

Розломно-блокова будова межі Мохо під центральною частиною Донецької складчастої споруди (за лінією сейсмічного профілю DOBReFlection2000)

Д.М. Гринь, 2020

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна
Надійшла 31 липня 2020 р.

Розглянуто можливість відтворювати розломну-блокову структуру геологічних об'єктів за результатами розв'язання оберненої динамічної задачі сейсміки. Вхідними є сейсмічні дані глибинного розрізу, отримані ДГП «Укргеофізика» за методом спільної глибинної точки (СГТ) на профілі DOBReFlection-2000. Розв'язок — часовий сейсмічний профіль логарифмічних декрементів згасання (ЛДЗ) з високою просторовою роздільною здатністю. Незважаючи на слабку амплітуду відбиття на великих глибинах, за змінами в спектральному складі сейсмограм можна виділяти їхні контури та розломні зони, заповнені мантією брекчією або іншою речовиною.

На сьогодні метод глибинного сейсмічного зондування (ГСЗ) є основним сейсмічним методом вивчення будови верхньої частини літосфери. Використовуючи географи відбитих хвиль від геологічних меж, будують швидкісні моделі земної кори та верхньої мантії. За цими моделями визначають закономірності зміни швидкості поширення сейсмічних хвиль з глибиною. Однак недостатня просторова та часова роздільна здатність не дає змоги виявляти та картувати простягання глибинних розломів.

Від 1980-х років для вивчення глибинної будови почали використовувати методику спостереження за відбитими хвилями (майже вертикальними) в зоні, близькій до джерела сейсмічних хвиль, за технологією методів відбитих хвиль (МВХ) і СГТ. Сейсмічний розріз, отриманий таким методом, базується на багаторазовому підсумовуванні записів від різних сейсмоприймачів, що забезпечує істотне підсилення співвідношення сигнал-завада, а отже, реєстрацію сейсмічних хвиль, що поширюються на глибину, значно більшу за протяжність системи спостереження, розташованої на земній поверхні. Подібний розріз називають глибинним розрізом СГТ. Він несе інформацію про відбиття з часом приходу хвиль на поверхню від 30 с і більше. Сейсмічні записи СГТ мають ширший частотний діапазон, ніж записи методом ГСЗ, що важливо для розв'язання обернених динамічних задач.

Проведення сейсмічних робіт на одній території різними глибинними методами СГТ і ГСЗ та комплексування їх результатів має важливе значення для пояснення походження нафтогазоносності певних регіонів з позиції детальної глибинної будови.

Ключові слова: розлом, межа Мохо, земна кора, логарифмічний декремент згасання.

Вступ. Глибинні сейсмічні розломи — надзвичайно важливі елементи геологічного середовища. Їх дослідження дає змогу пояснити геодинамічні явища та процеси, що відбувались на великих глибинах упродовж мільярдів років. Від достовірності просторового картування глибинних розломів залежить істинність розміщення та гене-

зису розломів у верхній частині літосфери. З ними також пов'язані правильність вирішення питань сеймотектоніки, сейсмології та розуміння історії формування рудних і нафтогазових родовищ на певних територіях.

Розломну будову кори, як правило, уявляють за інформацією, отриманою на зем-

ній поверхні: це геологічне обстеження території або застосування приповерхневих геофізичних методів спостереження за різноманітними фізичними полями, з метою математичного моделювання можливого їх положення. Інакше кажучи, розломні зони будують зверху вниз.

Питання про можливість використання сейсмічних методів для картування глибинних розломів різних реологічних типів і зон розуцільнення, пов'язаних з ними, залишається відкритим. Підтвердженням цього є велика кількість сейсмічних глибинних градієнтно-шаруватих розрізів без розломів [Grad et al., 2003; Starostenko et al., 2013a,b, 2015], у побудові яких автор брав активну участь. Такі безрозломні, або «формально» розломні, моделі з низькою точністю просторового розміщення розломів надають недостатньо детальну інформацію для геодинамічної та тектонічної інтерпретації.

У сейсміці є два основні методи дослідження будови Землі — метод спільної глибинної точки (СГТ) і метод глибинного сейсмічного зондування (ГСЗ). Метод СГТ використовують для пошуку корисних копалин, де джерелом сейсмічних хвиль зазвичай є багатотонні сейсмічні вібратори. Просторово-частотна роздільна здатність методу дає змогу виділяти приповерхневі розломи із хвильового поля, які виявляються у фаціальних неузгодженнях (зсувах, зміщеннях осей синфазності у хвильовому полі) на відбивних горизонтах.

Глибинність стандартного методу СГТ порівняно з методом ГСЗ невелика і обмежена базою спостереження (пункт генерування сигналу—точка реєстрації) у зв'язку з виробничою необхідністю та потребою здешевлення сейсмічних робіт. За профілями ГСЗ, довжина (база) яких становить більш як 500 км, у центральній частині отримують відбиття з глибин близько 60 км, при цьому джерелом сейсмічних хвиль є вибух тротилу масою до 1000 кг. Утім просторова дискретність у 2—3 км і довжина відбитих і заломлених хвиль 300—700 м не дають змоги фіксувати ані регіональні, ані тонкі крихкі та псевдов'язкі кліважні розломи.

Для запису сейсмічних хвиль, породжених розломами, необхідно використовувати методи з просторово-частотною дискретністю, меншою за розміри елементів зони розлому та пов'язаних з ним тріщин сколювання й відриву внутрішньорозломного заповнювача, кліважу. Інакше кажучи, чим більше точок спостереження (сейсмостанцій), тим менші об'єкти проявлятимуться у хвильовому полі. З огляду на велику глибинну протяжність розломів, для накопичення енергії вторинних відбитих хвиль від елементів розлому необхідно використовувати потужні хімічні вибухи. Вони генерують не тільки високоамплітудні, а й максимально високочастотні сейсмічні хвилі. Для раціонального використання вибухової енергії бажано забезпечити багаторазове отримання сейсмічних відбиттів від геологічних об'єктів (багаторазове перекриття), їх накопичення та подальше підсумовування.

Сейсмічн дані. У 1999 р. були проведені міжнародні сейсмічні роботи DOBRE-99 з вивчення глибинної будови Донецької складчастої споруди (ДСС) та суміжних територій методом ГСЗ. В обробці отриманих даних брали участь три міжнародні групи, які використовували різні програми для створення швидкісних моделей. У 2000—2001 р. ДГП «Укргеофізика» і міжнародний консорціум «EUROPROBE» (Німеччина, Нідерланди, Данія) виконали дослідження методом СГТ з використанням відбитих хвиль практично вертикального напрямку поширення за лінією профілю DOBRE-99. Цей профіль отримав назву DOBREReflection-2000. Методику проведення польових робіт та обробки сейсмічних даних детально описано у публікаціях [Maystrenko et al., 2003; Stovba et al., 2006]. Для того щоб привернути увагу до унікальності сейсмічного матеріалу та методик, якими він був отриманий, нижче наведено скорочені видержки з англомовних статей.

Для вивчення осадового чохла і верхньої частини консолідованої кори було застосовано сейсмічні 27-тонні вібратори АНВ-IV-362. Додатково на південній частині профілю виконували підземні хіміч-

ні вибухи для вивчення нижньої кори та верхньої мантії. Крок симетричної системи спостережень між каналами становив 35 м, базою спостереження — 24 км на півдні, 20 км — північніше Головного антикліналу Донбасу і 18 км — у районі Старобільсько-Міллеровської антикліналі. Методикою проведення сейсмічних робіт була забезпечена велика кратність спостереження за вибухового та вібраційного способів збудження сигналів. Загальна довжина профілю DOBRReflection-2000, 2001 — 260,8 км.

Дані оброблено у ДГП «Укргеофізика» (Київ). Було застосовано стандартну методикою, що складається із визначення та введення статичних поправок, автоматичного регулювання підсилення з передбаченням деконволюції, аналізу швидкостей, корекції статичних поправок, частотного аналізу, підсумовування трас. Просумовані траси обробляли з використанням деконволюції, фільтрації, згладжування, часової міграції за методом Кіргофа і 45-градусної часової скінченно-різницевої міграції [Maystrenko et al., 2003]. Додатково застосовували метод підсумовування за допомогою алгоритму спільної відбивної поверхні (common reflection surface — CRS) [Menyoli et al., 2004].

За цими унікальними даними побудовано глибинний сейсмічний профіль СГТ (рис. 1), геологічну інформацію з якого використовували для пояснення геодинамічної будови Східноєвропейської платформи багато авторів України та інших держав.

Кінематичні та динамічні задачі сейсміки. Розв'язання кінематичних і динамічних задач сейсміки можливе, тому що зміна фізичних властивостей порід геологічного середовища або їхньої структури завжди відображається у зміні параметрів хвильового поля. Вивчення кінематичних параметрів пов'язане з вивченням особливостей поширення фронтів і променів сейсмічних хвиль, просторової кореляції реперних горизонтів, їх товщини та морфології. Кореляція сейсмічних розрізів є однією з основних задач структурної сейсморозвідки. По розривах осей синфазності (корельованості) виявляють та кар-

тують диз'юнктивні порушення, можливі насуви, скиди.

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

Основним математичним апаратом з вивчення змін петрофізичних властивостей порід є спектральний аналіз, за допомогою якого досліджують обрану ділянку, а не всю сейсмічну трасу. Цим суттєво підвищуються роздільна здатність і можливість обчислювати показники окремих пластів.

Залежно від механізму втрати енергії сейсмічної хвилі виділяють декілька типів, пов'язаних з її згасанням, — розходження, розсіяння та поглинання. Зменшення енергії хвилі внаслідок віддалення її фронту від джерела називають *геометричним розходженням*. *Розсіяння* енергії відбувається на будь-якій поверхні геологічного об'єкта і залежить від його форми, розмірів та густини. Як правило, на тонкошаруватих осадових породах спостерігається високий рівень згасання, спричиненого розсіянням, через утворення слабких відбитих хвиль. Багаторазове розсіяння збагачує спектр сейсмічної траси високочастотними компонентами [Гринь, 1979]. У консолідованому середовищі згасання характеризується невеликими значеннями. *Поглинання* — найчастіше уживаний динамічний параметр. Під час руху сейсмічної хвилі у геологічному середовищі енергія пружних коливань перетворюється у теплову енергію, яка поглинається середовищем, відбуваються пластичні та нелінійно-пружні деформації. Поглинання збільшується з появою тріщинуватості, пористості, як наслідок, змінюється частотний склад сейсмічної хвилі. Високочастотні гармо-

ніки згасають швидше за низькочастотні, хоча за певних геологічних умов підвищується енергія високочастотної складової [Тяпкин, 2011].

Одночасне використання поглинання та розсіяння називають *еквівалентним згасанням*. У геологічному середовищі, як правило, всі три типи згасання енергії сейсмічної хвилі проявляються одночасно.

Один із методів розв'язку оберненої динамічної задачі — використання як характеристики поглинання безрозмірної величини, яку називають логарифмічним декрементом згасання (ЛДЗ). Фізичною основою для використання ЛДЗ є експоненціальна залежність величини амплітуди сейсмічної хвилі від часу її руху у середовищі. ЛДЗ показує, у скільки разів зменшується амплітуда за одне коливання:

$$\gamma = \frac{A(t)}{A(t+T)} = e^{\beta t},$$

де $A(t)$ — амплітуда коливання; $A(t+T)$ — амплітуда коливання через період T ; t — час; β — коефіцієнт згасання (чим він більший, тим швидше зменшується амплітуда наступних коливань). Швидкість згасання характеризується ЛДЗ, який пов'язаний з кількістю коливань N_e , що призводять до зменшення амплітуди коливання в e разів, співвідношенням

$$\lambda = \frac{\ln(A(t))}{A(t+T)} = \beta t = \frac{1}{N}.$$

Автор статті запропонував базовий алгоритм оцінювання ЛДЗ [Гринь, 2001] на підставі розкладання сейсмічних трас за базисними функціями (вузькосмуговими складовими) і обчислення їхніх обвідних за перетворенням Гілберта. Кожна обвідна на відповідній середній частоті має інформацію про функцію згасання. За обвідними визначають середньоквадратичну оцінку ЛДЗ у кожний дискретний момент часу. Таким чином, просторова та часова розмірність розрізу ЛДЗ збігається із вхідними даними СГТ.

Наведений алгоритм визначає згасання одночасно трьох типів хвиль, не розділя-

ючи їх. Для оконтурення об'єкта чи виділення зони розлому природа поглинання не має значення. Важлива сама зміна поглинальних властивостей середовища, яка і спричинює вияв об'єктів у полі ЛДЗ.

Підготовка сейсмічних даних. Для якісного відтворення глибинної геологічної будови за допомогою розв'язання обернених задач необхідно мати сейсмічні дані належної якості. Основна проблема — наявність великої кількості хвиль-завад різного генезису і великий шлях проходження хвилі від джерела до приймачів. Більшість із завад видаляють на різних етапах формування кінцевого варіанта сейсмічних даних. Для видалення залишкових хвиль-завад використано модифікований скінченно-різницеви метод [Гринь, 2003]. Наприклад, це залишки низькошвидкісних поверхневих хвиль або хвиль, що утворилися на клиноподібному розриві (ефект дифракції) відбивного горизонту та за різкої зміни його поглинальних властивостей.

На рис. 2 зображено обрану ділянку початкового сейсмічного запису, що складається з трас: $x=60$ (1050 м), $t=2$ с (рис. 2, а); очищений сейсмічний запис (рис. 2, б); сейсмічне поле хвиль-завад (рис. 2, в). За кольоровою частиною рис. 2, а, б можна зробити надзвичайно важливий висновок про те, що спектральний склад очищених сейсмічних даних не відрізняється від вхідних даних, оскільки виділення хвиль-завад не вносить нелінійних змін у спектральний склад сейсмічного запису. На чорно-білій частині рисунку бачимо, що із вхідного сейсмічного поля видалені хаотично напрямлені різношвидкісні сейсмічні хвилі, які ускладнюють вхідне сейсмічне поле.

У подальшому для розв'язання оберненої динамічної задачі використано сейсмічний профіль без залишкових хвиль-завад.

Розломи земної кори. Особливості картування розломів в осадових тонкошаруватих породах за даними ЛДЗ описано у статтях [Гринь, 2011, 2019а], і запропоновано автоматизований спосіб їх картування за даними СГТ 3D [Гринь, 2019б]. У статті [Гринь, 2020] наведено приклад виділен-

ня серії розломів у верхній частині кори (фундамент Ялинського насуву Донецької складчастої споруди) завдовжки понад 3 км.

Під час формування розлому суміжні блоки гірських порід переміщуються у різних напрямках. Тектонічні розломи поділяють на два типи: крихкі — зміщення відбувається вздовж певної площини; пластичні — породи переміщуються у

певній широкій просторовій зоні. У міжблоковому просторі уламки гірської породи подрібнюються та перетираються, утворюючи тектонічну брекчію. Розміри уламків можуть бути від десятків до сотень метрів. Дуже подрібнені уламки утворюють цемент, в якому залишаються великорозмірні уламки. В зонах глибинних розломів складчастих областей часто формується тектонічний меланж — суміш

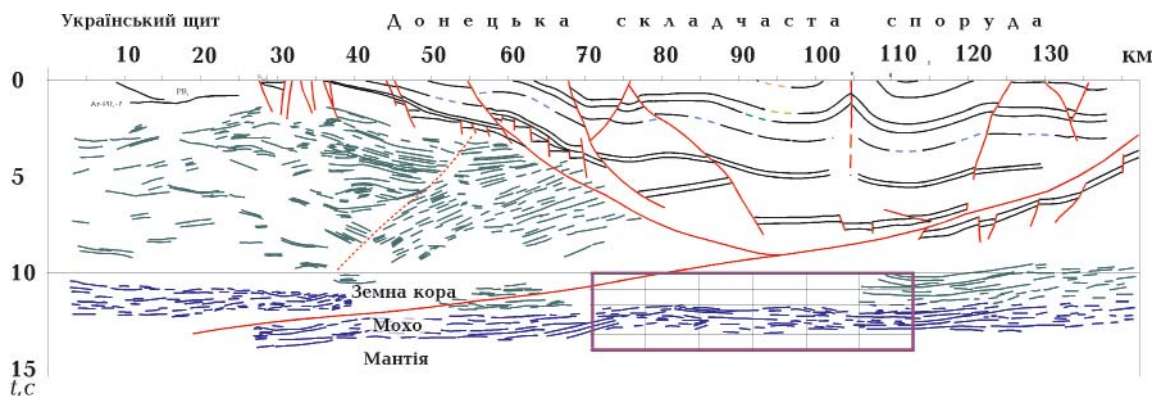


Рис. 1. Часовий розріз СГТ за профілем DOBReflection-2000 та його інтерпретація [Maystrenko et al., 2003]. Фіолетовий прямокутник — часова ділянка, де вивчали будову межі Мохо за даними логарифмічних декрементів згасання.

Fig. 1. Temporal section of CDP along the profile DOBReflection-2000 and its interpretation [Maystrenko et al., 2003]. Violet rectangle is a temporal area where the structure of Moho discontinuity according to LDE data was under study.

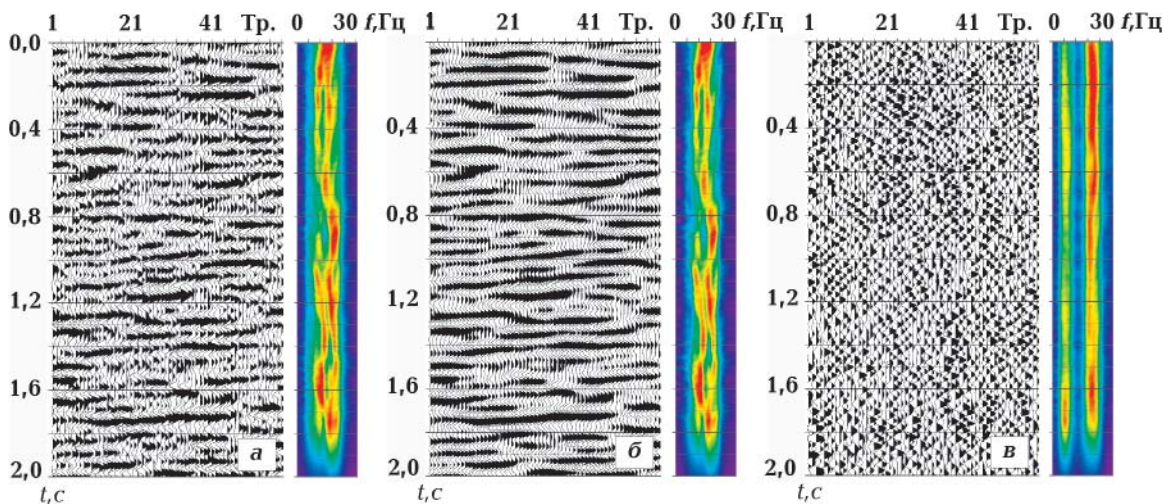


Рис. 2. Приклад видалення із сейсмічних записів хвиль-завад: *a* — початкові записи; *б* — цільові (очищені) записи; *в* — записи різношвидкісних хвиль-завад. Кольорові рисунки — вейвлет-спектр сейсмограми, усередненої за 60 трасами.

Fig. 2. An example of deletion of noise-waves from seismic records: *a* — initial seismic records, *б* — destination (clarified) seismic records, *в* — hetero-velocity noise waves. Colored pictures — wavelet spectrum of the seismogram averaged from 60 traces.

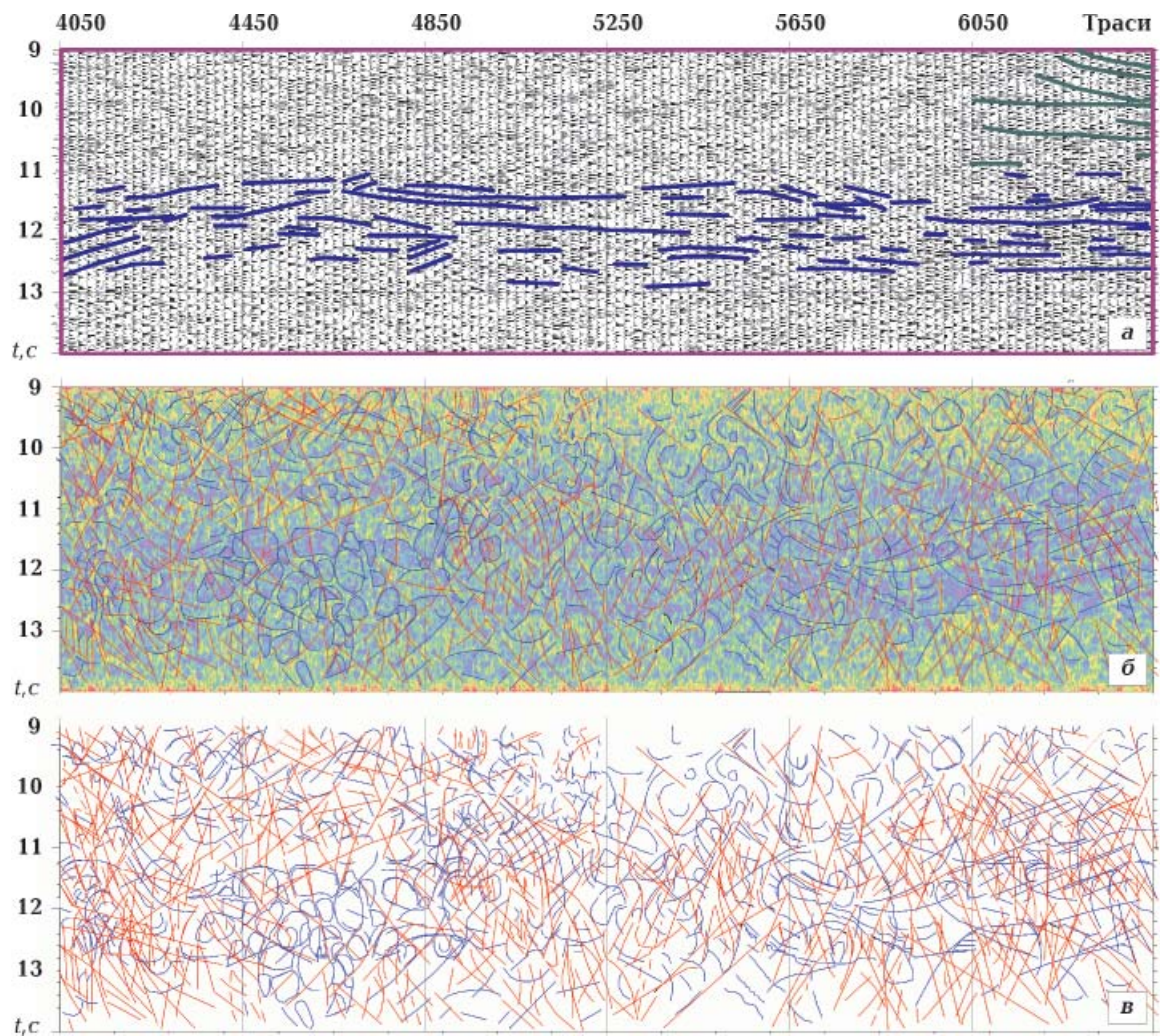


Рис. 3. Ділянка сейсмічного профілю СГТ, що обведена фіолетовим прямокутником (див. рис. 1): *a* — вхідні сейсмічні дані з осями синфазності від межі Мохо (сині лінії) і високошвидкісного тіла (зелені лінії); *б* — часовий розріз ЛДЗ з відображенням геологічної будови межі Мохо; *в* — розломно-блокова структура переходу кора—мантія. Червоні лінії — розломи, сині — відбивні межі геологічних горизонтів.

Fig. 3. Selected area of seismic CDP profile is contoured by violet rectangle (fig. 1): *a* — input seismic data with marked axes of phase synchronism from the Moho discontinuity (blue lines) and high-velocity body (green lines); *б* — temporal section of LDE with displaying of geological structure of the Moho discontinuity; *в* — fault-blocky structure of the crust-mantle transition. Red lines — faults, blue ones — reflecting borders of geological horizons.

різних порід. Потужність меланжу — від сотень метрів до декількох кілометрів.

Розлом, сформований без зміщення, але з простором між блоками, називають *відкритою тектонічною тріщиною*. Міжблоковий простір зазвичай заповнений породами, витісненими з глибини, або туди проникають розплавлені інтрузивні магматичні породи.

Тектонічні брекчії, меланж, цемент, інтрузивні магматичні породи, як правило,

мають аномальні фізичні властивості порівняно з фізичними властивостями блоків, що їх оточують. Зазначене обов'язково відображається у динаміці зміни спектрального складу сейсмічних записів. Наявність міжблокового заповнювача і літологічні відмінності метаморфізованих порід дають змогу виділяти розломні зони за сейсмічними даними ЛДЗ на великих глибинах. Розломи в часовому полі ЛДЗ мають вигляд протяжних нахилених лінійних

(або криволінійних) структур завдовжки у декілька кілометрів.

Будова ділянки межі Мохо за даними ЛДЗ. За алгоритмом розв'язання оберненої динамічної задачі із визначення ЛДЗ було опрацьовано центральну ділянку профілю СГТ, яка знаходиться під Зуївською антикліналю, Чистяково-Сніжнянською синкліналю, Головною антикліналю і частково Боково-Хрустальською синкліналю ДСС. Загальна довжина ділянки — 42 км. Умовний центр знаходиться південніше Головної антиклиналі Донбасу на глибині близько 40 км. Обрана ділянка обмежена фіолетовим прямокутником у межах 70,85—112,65 км профілю за горизонталлю, час $t = 9 \div 14$ с за вертикаллю (рис. 3).

У публікаціях [Maystrenko et al., 2003, 2007] часовий проміжок 11—13 с визначено як межу Мохо (див. рис. 1). Вона відображається у вигляді серії практично горизонтальних відбивних меж під фундаментом нижньої кори (див. рис. 3, а). Товщина цієї межі — близько 5 км. Північніше Головної антиклиналі на часі 9—11 с виділено ділянку (зелені лінії), яка належить високошвидкісному тілу [Maystrenko et al., 2007].

На рис. 3 показано результат розв'язку оберненої динамічної задачі із визначення ЛДЗ у зоні переходу нижня кора—верхня частина мантії. На відміну від кінематики (геологічні горизонти зображені у вигляді просторово-протяжних кореляційних осей синфазності відбитих хвиль) динаміка відображує геологічний розріз, в якому враховано просторові фізико-геологічні властивості порід. Це суттєво збільшує інформативність, в основному, за рахунок вияву складних за формою і морфологією геологічних об'єктів, які сформували хвильове поле. Як правило, врахування різних поглинальних властивостей складових однієї геологічної структури дає змогу відтворити (проінтерпретувати) їхню будову з високою роздільною здатністю на великих глибинах. У кінематичних задачах амплітуда коливання також є дуже важливим ідентифікувальним атрибутом — відсутність чітких відбиттів означає відсутність

зміни властивостей середовища. Однак під час проходження фронту сейсмічної хвилі через гірські породи *обов'язково* відбуваються зміни у спектральному складі сейсмічної хвилі за певних умов, як зазначено вище, навіть за підвищення енергії високочастотної складової. Отже, фізична основа методу ЛДЗ полягає у швидкій просторовій зміні частотного наповнення хвильового сейсмічного поля.

Розріз ЛДЗ за даними методу СГТ і картування зсувних розломів й тріщин з міжблоковим заповненням обчислювали на всій обраній ділянці (2400 трас — 42 км) у часових проміжках 9—11, 10—12, 11—13, 12—14 с. У такий спосіб забезпечувались перекриття й незалежне виділення контурів відбивних поверхонь і розломів з виключенням фактора суб'єктивізму.

З геодинамічної позиції цю територію можна поділити на дві рівні ділянки, будова яких принципово різниться. Лінія поділу проходить приблизно на 91,5-му кілометрі профілю. Для лівої частини характерна блокова, сильно розконсолідована поверхня межі Мохо. Ця частина, можливо, зазнала впливу двох явищ — мантійного діапїризму [Lyngsie, 2007] і пізнішого горизонтального стискання. В центрі цієї частини профілю, на часі 9—10 с, залягає монолітний блок, під яким розміщується, ймовірно, нестиснений діапїр з проявами купольної складки [Полянский и др., 2016]. По обидва боки блока об'єкти (або їхні залишки) також мають діапїроподібну будову. В межах Донбасу мінімальна товщина кори становить близько 15 км [Maystrenko et al., 2003], тому тут можливі прояви мантійного діапїризму [Соллогуб и др., 1977; Чекунов, 1997].

У правій частині рис. 2, а зображено ділянку профілю, в межах якої також помітні наслідки сил стискання, однак тут вони не зруйнували межу, а лише виявились у формуванні складчастих структур. Гірські породи межі Мохо мають шарувату структуру і утворюють прогин з невеликими кутами піднімання його країв. Така відмінність у геологічній будові пояснюється наявністю під межею Мохо монолітних мантій-

них блоків ($t=12,5\div 14,0$ с; $x=90\div 112,9$ км). Детальну розломно-блокову будову бачимо на рис. 2, б, де зображено контури діапироподібних об'єктів, складчастих структур і систему розломів, які формували складні геодинамічні явища, що відбувались у корі.

Висновки. Наведено результати застосування методу з визначення логарифмічних декрементів згасання даних глибинного розрізу СГТ. Основне завдання — відтворити розломно-блокову будову геологічних об'єктів, що розміщуються на великих глибинах. Дані ЛДЗ мають високу роздільну здатність, яка відповідає просторовій дискретності сейсмічних записів. Це дає змогу виділяти із часових даних ЛДЗ об'єкти складної форми. Зокрема, у будові межі Мохо виявляються складки стискання, насуви та характерні куполоподібні структури, які, можливо, пов'язані з мантійним діапиризмом.

Розломи, що утворились на глибинах переходу кора—мантія, мають регіональний характер, безпосередньо впливають на

блокову будову кори і формують Донецьку складчасту споруду. Загалом, за даними ЛДЗ спостерігаються два різні механізми формування середньої і нижньої кори під цією спорудою. У південно-західній частині переважали магматизм і стискання, у північно-східній — сили стискання з незначним проявом міжпластового магматизму і формуванням високошвидкісного тіла.

Поєднання двох сейсмічних методик з вивчення глибинної будови Землі дає змогу отримати і об'єднати фізичні властивості геологічних об'єктів з їх розломно-тріщинуватою структурою, формою та глибинним розміщенням.

Подяка. Автор висловлює особливу подяку ДГП «Укргеофізика» і, зокрема, заступнику генерального директора А.П. Толкунову за надану можливість використовувати сейсмічні матеріали профілю DOBREFraction2000 для вирішення наукових завдань і за неоціненний внесок у сприяння розвитку новітніх напрямів у вивченні глибинної будови території України.

Список літератури

- Гринь Д.М. Автоматизований спосіб визначення неузгодженого залягання геологічних горизонтів за тривимірними сейсмічними даними. *Геофиз. журн.* 2019б. Т. 41. № 6. С. 183—194. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190075>
- Гринь Д.М. Глибинна будова Ялинського насуву ЛДЗ за даними сейсмічного профілю DOBREFraction-2000. *Доп. НАН України.* 2020. № 2. С. 45—51. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.02.045>.
- Гринь Д.М. Логарифмічні декременти та інші функції згасання сейсмічних хвиль. *Геофиз. журн.* 2001. Т. 23. № 4. С. 91—102.
- Гринь Д.М. Методика визначення просторового поширення малоамплітудних розломів і тріщин у тонкошаруватому вуглевмісному геологічному середовищі. *Геофиз. журн.* 2019а. Т. 41. № 5. С. 234—249. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i5.2019.183644>.
- Гринь Д.М. Часові розрізи логарифмічних декрементів згасання тонкошарового середовища: *Сб. трудов III Междунар. научн.-техн. конф. «Горная геология, геомеханика и маркшейдерия».* Донецк, 2011.
- Гринь Н.Е. Исследование структуры и свойств среды по динамике сейсмических волн. Киев: Наук. думка, 1979. 214 с.
- Полянский О.П., Ревердатто В.В., Бабичев А.В., Свердлова В.Г. Механизм подъема магмы через «твердую» литосферу и связь мантийного и корового диапиризма: численное моделирование и геологические примеры. *Геология и геофизика.* 2016. Т. 57. № 6. С. 1073—1091. doi: 10.15372/GiG20160601.
- Сологуб В.Б., Бородулин М.И., Чекунов А.В. Глубинная структура Донбасса и сопредельных регионов. *Геол. журн.* 1977. № 2. С. 15—22.
- Степанов А.В. Обработка сейсмических данных: учебно-методическое пособие к курсам повышения квалификации. Казань: Изд. Казан. ун-та, 2013.
- Тяпкин Ю.К., Шадура А.Н., Роганов В.Ю. Непрерывная во времени оценка поглощения

- волн в масштабе сейсмической трассы. *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 3. С. 40—53. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i3.2011.116924>.
- Чекунов А.В. К геодинамике Днепровско-Донецкой рифт-синеклизы. *Геофиз. журн.* 1994. Т. 16. № 3. С. 3—17.
- Grad, M., Gryn, D., Guterch, A., Janik, T., Keller, R., Lang, R., Lyngsie, S.B., Omelchenko, V., Starostenko, V.I., Stephenson, R., Stovba, S., Thybo, H., & Tolkunov, A. (2003). DOBREfrac99" — velocity model of the crust and upper mantle beneath the Donbas Folder (East Ukraine). *Tectonophysics*, 371(1-4), 81—110. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00211-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00211-7).
- Lyngsie, S.B., Thybo, H., & Lang, R. (2007). Rifting and lower crustal reflectivity: A case study of the intracratonic Dniepr-Donets rift zone, Ukraine. *Journal of Geophysical Research*, 112, B12402. <https://doi.org/10.1029/2006JB004795>.
- Maystrenko, Y., Bayer, U., & Gajewski, D. (2007). Strain Localisation during Basin Inversion in the North German Basin and the Donbas Fold Belt: *Conference: 2007 DGMK/OeGEW spring meeting of the exploration and production department, Celle (Germany), 26/4/27 Apr 2007*.
- Maystrenko, Y., Stovba, S., Stephenson, R., Bayer, U., Menyoli, E., Gajewski, D., Huebscher, C., Rabbel, W., Saintot, A., Starostenko, V., Thybo, H., & Tolkunov, A. (2003). Crustal-scale pop-up structure in cratonic lithosphere: DOBRE deep seismic reflection study of the Donbas fold belt, Ukraine. *Geology*, 31(8), 733—736. <https://doi.org/10.1130/G19329.1>
- Menyoli, E., Gajewski, D., & Hiibscher, C. (2004). Imaging of complex basin structures with the common reflection surface (CRS) stack method. *Geophysical Journal International*, 157(3), 1206—1216. doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02268.X.
- Starostenko, V.I., Janik, T., Yegorova, T., Farfuliak, L., Czuba, W., Środa, P., Lysynchuk, D., Thybo, H., Artemieva, I., Sosson, M., Volfman, Y., Kolomiyets, K., Omelchenko, V., Gryn, D., Guterch, A., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., & Tolkunov, A. (2015). Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian Platform: the DOBRE-5 profile across the northwestern Black Sea and the Crimean Peninsula. *Geophysical Journal International*, 201, 406—428. doi:10.1093/gji/ggv018.
- Starostenko, V., Janik, T., Kolomiyets, K., Czuba, W., Środa, P., Lysynchuk, D., Grad, M., Kovács, I., Stephenson, R., Thybo, H., Artemieva, I.M., Omelchenko, V., Gintov, O., Kutas, R., Gryn, D., Guterch, A., Hegedűs, E., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., & Tolkunov, A. (2013). Seismic velocity model of the crust and upper mantle along profile PANCAKE across the Carpathians between the Pannonian Basin and the East European Craton. *Tectonophysics*, 608, 1049—1072. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.07.008>.
- Starostenko, V., Janik, T., Lysynchuk, D., Środa, P., Czuba, W., Kolomiyets, K., Aleksandrowski, P., Gintov, O., Omelchenko, V., Komminaho, K., Guterch, A., Tiira, T., Gryn, D., Legostaeva, O., Thybo, H., & Tolkunov, A. (2013b). Mesozoic(?) lithosphere-scale buckling of the East European Craton in southern Ukraine: DOBRE-4 deep seismic profile. *Geophysical Journal International*, 195(2), 740—766. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt292>.

Fault-blocky structure of the Moho boundary under the central part of the Donets folded structure (along the line of the seismic profile DOBReflection2000)

D.M. Gryn, 2020

S. I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

A possibility to reconstruct the fault-blocky structure of geological objects according to the results of solving the inverse dynamic problem of seismic is under consideration in the paper. The initial are seismic data of the deep section of CDP obtained by SGE «Ukrgeophysics», on the profile DOBReflection-2000. The solution is the temporal seismic profile of extinction decrements (LDE) with high space ability. Despite the weak amplitude of reflection at great depths the change of spectral composition of the seismograms allow to select their contours and fault zones filled with mantle breccia or other filling material.

As of today the method of deep seismic sounding (DSS) is the principal method of the studies of the upper part of lithosphere. The velocity models of the Earth's crust and the upper mantle are plotted using hodographs of reflected waves from geological discontinuities. According to these models we have the regularities of velocity change with depth. Still the insufficient spatial and temporal divided ability does not allow recognizing and mapping the distribution of deep faults.

Starting from the 80th of the former century for the studies of the deep structure a method of observation of reflected (almost vertical) waves in the area close to the source of seismic waves using SDP technologies began to be used. Seismic section obtained with this method is based on repeated summation of the records from different seismic receivers allowing amplification of the ratio signal-noise considerably. It makes possible to register the seismic waves propagating to much more depths than the extent of observation system located on the surface. Such sections are called deep section (CDP). They have the information on the reflection with arrival time on the surface from 30 s and more. Seismic records of CDP have wider frequency range than the DSS method that is important for solving the inverse dynamic problems.

Conducting in the same territory of seismic studies with different deep methods CDP and DSS and interconnection of their results is of great importance for explanation of origin of oil and gas-bearing capacity of definite areas from the viewpoint of detailed deep structure.

Keywords: fault, Moho discontinuity, the Earth crust, logarithmic decrement of extinction.

References

- Grin, D.M. (2019a). Automated method for determination of geological horizons nonconformity according to three-dimensional seismic data. *Geofizicheskiy zhurnal*, 41(6), 183—194. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190075> (in Ukrainian).
- Grin, D.M. (2020). Depth structure of the Yalynsky thrust of the Dnieper—Donets Basin according to the seismic profile DOBReflection-2000. *Dopovidi NAN Ukrayiny*, (2), 45—51. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.02.045> (in Ukrainian).
- Grin, D.M. (2001). Logarithmic decrement and other features attenuation of seismic waves. *Geofizicheskiy zhurnal*, 23(4), 91—102 (in Ukrainian).
- Grin, D.M. (2019b). Methods for determination of spatial distribution of minor-amplitude faults and fissures in thin-layer coal-bearing geological medium. *Geofizicheskiy zhurnal*, 41(5), 234—249. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i5.2019.183644> (in Ukrainian).
- Grin, D.M. (2011). Time sections of logarithmic

- decrements of extinction of a thin-layer medium: *Proc. of the III International Scientific and Technical Conference «Mining Geology, Geomechanics and Mine Surveying»*. Donetsk (in Ukrainian).
- Grin, N.E. (1979). *Study of the structure and properties of the medium by the dynamics of seismic waves*. Kiev: Naukova Dumka, 214 p. (in Russian).
- Polyansky, O.P., Reverdatto, V.V., Babichev, A.V., & Sverdlova, V.G. (2016). The mechanism of magma ascent through the «solid» lithosphere and relation between mantle and crustal diapirism: numerical modeling and natural examples. *Geologiya i geofizika*, 57(6), 1073—1091. doi: 10.15372/GiG20160601 (in Russian).
- Sollogub, V.B., Borodulin, M.I., & Chekunov, A.V. (1977). Deep structure of Donbass and adjacent regions. *Geologicheskij zhurnal*, (2), 15—22 (in Russian).
- Stepanov, A.V. *Seismic data processing: teaching aid for advanced training courses*. Kazan: Kazan University Publishing House (in Russian).
- Tyapkin, Yu.K., Shadura, A.N., & Roganov, V.Yu. (2011). Continuous in time evaluation of wave absorption in the scale of a seismic trace. *Geofizicheskij zhurnal*, 33(3), 40—53. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i3.2011.116924> (in Russian).
- Chekunov, A.V. (1994). Geodynamics of the Dnieper-Donetsk rift-syneclise. *Geofizicheskij zhurnal*, 16(3), 3—17 (in Russian).
- Grad, M., Gryn, D., Guterch, A., Janik, T., Keller, R., Lang, R., Lyngsie, S.B., Omelchenko, V., Starostenko, V.I., Stephenson, R., Stovba, S., Thybo, H., & Tolkunov, A. (2003). DOBREfrac99" — velocity model of the crust and upper mantle beneath the Donbas Folder (East Ukraine). *Tectonophysics*, 371(1-4), 81—110. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00211-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00211-7).
- Lyngsie, S.B., Thybo, H., & Lang, R. (2007). Rifting and lower crustal reflectivity: A case study of the intracratonic Dniepr-Donets rift zone, Ukraine. *Journal of Geophysical Research*, 112, B12402. <https://doi.org/10.1029/2006JB004795>.
- Maystrenko, Y., Bayer, U., & Gajewski, D. (2007). Strain Localisation during Basin Inversion in the North German Basin and the Donbas Fold Belt: *Conference: 2007 DGMK/OeGEW spring meeting of the exploration and production department, Celle (Germany)*, 26—27 Apr 2007.
- Maystrenko, Y., Stovba, S., Stephenson, R., Bayer, U., Menyoli, E., Gajewski, D., Huebscher, C., Rabbel, W., Saintot, A., Starostenko, V., Thybo, H., & Tolkunov, A. (2003). Crustal-scale pop-up structure in cratonic lithosphere: DOBRE deep seismic reflection study of the Donbas fold belt, Ukraine. *Geology*, 31(8), 733—736. <https://doi.org/10.1130/G19329.1>
- Menyoli, E., Gajewski, D., & Hiibscher, C. (2004). Imaging of complex basin structures with the common reflection surface (CRS) stack method. *Geophysical Journal International*, 157(3), 1206—1216. doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02268.X.
- Starostenko, V.I., Janik, T., Yegorova, T., Farfuliak, L., Czuba, W., Środa, P., Lysynchuk, D., Thybo, H., Artemieva, I., Sosson, M., Volfman, Y., Kolomiyets, K., Omelchenko, V., Gryn, D., Guterch, A., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., & Tolkunov, A. (2015). Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian Platform: the DOBRE-5 profile across the northwestern Black Sea and the Crimean Peninsula. *Geophysical Journal International*, 201, 406—428. doi:10.1093/gji/ggv018.
- Starostenko, V., Janik, T., Kolomiyets, K., Czuba, W., Środa, P., Lysynchuk, D., Grad, M., Kovács, I., Stephenson, R., Thybo, H., Artemieva, I.M., Omelchenko, V., Gintov, O., Kutas, R., Gryn, D., Guterch, A., Hegedűs, E., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., & Tolkunov, A. (2013). Seismic velocity model of the crust and upper mantle along profile PANCAKE across the Carpathians between the Pannonian Basin and the East European Craton. *Tectonophysics*, 608, 1049—1072. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.07.008>.
- Starostenko, V., Janik, T., Lysynchuk, D., Środa, P., Czuba, W., Kolomiyets, K., Aleksandrowski, P., Gintov, O., Omelchenko, V., Komminaho, K., Guterch, A., Tiira, T., Gryn, D., Legostaeva, O., Thybo, H., & Tolkunov, A. (2013b). Mesozoic(?) lithosphere-scale buckling of the East European Craton in southern Ukraine: DOBRE-4 deep seismic profile. *Geophysical Journal International*, 195(2), 740—766. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt292>.

Разломно-блоковое строение границы Мохо под центральной частью Донецкого складчатого сооружения (по линии сейсмического профиля DOBReFlection2000)

Д.Н. Гринь, 2020

Институт геофизика им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина

Рассмотрена возможность воспроизводить разломно-блоковую структуру геологических объектов по результатам решения обратной динамической задачи сейсмологии. Входными являются сейсмические данные глубинного разреза, полученные ДПП «Укргеофизика» по методу общей глубинной точки (ОГТ) на профиле DOBReFlection-2000. Решение — временной сейсмический профиль логарифмических декрементов затухания с высоким пространственным разрешением. Несмотря на слабую амплитуду отражения на больших глубинах, за изменениями в спектральном составе сейсмограмм можно выделять их контуры и разломные зоны, заполненные мантийной брекчией или другим веществом.

На сегодня метод глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) — основной сейсмический метод изучения строения верхней части литосферы. По годографам отраженных волн от геологических границ строят скоростные модели земной коры и верхней мантии. По этим моделям определяют закономерности изменения скорости распространения сейсмических волн с глубиной. Однако недостаточная пространственная и временная разрешающая способность не позволяет выявлять и картировать простирающиеся глубинные разломы.

С 1980-х годов для изучения глубинного строения начали использовать методику наблюдения за отраженными волнами (почти вертикальными) в зоне, близкой к источнику сейсмических волн, по технологии методов отраженных волн (МОВ) и ОГТ. Сейсмический разрез, полученный таким методом, базируется на многократном суммировании записей от разных сейсмоприемников, что обеспечивает существенное усиление соотношения сигнал-помеха, а следовательно, регистрацию сейсмических волн, распространяющихся на глубину, значительно превышающую протяженность системы наблюдения, расположенной на земной поверхности. Такой разрез называют глубинным разрезом ОГТ. Он несет информацию об отражении со временем прихода волн на поверхность от 30 с и более. Сейсмические записи ОГТ имеют более широкий частотный диапазон, чем в методе ГСЗ, что важно для решения обратных динамических задач.

Проведение сейсмических работ на одной территории различными глубинными методами ОГТ и ГСЗ и комплексирование их результатов имеют важное значение для объяснения нефтегазоносности отдельных регионов с позиции детальной глубинного строения.

Ключевые слова: разлом, граница Мохо, земная кора, логарифмический декремент затухания.