2009. - № 3. – С. 25 -34.

9. Козленко Ю.В., **Лысинчук Д.В.**, Козленко М.В. Глубинное строение земной коры западной части Черного моря по результатам комплексной переинтерпретации геофизических данных по профилю ГСЗ № 25. // Геофиз. Журнал. – 2009. – 31. - № 6. – С.77 – 91

10. **Лысинчук Д.В.**, Коломиец Е.В. Результаты послонного псевдоскоростного преобразования сейсмических данных площадного исследования МОГТ в Донбассе. // Наукові праці УкрНДМІ НАН України, №9 (II), 2011, С.195-202.

11. Старостенко В., Омельченко В., **Лисинчук Д.**, Легостасва О., Гринь Д., Коломієць К. Геофізичне вивчення глибинної будови земної кори та верхньої мантії деяких головних геологічних структур від Східноєвропейського кратону до Адріатичного моря. Українсько-Македонський науковий збірник, **2011** Т. 5. С. 365-372.

12. Козленко Ю.В., **Лысинчук Д.В.**, Козленко М.В. Структура земной коры северо-западного шельфа Черного моря вдоль профиля ГСЗ № 26. // Геофиз. журнал. – 2013. – 35, № 1. – С.142 – 152

13. Коломиец Е.В. Козленко Ю.В., Козленко М.В., **Лысинчук Д.В.** Разломная тектоника Днепровско-Донецкой впадины по данным томографической инверсии. // Геол. Журн.- 2013. - № 2 – С.59 – 67

14. **Лысинчук Д.В.**, Коломиец Е.В., Козленко М.В., Козленко Ю.В., Омельченко В.Д., Калюжная Л.Т. Комплексная интерпретация сейсмических данных вдоль профиля КМРВ-ГСЗ Синельниково – Чугуев. // Геофиз. Журнал. – 2013. – 35. - № 6. – С.165 – 173

15. V. Starostenko, T. Janik, K. Kolomiyets, W. Czuba, P. Sroda, **D. Lysynchuk**, M. Grad, I. Kovacs, R. Stephenson, H. Thybo, I.M. Artemieva, V. Omelchenko, O. Gintov, R. Kutas, D. Gryn, A. Guterch, E. Hegedus, K. Komminaho, O. Legostaeva, T. Tiira, A. Tolkunov 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. -P.1049–1072. DOI:10.1016/j.tecto.2013.07.008

16. 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). - P.740-766

17. Starostenko V. I., Janik T., Yegorova T., Farfuliak L., Czuba W., Sroda 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. //

Geophys. J. Int. - 201. - P.406–428. - doi:10.1093/gji/ggv018

18. V. Starostenko, T.Janik, R.Stephenson, D.Gryn, O.Rusakov, W.Czuba, P.S'Roda, **D.Lysynchuk**, M.Grad, A. Guterch, E.Fluh, H. Thybo, I. Artemieva, A.Tolkunov, G.Sydorenko, V.Omelchenko, K.Kolomiyets, O.Legostaeva, A.Dannowski, A.Shulgin 2016. DOBRE-2 WARR profile: the Earth's crust across Crimea between the pre-Azov Massif and the northeastern Black Sea Basin. // University of Aberdeen on February 3, 2016 From: Sosson, M., Stephenson, R.A. & Adamia, S. A. (eds). - Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus. Geological Society. - London. - Special Publications. - 428. - doi:10.1144/SP428.11

19. T.Janik, P.Środa, W.Czuba, **D.Lysynchuk** 2016. Various Approaches to Forward and Inverse Wide-Angle Seismic Modelling Tested on Data from DOBRE-4 Experiment. // Acta Geophysica. - vol. 64. - 6. -P.1989-2019. - DOI:10.1515/acgeo-2016-0084

20. В.И.Старостенко, Т.Яник, О.Б.Гинтов, **Лысинчук Д.В.**, П.Сърода, В.Чуба, Е.В.Коломиец, П.Александровский, В.Д.Омельченко, К.Коминахо, А.Гутерх, Т.Тиира, Д.Н.Гринь, О.В.Легостаева, Г.Тибо, А.В.Толкунов Скоростная модель земной коры и верхней мантии вдоль профиля DOBRE-4 от Северной Добруджи до центральной области Украинского щита. 1. Сейсмические данные. // ФИЗИКА ЗЕМЛИ. – 2017а. - № 2. - с.24–35

21. В.И.Старостенко, Т.Яник, О.Б.Гинтов, **Лысинчук Д.В.**, П.Сърода, В.Чуба, Е.В.Коломиец, П.Александровский, В.Д.Омельченко, К.Коминахо, А.Гутерх, Т.Тиира, Д.Н.Гринь, О.В.Легостаева, Г.Тибо, А.В.Толкунов Скоростная модель земной коры и верхней мантии вдоль профиля DOBRE-4 от Северной Добруджи до центральной области Украинского щита. 2. Геотектоническая Интерпретация. // ФИЗИКА ЗЕМЛИ. – 2017б. - № 2. - с.36–44

АНОТАЦІЯ

Лисинчук Д.В. Швидкісні моделі літосфери України за даними ширококутних глибинних сейсмічних зондувань. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора геологічних наук за спеціальністю 04.00.22 – геофізика. - Інститут геофізики НАН України, Київ, 2017.

В роботі запропонована методика побудови швидкісної моделі, яка базується на комплексному використанні принципово різних алгоритмів та програм, разом з наступним розрахунком синтетичних сейсмограм та перевіркою їх відповідності спостереженому хвильовому полю. Розраховані швидкісні моделі чотирьох регіональних профілів, які висвітлюють будову земної кори та верхньої мантиї вздовж ліній досліджень на території України. Робота значно доповнює сучасні уявлення про будову земної кори та верхньої мантиї території України. Швидкісні характеристики літосферних структурних блоків, шарів, що їх складають, зон контактів та зрощування окремих одиниць дають нову інформацію про умови утворення, деформації та історії розвитку як окремих тектонічних структур, так і всього регіону загалом. Чітке знання умов розвитку осадових басейнів, переробки та деформації шарів, яка відображена у зміні швидкостей проходження сейсмічних коливань, дозволяє виділяти ділянки, що є перспективними в нафтогазоносному

плані та обґрунтовано планувати відповідні детальні пошукові роботи. Швидкісні характеристики кристалічних порід у приповерхневих шарах, особливо в районі Українського щита, де на ряді профілів визначені крім поздовжніх швидкостей ще й поперечні, чи відношення V_p/V_s , дозволяють прогнозувати мінеральний склад та спрямовувати пошукові роботи для розвитку мінерально-сировинної бази країни.

Ключові слова: осадовий басейн, земна кора, мантія, літосфера, Східно-Європейський кратон, сейсмічна швидкість, Український щит, сейсмічне моделювання, границя Мохо, трасування променів, томографічна інверсія

SUMMARY

Lysynchuk D.V. Ukrainian lithosphere velocity model from the wide-angle deep seismic soundings. - The manuscript on qualifying scientific work.

The doctor of geological sciences thesis in specialty 04.00.22 -geophysics.- Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, Kyiv, 2017.

This thesis presents the technique of a velocity model calculation on the integrated use of the fundamentally different algorithms and applications with subsequent calculation of synthetic seismograms and checking their compliance with the observed wave field. The velocity models of four regional profiles covering structure of the crust and upper mantle along the lines of research in Ukraine were calculated.

The EUROBRIDGE'97 [Thybo et al., 2003] data has been interpreted by use of three different two-dimensional programs of tomographic travel time inversion and one program of ray trace modeling. The P- and S-wave velocity propagation along the profile was modeled on the base of high quality seismic records for all shot points. The evident differences in layer velocities were found in uppermost mantle and crystalline crust of three main tectonic units crossed by the profile: (I) the Pripjat Trough is about 4 km deep sedimentary basin crossed by the northern part of the profile located in the Osnitsk – Mikashevichi Igneous Belt. There are three significant velocity layers in the model of this part of the profile, which is typical for a Precambrian craton. (II) The Volyn Block with Korosten Pluton to a depth of 15 km and the lowest crust are characterized by very high V_p/V_s ratio and seismic velocities. It might be caused by the presence of intrusive body with mafic composition in the upper crust that were developed by bimodal melts from the lower crust and upper mantle. (III) The Podolian Block has typical cratonic velocity model structure, with relatively low V_p/V_s ratio and seismic velocities. Very strong reflector in the upper mantle with SW-dipping from the bottom of the crust to the depth of 75 km may represent the Proterozoic suture between cratonic terranes of Volgo – Uralia and Sarmatia.

The PANCAKE profile velocity model also can be divided into large-scale tectonic units: (I) the Pannonian basin and Carpathian basin, where the thickness of the crust is small (20-25 km, including about 2-5 km of sediments), low velocity basement (about 6.07 km/s along Pannonian basin and 6.24 km/s along the Transcarpathian depression), any mafic lower crust layer was interpreted under the Pannonian basin, the velocity in the upper mantle is about 8.0 km/sec; (II) the Carpathians and the Carpathian Foredeep, where the power of sediments is more than 20 km and includes up to 8 km of Carpathian flysch, which lies on a 12 km older meta-sedimentary rocks. The power of the crust increases from 22 km to 45 km in the direction EEC; (III) the Northeast part of the profile crosses the EEC. The velocity model is characterized by a three-layer crust with almost

constant power (48 km). Two reflective boundaries at depths of about 45 and 75 km were modeled in the upper mantle under the Pannonian basin.

The DOBRE-4 velocity model includes sedimentary layers with velocities about 2.6 – 4.7 km/sec, which are terrigenous clay and limestone formations of Ordovician-Jurassic age. The basement under the lower Prut High consists of one layer with velocity about 5.8 km/sec, but there are two layers with velocities in the interval 5.10-5.15 km/sec and less than 6.0 km/sec at the Fore-Dobrudja Trough. Velocity -section shows general deepening of EEC Precambrian basement towards Dobrudja with two important features: 1) a sharp V-shaped depression at a distance of 60-90 km makes it possible to clarify the position of the EEC border; 2) very similar sharp dive formation at a distance of 370-440 km corresponds to an axial zone of inter-regional tectonic suture Kherson Smolensk. Seismic modeling with four different approaches showed substantial variability of the Moho depth along the DOBRE-4 profile. Two lithosphere scale depressions were obtained: the first - at a distance of 200-250 km, where the thickness of the crust is 47 km, is delt with Holovanivska suture zone, and the second - at a distance of 330-370 km, crust thickness about 45 km, is associated with Kherson Smolensk tectonic suture.

The velocity model along the DOBRE-5 profile allowed to identify four structural units of the crust in order from west to east: (I) the Fore-Dobrudja Trough which has a powerful sedimentary cover of 10-12 km with velocities 5.7-5.8 km/s. There is no bottom crust layer here. The crystalline crust consists of two layers. Moho depth is 38-40 km here. (II) Karkinitzky deflection, where the sedimentary cover has a capacity of 6-11 km with 4 km layer of rocks with low velocity 2.0-4.0 km/s. The sediment capacity increases further east due to high velocity deposits (5.6-5.7 km/s) of 2 to 7 km to the west coast of Crimea. High velocity bottom crust has a maximum capacity of about 10 km in the western part of deflection. Moho depth decreases eastwards from 38 km to 33 km. (III) The Central Crimean Raising with sedimentary cover of approximately 4.2 km and velocity abo 2.70-3.0 km/s. Powerful crust (47 km) is similar in structure to cratonic three-layer crust of EEC. (IV) The Indole-Kuban basin on the Kerch Peninsula has a powerful sedimentary cover up to 10 km depth with low- velocity sedimentary rocks. The power of the upper crust in velocity model is 12 km.

Keywords: sedimentary basin, crust, mantle, lithosphere, Eastern European Craton, seismic velocity; Ukrainian shield, seismic modeling, Moho boundary, ray tracing, tomography inversion

АННОТАЦИЯ

Лысынчук Д.В. Скоростные модели литосферы Украины по данным широкоугольных глубинных сейсмических зондирований. - Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора геологических наук по специальности 04.00.22 - геофизика. - Институт геофизики НАН Украины, Киев, 2017.

В работе предложена методика построения скоростной модели, основанная на комплексном использовании принципиально различных алгоритмов и программ, вместе с последующим расчетом синтетических сейсмограмм и проверкой их соответствия наблюдаемому волновому полю. Рассчитаны скоростные модели четырех региональных профилей, которые представляют строение земной коры и

верхней мантии вдоль линий исследований на территории Украины. Работа существенно дополняет современные представления о строении земной коры и верхней мантии.

Данные профиля EUROBRIDGE'97 были проинтерпретированы с использованием двухмерного моделирования времен пробега сейсмических волн с помощью трех различных программ томографической инверсией и программы трассировки лучей. Обнаружены существенные различия в структуре сейсмической скорости земной коры и верхней мантии между тремя основными тектоническими блоками, которые пересекаются профилем: (I) Припятский прогиб, является осадочным бассейном с глубиной около 4 км. Структура скоростного разреза типична для докембрийского кратона. (II) Волынский блок вместе с Коростенским плутоном, глубина которого не менее 15 км, и нижней земной корой характеризуются очень высокой скоростью сейсмических волн и высоким соотношением V_p/V_s . (III) Подольский блок по скоростям близок к обычной платформенной структуре, хотя он характеризуется относительно низкой сейсмической скоростью и малым соотношением V_p/V_s . В мантии обнаружен круто падающий отражающий горизонт, начинающийся сразу под поверхностью Мохо и достигающий по меньшей мере до глубины 70 км.

Скоростная модель профиля PANCAKE также разделяется на три масштабные тектонические единицы: (I) Паннонский бассейн и Закарпатский прогиб, где мощность коры сравнительно невелика и составляет от 20 до 25 км вместе с приблизительно от 2 до 5 км пачкой осадочных пород, которые залегают на низкоскоростном фундаменте. Скорость продольных волн около 6.07 км/с под Паннонским бассейном и 6.24 км/с под Закарпатским прогибом, отсутствует мафический слой в нижней коре, а скорость в верхней мантии составляет около 8,0 км/с; (II) Карпаты и Прикарпатский прогиб, где мощность осадочного чехла превышает 20 км и включает в себя до 8 км карпатского флиша, который лежит на более старых метаосадочных образованиях мощностью до 12 км, отражение от подошвы осадочных пород не зафиксировано, что свидетельствует об отсутствии ярко выраженного кристаллического фундамента, поверхность Мохо погружается с 22 до 45 км в направлении Восточно-Европейского кратона (ВЕК); (III) Северо-восточная часть профиля расположена в ВЕК имеет типичную для кратона трехслойную кору с почти постоянной мощностью, которая не превышает 48 км. Высокие скорости в нижней коре, которые составляют от 7.2 до 7.4 км/с, в районе Украинского щита могут объясняться магматическими интрузиями. В верхней мантии ВЕК на глубинах 60-70 км были проинтерпретированы субгоризонтальные отражающие площадки, которые тянутся от центральной в северо-восточную часть профиля.

Скоростная модель профиля DOBRE-4 включает в себя осадочные слои со скоростью $V_p \approx 2.6 - 4.7$ км/сек, которые представлены терригенно-глинистыми и известковыми образованиями ордовик-юрского возраста. Скоростной разрез показывает общее погружение доюрского и докембрийского фундаментов в сторону Добруджи с двумя важными особенностями: 1) резкая V-образная впадина на дистанции 60-90 км дает возможность уточнить положение границы ВЕК; 2) очень похожее резкое погружение на дистанции 370-440 км соответствует осевой

зоне межрегионального тектонического шва Херсон-Смоленск. По сейсмическим данным было выявлено два прогиба границы Мохо литосферного масштаба. Первый - на дистанции 200-250 км, где мощность коры достигает 47 км, связан с Головановской шовной зоной, а второй - на дистанции 330-370 км, с мощностью коры 45 км, с тектоническим швом Херсон-Смоленск. Последний был обнаружен в ходе данных работ впервые. Скорость в низах коры $V_p \approx 6.7$ км/сек резко меняется на поверхности Мохо до $V_p \approx 8.4$ км/сек в верхней мантии.

Скоростная модель вдоль профиля DOBRE-5 позволила выделить четыре характерные структурные единицы земной коры в последовательности с запада на восток: (I) ПредДобруджинский прогиб, имеет мощный 10-12 км осадочный чехол со скоростями 5.7-5.8 км/с. В двухслойной кристаллической коре отсутствует нижняя кора, что отличает ее от коры БЕК. Глубина до Мохо составляет 38-40 км. (II) Каркинитский прогиб имеет осадочный чехол мощностью 6-11 км, в котором 4 км составляют породы с низкими скоростями 2.0-4.0 км/с. Верхняя кора имеет мощность 12 км, а средняя - примерно 3-5 км. Высокоскоростная нижняя кора имеет максимальную мощность примерно 10 км в западной части прогиба. Глубина до поверхности Мохо уменьшается в восточном направлении от 38 до 33 км. (III) Центральное Крымское Подняние имеет осадочный чехол, мощность которого составляет примерно 2-4 км, а скорость - 2.7-3.0 км/с. Осадочный чехол залегает на гетерогенном фундаменте, мощность которого увеличивается в восточном направлении от 10 до 20 км. В верхней коре обнаружены три высокоскоростные тела со скоростями продольных волн 6.22-6.3 км/сек. Мощная кора (до 47 км) подобна по скоростному строению платформенной трехслойной коре БЕК. (IV) Индоло-Кубанская впадина на Керченском полуострове имеет мощный осадочный чехол до 10 км глубины, наполненный низкоскоростными осадочными породами. Мощность верхней коры в скоростной модели составляет 12 км.

Ключевые слова: осадочный бассейн, кора, мантия, литосфера, Восточно-Европейский кратон, сейсмическая скорость, Украинский щит, сейсмическое моделирование, граница Мохо, лучевое трассирование, томографическая инверсия.

Підписано до друку 21.11.2017 р. Формат 60 x 84/16.
Папір офсетний. Друк цифровий.
Обсяг 1,7 ум.-друк. арк. Наклад 100 прим. Зам. № П-2017-392

Надруковано у ЦОП «Глобус» ФОП Кравченко Я.О.
02094, м. Київ, вул. Мініна, буд. 12.
Тел. (044) 561-95-31, (067) 506-57-55, (050) 57-06-555.

