

Методика визначення просторового поширення малоамплітудних розломів і тріщин у тонкошаруватому вуглевмісному геологічному середовищі

Д. М. Гринь, 2019

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Надійшла 3 листопада 2019 р.

Рассмотрен вопрос об определении местоположения разломов и трещин в геологической среде, которые возникают в процессе формирования основных типов геологических структур: сдвигов, надвигов, сбросов, грабенов, осей складок и зон сжатия. В качестве исходных данных использованы площадные сейсмические записи общей глубинной точки МОГТ 3D, полученные на шахтном поле шахты "Краснолиманская" (Донецкая обл.). Поле находится на моноклинали юго-западной части Кальмиус-Торецкой котловины, висячем крыле Центрального надвига с амплитудой до 310 м. Моноклинали залегание пород усложнено большим количеством дизъюнктивных нарушений типа сброс с амплитудами до 95 м. Основной маркер для идентификации разлома на сейсмических записях МОГТ 3D в условиях горизонтально-слоистой среды — прерывание и (или) смещение оси синфазности отраженных сейсмических волн. В некоторых случаях в месте разрыва горизонта возникает дифрагированная волна. Однако при сложной геологии установить малоамплитудные смещения и несогласное залегание отражающих границ, связанные с разломами, не представляется возможным. Для пространственного определения положения разломных структур предлагается использовать результаты решения обратной задачи сейсмоки — логарифмические декременты затухания (ЛДЗ), методика вычисления которых предложена автором статьи ранее. Временные разрезы ЛДЗ имеют такую же разрешающую способность как и сейсмические данные МОГТ 3D. Временная дискретность равна 0,002 с., пространственная — 10 × 10 м. Такая детальность позволяет выделять малоамплитудные нарушения, связанные с разломами и трещинами. Особенность временных данных ЛДЗ заключается в том, что идентификатором несогласного залегания отражающих границ выступают их поглощающие свойства. Приведены примеры вертикальных и горизонтальных срезов ЛДЗ сейсмического куба 3D, на которых прослеживаются большое количество глубинных и поверхностных разломов. С учетом сложности картирования плоскости разломов в трехмерном пространстве предложен метод автоматического определения точки резкого изменения поглощающих свойств среды (на каждом из горизонтальных срезов куба 3D) с использованием вейвлет-анализа. Из таких точек создается матрица атрибутов, по которым отстраиваются плоскости разломов.

Ключевые слова: сейсмика, разлом, трещина, надвиг, шахтное поле, логарифмический декремент поглощения.

Вступ. Геологічне середовище, яке формувалося мільйони років, є надзвичайно складним за будовою і структурою. Причина очевидна — тектонічні процеси, які приводили до переміщення великих масивів земної кори. Як наслідок — утворен-

ня складчастих структур, розломних зон, зон виклинювання, насувів і скидів. У результаті постійного та дуже активного руху тектонічних блоків у просторі й часі сформувалася розгалужена сітка глибинних розломів і розривних зон, з якими по-

в'язано багато драматичних сторінок історії Землі та її мешканців.

Вивчення будови геологічного середовища, незалежно від кінцевої мети дослідження, потребує детального оконтурення консолідованих блоків та розконсолідованого середовища з розташуванням "павутини" розломів і тріщин, їх просторової дислокації та глибини поширення.

Елементарний розлом (розрив) складається із зміщених у просторі пластів, зони внутрішньопластових деформацій та подрібнених осадових порід з підвищеною тріщинуватістю і зміною фізичних властивостей. За глибиною поширення і розмірами розломи більші за тріщини. Тріщина (зона розривного порушення в осадових породах) — це просторовий геологічний об'єкт, довжина якого найчастіше набагато більша за ширину. Пошук і просторова локалізація (трасування) внутрішньоблокових розломів і тріщин є надзвичайно складним завданням. Це пов'язане із відстеженням місця їх зародження і просторового розростання, утворення нових тріщин та їх поступового зникнення. Ускладнювальним чинником є також наявність неглибоких місцевих розломів, які утворювалися під час формування складок, насувів, скидів, під впливом тектонічних процесів були розрізані давніми активними глибинними розломами.

Для геологічних наук розломи є геодинамічним літописом, що дає змогу відтворювати історію формування Землі упродовж сотень мільйонів років. Розломи — це також шляхи міграції вуглеводнів до нафтогазових пасток, в яких формуються родовища нафти і газу. Проте для вугледобувної промисловості розломи та пов'язані з ними скиди й насиви є надзвичайно серйозною проблемою і небезпекою. Якщо шахтне поле складається з порід, розуцільнених розломами, то трапляються часті обвали, заводнення та загазованість. Шахти вимушені витратити мільйони гривень на укріплення розломних зон, через які проходять гірничі виробки, встановлювати системи контролю появи метану, визначати місця його скупчення, вжи-

вати інші запобіжні заходи [Si et al., 2015]. Над розв'язанням зазначених проблем працюють провідні наукові установи України, зокрема Інститут фізики гірських процесів НАН України, Національний гірничий університет, УкрНДМІ НАН України, Інститут геофізики НАН України.

У цій статті запропоновано методику визначення просторового поширення глибинних й приповерхневих розломних зон за результатами розв'язку оберненої динамічної задачі сейсміки — часових даних логарифмічних декрементів згасання (ЛДЗ) [Гринь, 2001 а, б, 2011]. Особливість методики полягає у високій роздільній здатності методу ЛДЗ, що відповідає просторовій та частотній роздільній здатності сейсмічного запису методом спільної глибинної точки (МСГТ). Застосування методу ЛДЗ дає змогу простежувати локальну зміну поглинальних властивостей середовища, пов'язаних з малоамплітудними розломами і міжблоковими зсувами та підземними шахтними об'єктами. Для розв'язання оберненої задачі як вхідний матеріал використовують сейсмічні дані МСГТ 3D, отримані ДПІ "Укргеофізика" на шахтному полі шахти "Краснолиманська".

У статті розглянуто шахтне поле, як складне геологічне тіло, де об'єктом вивчення є насиви, розломи і локальні тріщинуваті зони, а також можливість їх коректного виділення у хвильовому сейсмічному полі. Визначення підземного розташування рукотворних об'єктів (за сейсмічними даними) та їх просторової прив'язки до найближчих розуцільнених зон є окремим напрямом дослідження можливостей часових даних ЛДЗ, який у статті не розглянуто. Як приклад наведено лише фрагменти горизонтальних зрізів 3D куба ЛДЗ з відображенням можливих підземних об'єктів.

Розломи й тріщини шахтних полів. Пошук розуцільнених зон, пов'язаних з розломами і тріщинами, є найприоритетнішим завданням вугільної геології. Зони розломів — основні постачальники метанових сумішей у шахту. Під час незначних тектонічних рухів природного або техногенного характеру відбувається вивільнення,

перерозподіл газів у геологічних горизонтах та накопичення у нових пастках. Ці процеси проходять постійно протягом мільйонів років, у результаті чого формуються родовища природного газу. В умовах вугільних басейнів під впливом урбаністичної діяльності людини процес міграції метану значно прискорюється. Як наслідок, підвищення його концентрації в шахті носить спонтанний, непрогнозований характер. Ситуація ускладнюється тим, що під час видобування вугілля з'являються нові пустоти (виробки), що спричинює розущільнення середовища і появу нових, не закартованих розломів, які, у свою чергу, є додатковими провідниками метану.

Метан стає вибухонебезпечним за його концентрації у повітрі 9—14 %. Особливо небезпечні раптові та непрогнозовані, тобто суфлярні, виділення метану. Газ, що виділяється під час суфлярних викидів, складається на 80—95% з метану з невеликим вмістом гелію [Вергельська та ін., 2011]. У шахті газовиділення триває від декількох годин до декількох років. Метан проникає із тріщин, пустот і розломів, які утворилися мільйони років тому, а також із тих, що виникли під час шахтних робіт унаслідок розгрузки пластів, перерозподілу внутрішньопластових тисків, просадки покрівлі. Суфляри геологічного походження генетично пов'язані з геологічними порушеннями (тріщинами, розломами). Їхні розміри збігаються з розмірами розконсолідованої частини порід в околі тріщини — від декількох десятків до декількох тисяч метрів. Зазвичай, ці порушення простягаються перпендикулярно до напрямку залягання вугленосних пластів. Розконсолідованість і тріщинуватість геологічного середовища залежать насамперед від його фізико-хімічних властивостей. Тому спостерігають прямий зв'язок між суфлярними виділеннями метану і літологічним складом порід. Вуглевмісні породи (аргіліти, пісковики, алевроліти) — тверді та крихкі, в них утворюється велика кількість тріщин, більше, ніж у вапняку — м'якому та еластичному, в якому, як правило, формуються каверни й пустоти. У тріщинах

і кавернах накопичується метан. На великих глибинах через високий тиск у геологічному середовищі малих (локальних) тріщин, через які тривалий час газ мігрував на земну поверхню, менше, ніж у верхній частині. Глибинні розломи мають регіональну протяжність і є провідниками газу з одних геологічних об'єктів в інші. Тому тривалість суфлярних викидів на великих глибинах може бути значною, з більшим та інтенсивнішим газовиділенням.

Шахтне поле шахти "Краснолиманська", яке є об'єктом дослідження входить до п'яти найбільших високопродуктивних і газоносних полів на Донбасі. Для безпечної роботи шахтарів на таких шахтах постійно здійснюють дегазацію вугільних пластів та інтенсивне провітрювання шахтних виробок [Кочерга и др., 2014; Si et al., 2015; Волкова, Шарина, 2016]. Незважаючи на всі зусилля, через неочікувані, суфлярні, викиди метану на шахті "Краснолиманська" траплялись аварії з вибухами метаноповітряної суміші та загибеллю шахтарів. Перша аварія сталась у 1959 р. під час будівництва шахти, на глибині 235 м, у 2001 р. — на глибині 750 м, у 2004 р. — на глибині 997 м, 2007 р. — на глибині 900 м, 2008р. — на глибині 845 м. 26 і 27 жовтня 2015 р. трапилась аварія з виділенням метану (внаслідок просідання гірського масиву) в ізольований відпрацьований простір 1-ї західної лави. Джерело займання метану — фрикційне тертя пісковика об пісковик у зонах геологічних порушень під час активізації тектонічних процесів [Минеев и др., 2016а, б].

Розташування шахти "Краснолиманська" і район проведення сейсмічних робіт. Ділянка робіт розташована у Добропільському та Покровському (Червоноармійському) районах Донецької області на території промислової діяльності вугільної компанії (ВК) "Краснолиманська".

Червоноармійський вугледобувний регіон знаходиться на монокліналі південно-західного крила Кальміус-Торецької улоговини. Поле шахти "Краснолиманська" розташоване у всячому крилі Центрального насуву з амплітудою до 310 м, який

є північно-західною межею шахтного поля. Моноклінальне залягання порід ускладнене диз'юнктивними порушеннями типу скидів з амплітудами до 95 м [Вегелянська, Провоторова, 2009; Вергельська, 2012; Король, Скобенко, 2013; Волкова, Шарина, 2016]. Шахтне поле перетинають великі скиди — Глибокоярський, Федорівський, Грачевський, Грушевський, а також менші за амплітудами скиди № 1, 5, 6, 12, 15, 19.

Сейсмічні дані. Згідно з рішенням Урядової комісії з розслідування причин та ліквідації наслідків аварії, яка сталася на Державному підприємстві ВК "Краснолиманська" 23.05.2008 р., ДГП "Укргеофізика" провело сейсмічні роботи методом СГТ за технологією площинних сейсмічних робіт (рис. 1). Матеріали сейсмозвідки 3D були підготовлені до інтерпретації партією обробки геофізичної інформації Технологічного центру ДГП "Укргеофізика". Розмір біну — 10 × 10 м. Куб 3D містить 152 траси за шириною та 361 трасу за довжиною, тобто спостереженнями покрито площу розміром 1,52 × 3,61 км, час запису — 1 с, дискретність за часом — 0,002 с. З метою підвищення роздільної здатності сейс-

мічних даних, отриманих у верхній частині сейсмічного розрізу, виконано польові експерименти (зниження енергії поверхневих хвиль-завад, а також оптимальної довжини розгортки зондувального сигналу, кількості накопичень, тривалості часу нарощування і спаду енергії збудження). Діапазон частот сейсмічних записів 30—120 Гц.

Дані, отримані на тонкошаруватому вуглевмісному середовищі з великою кількістю розломів і з підземними рукотворними шахтними об'єктами, є унікальними для України. Їх використовували і, напевно, використовуватимуть різні автори для відпрацювання методик виділення зон з підвищеним поглинанням як ознакою наявності розломів і місць накопичення метану.

Виділення розломів за сейсмічними хвильовими полями. Визначення місця розриву геологічного пласта розломом на сейсмічних записах за певних умов є надзвичайно складним завданням. У відносно спокійному сейсмічному полі від горизонтально-(або нахилено-) шаруватого середовища розломні структури проявляють-

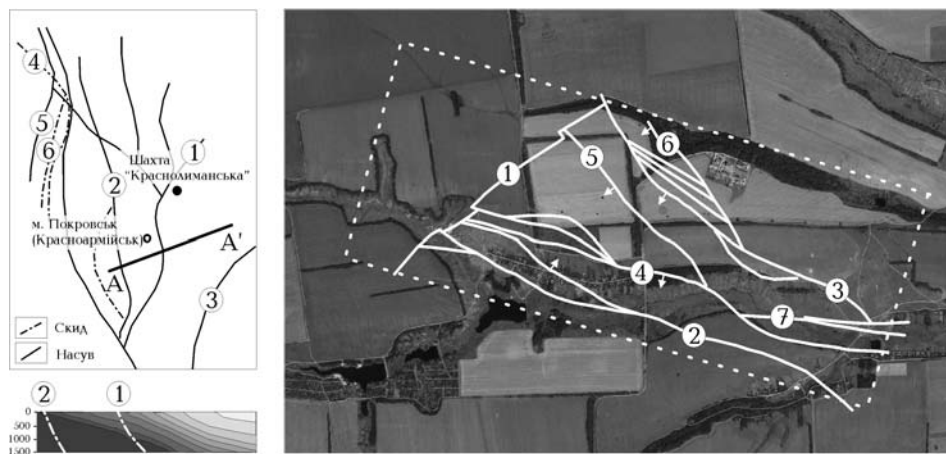


Рис. 1. Територія проведення сейсмічних робіт методом СГТ 3D (викопіровка плану гірничих виробок пласта І₃ шахти "Краснолиманська"): а — карта з основними розломомі навколо шахти "Краснолиманська" і геологічний розріз по лінії А—А': 1 — Центральний насуп, 2 — Красноармійський насуп, 3 — Селідовський насуп, 4 — Криворізько-Павлівський скид, 5 — Самарський насуп, 6 — Муравський скид; б — карта місцевості з відзначеною територією проведення сейсмічних робіт (білий пунктир) і основними структурами: 1 — Центральний насуп, 2 — Глибокоярський скид, 3 — Грачевський скид, 4 — Федорівський скид, 5 — скид № 6, 6 — скид № 5, 7 — Грушевський скид.

ся у вигляді часового зміщення осей синфазності хвиль однієї групи щодо іншої. Чим більша амплітуда такого зміщення, тим чіткіше проявляється розлом. У складних геологічних умовах, особливо у верхній частині розрізу, впевнено виділити розломні зони практично неможливо. Для їх цільового пошуку додатково застосовують різні методи обробки первинних сейсмічних записів. Достатньо детально описано критерії виділення зони розривних порушень з використанням кінематичних особливостей поведінки хвильового поля [Бахаревская, Бродов, 1967; Пузырев и др., 1985; Оболенцева, Клем-Мусатова, 1986; Ляховицкий, Невский, 1972], а також методи пошуку поєднанням кінематичного і динамічного аналізів [Тригубов и др., 1975; Многоволновые ..., 1987; Мушин и др., 2001; Довбнич, 2012; Мендрий, Тяпкин, 2012; Тяпкин и др., 2018].

У разі *вигбнутих хвиль* за наявності скидів з великою амплітудою швидко послаблюються коливання і з'являються подібні за формою коливання із зсувом за часом. Залежно від характеру і потужності зони порушень осі синфазності, що прослідковуються по обидва боки від зони, можуть перекриватися або утворюють нову зону відсутності зображення. На сейсмічних записах інколи проявляються годографи дифракційних хвиль із слабкою енергетикою і початком у місці розриву відбивного горизонту [Шерифф, Гелдарт, 1987; Zhou, Natherly, 2012]. У разі розриву товстого пласта з внутрішньодиференційованою структурою може утворюватися група швидко згасаючих хвиль однакової форми. Інколи реєструють хвилю, відбиту від нахиленої поверхні, яка утворена зоною розлому. Вісь синфазності такої хвилі круто нахилена.

При кореляції *заломлених хвиль* у разі вклинювання шарів і тектонічних порушень з'являються низькочастотні дифраговані хвилі, розриваються і зміщуються осі синфазності. Якщо джерело розміщується з боку піднятого крила скиду, то заломлена хвиля різко згасає і зникає. Біля розриву виникає хвиля з новою віссю синфазності, що зсунута у бік більших часів.

Якщо джерело розміщується в межах нахиленого крила скиду, то хвильова картина менш чітка: при цьому також відбувається розрив синфазності й за скидом з'являється нова вісь, зсунута у бік менших часів [Wang et al., 2017].

Багато сучасних програмних комплексів з інтерпретації сейсмічних даних використовують для пошуку розломів набір так званих атрибутів — певних закономірностей, що з'являються (за відсутності артефактів і шумів різної природи) у хвильових полях тільки за наявності тріщинуватих зон [Chopra, Marfurt, 2007; Мендрий, 2013; Qi et al., 2019]. На геологічно нескладних ділянках для вирішення таких завдань можливе використання методу конволюційної нейронної мережі, який шляхом перебору певних параметрів визначає наявність розлому і кут його нахилу [Wu et al., 2018].

Виділення тріщинуватих зон без горизонтального або вертикального зміщення геологічних пластів за сейсмічними хвильовими полями практично неможливе. Основна проблема виявлення аномалій, пов'язаних з розломами, полягає у тому, що горизонтальна дискретність проведення сейсмічних робіт (відстань між точками спостереження) і горизонтальні розміри розломів майже однакові (рис. 2). Значне ускладнення також зумовлене з вертикальною спрямованістю зони розуцільнення, що, в свою чергу, приводить до відсутності відбиття сейсмічних хвиль від неї.

Найдетальніші дані стосовно геологічної будови можна отримати за допомогою аналізу ядра свердловин та проведення каротажних робіт. Утім їхня просторова дискретність у складних геологічних умовах шахтних полів є недостатньою і просторове розміщення порушення таким методом виявити дуже складно. Через невелику кількість свердловин можлива некоректна інтерпретація даних і поява "штучних" розломів.

Підготовка сейсмічних даних СГТ 3D для обчислення 3D даних ЛДЗ. У сейсмічному хвильовому полі шахтного поля відображаються природні геологічні утворення та підземні об'єкти інфраструктури шах-

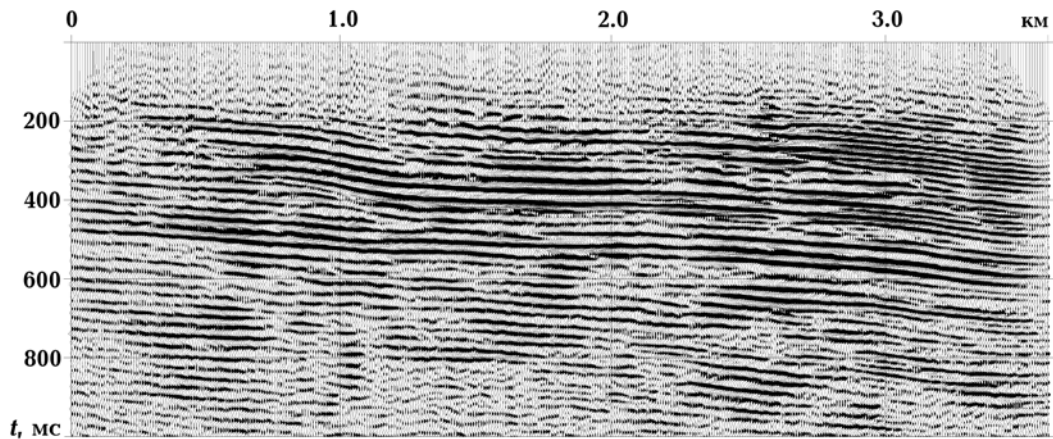


Рис. 2. Вертикальний часовий зріз сейсмічного хвильового поля 3D куба СГТ (профіль інлайн 80).

ти. Тунелі, штреки, системи вентиляції породжують на сейсмічних записах високочастотні об'ємні дифраговані хвилі (оскільки їх розміри співмірні з довжиною хвилі СВІП-сигналів), які ускладнюють і без того складне хвильове поле тонкошаруватого розломного середовища. З метою спрощення сейсмічних даних перед розв'язанням оберненої задачі для обчислення ЛДЗ тривимірного куба сейсмічних даних [Гринь, 2001 а, б, 2011] було проведено такі процедури.

По-перше, виконано просторово-частотну фільтрацію сейсмічних даних СГТ 3D. Вона полягала у видаленні високочастотної складової із сейсмограм у діапазоні 80—120 Гц, що пов'язана переважно з рукотворними підземними об'єктами і відображена у вигляді дрібних і локальних аномалій. У такий спосіб було спеціально зменшено роздільну здатність сейсмічних даних.

По-друге, використано модифікований скінченно-різницевий метод [Гринь, 2003] для видалення із сейсмічних записів хвиль завад різного походження і різної форми. Наприклад, це залишки низькошвидкісних недофільтрованих поверхневих хвиль (на початкових часах сейсмічних записів) або хвиль, що утворилися на клиноподібному розриві (ефект дифракції) відбивного горизонту та за різкої зміни його поглинальних властивостей.

На рис. 3, а зображено один з оброб-

лених поздовжніх профілів ЛДЗ 3D куба, які використовували для вивчення можливості виділення розломних зон у вуглевмісному шаруватому середовищі. На ньому позначено розломи протяжністю понад 300 м. У цілому після видалення високочастотної складової чіткіше проявилися регіональні особливості геологічної будови. Як бачимо на рис. 4, б, залишкове хвильове поле містить *виключно* хвилі-завади, які є результатом недостатнього очищення вхідних сейсмічних даних. Деякі автори, наприклад [Zhou et al., 2017], стверджують, що в місці дифракції виникають "згустки" енергії сейсмічних хвиль, які можна виявити і використовувати як ідентифікатори розломів.

Ідентифікація розломних зон за даними ЛДЗ. Виділення розуцільнених зон із часових сейсмічних розрізів МСГТ доволі суб'єктивне і залежить від досвіду та уяви інтерпретатора. Неточність пов'язана з тим, що в попередній обробці сейсмічних даних було застосовано процедури підсумовування, і, як результат, горизонтальна роздільна здатність сейсмічних записів суттєво зменшилася, а межі розломної зони розмилися. Отже, для розв'язання такого класу задач, бажано додатково обробляти дані з метою підвищення роздільної здатності сейсмічних записів (наприклад, розв'язання обернених задач), а вже потім проводити інтерпретацію.

Визначення дисипативних особливостей геологічного середовища відкриває перед інтерпретатором додаткові можливості щодо встановлення істинної геологічної картини в разі використання одного з важливих і інформативних параметрів середовища — поглинання. Крім загальної структурованості середовища за поглинальними властивостями (з точністю дискретизації сейсмічних даних) можна також відстежувати і деякі локальні структурні неузгодженості в горизонті, тобто різку зміну поглинальних властивостей в одному відбивному горизонті, які не проявляються у хвильовому полі, відбитого від нього.

Основне завдання під час пошуку розломних порушень — виявлення і трасування середньоамплітудних (зміщення 20—100 м) і малоамплітудних (зміщення 10—20 м) порушень, насувів. Крім того, становить інтерес фаціальне заміщення (випадіння) окремих пластів або пачок пластів, що зумовлює змінення тонкошаруватої структури розрізу по обидва боки від зони заміщення, вклинювання пластів або пачок.

З погляду просторової зміни дисипативних властивостей середовища основними ознаками для ідентифікації розломних структур можуть бути такі:

- розірваність відбивного горизонту (з однаковими поглинальними властивостями) і наявність тріщинозаповнювальних порід з відмінними фізичними властивостями породами між двома частинами суцільного пласта порід у минулому (рис. 4, а);
- зміщення розірваних частин горизонту на деяку відстань один від одного за глибиною залягання або наявність насувів, клиноподібних форм (рис. 4, б, в);
- заповнення значної частини розломної зони породами або газорідними сумішами, що приводить до утворення витягнутих аномалій, що продовжують напрямком просторового поширення розлому (рис. 4, г);
- корельованість тріщин на великих часових (глибинних) проміжках (рис. 4);
- площинне 3D підтвердження наявності

тріщин, тобто присутність розлому не тільки за часовою, а й за просторовою координатою (наявність на сусідніх трасах), і, як наслідок, — чітке відображення блокової геологічної структури.

Наявність поглинальних властивостей геологічного середовища з високою роздільною здатністю дає змогу автоматизувати процес пошуку "контрастних зон", у межах яких різко змінюється величина поглинання на невеликій відстані у просторі. На рис. 5 схематично зображено розірвані тектонічним рухом горизонти (зелений, жовтий, оранжевий) із зсувом. Отримано чотири варіанти поєднання горизонтів з різними фізичними властивостями. Найменш інформативний варіант 1 (зріз 1) — розрив не проявляється, хоча він існує. Варіант 4, відповідно, найінформативніший, оскільки поруч залягають горизонти з максимально відмінними поглинальними властивостями. У результаті диференціювання за простором отримаємо місця з різними за величиною відмінностями фізичних властивостей середовища. Точки з великою різницею можна вважати реперними точками, або вузлами. Пошук подібних вузлів на сусідніх трасах ЛДЗ зумовить появу сітки вузлів, які можуть бути початковим варіантом поширення розломів у просторі.

Наявність горизонтальних відбивних меж у верхній частині сейсмічного розрізу у поєднанні з наслідками тектонічних рухів окремих блоків (їх підняття або опускання) дає реальне уявлення про геологічну структуру: зони з проявами стискання й активного складкоутворення, зони суцільно блокові, місця розтріскування на дрібніші блоки (рис. 6).

На рис. 6 показано два горизонтальні зрізи куба ЛДЗ 3D (на часі 260 і 400 мс) і поєднаного з вертикальним зрізом 55-го інлайн профілю. На вертикальному профілі білою лінією показано можливі розломні зони. Місця перетину горизонтальних і вертикального зрізів куба відповідають чорній лінії на кожному профілі. Одночасний аналіз інформації про одну й ту саму точку, що відображена на двох площинах, до-

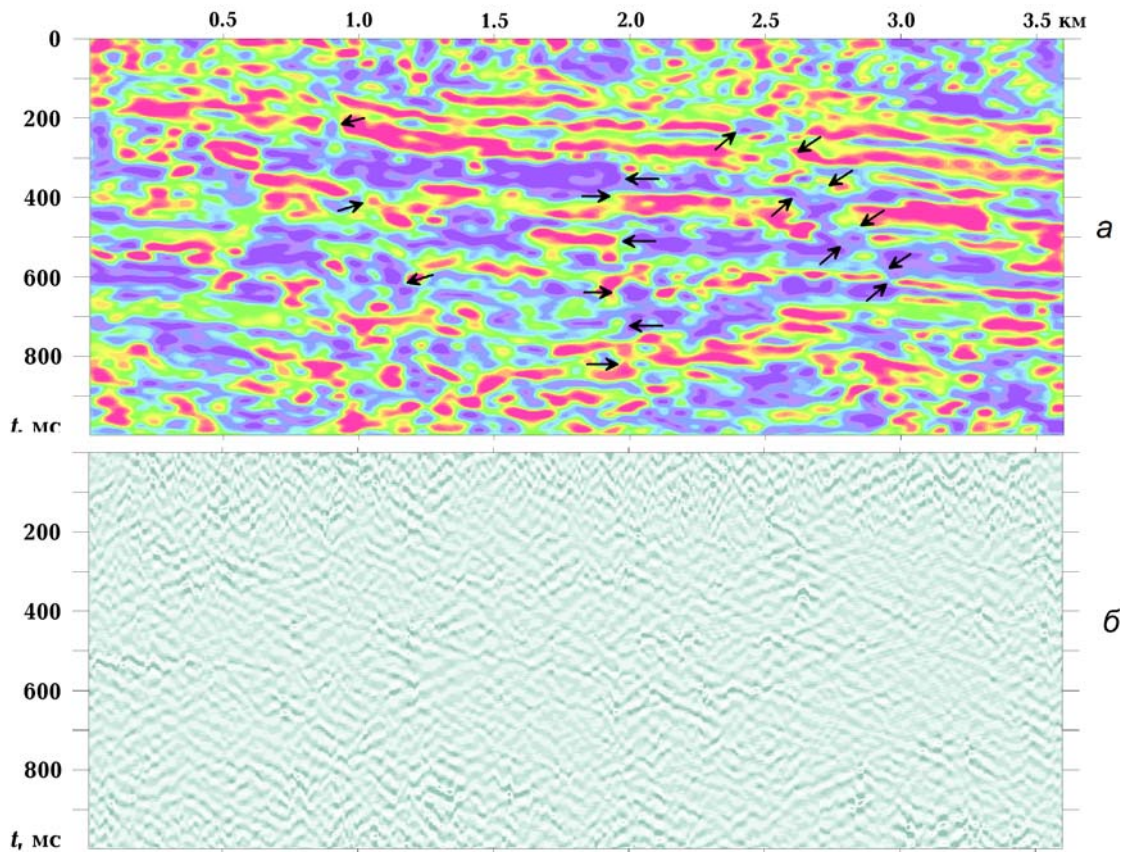


Рис. 3. Вертикальний часовий зріз 3D куба даних ЛДЗ (профіль інлайн 80): *a* — підготований до інтерпретації профіль із видаленим полем завад; *б* — залишкове поле.

повнює і конкретизує отриману інформацію. Зазначимо, що всі розломні зони мають геологічне пояснення. Чорними стрілками на зрізі 400 мс позначено прояв тріщини на двох площинах, який є наслідком опускання частини геологічного горизонту.

Еліпсами (рис. 7) оконтурено зону зміни фаціального складу породи, яка займає міжблоковий простір і є додатковим індикатором розлому. Наявність низького поглинання (червоні крапки) засвідчує теоретичну можливість тріщиноутворювальної породи бути провідником мета-

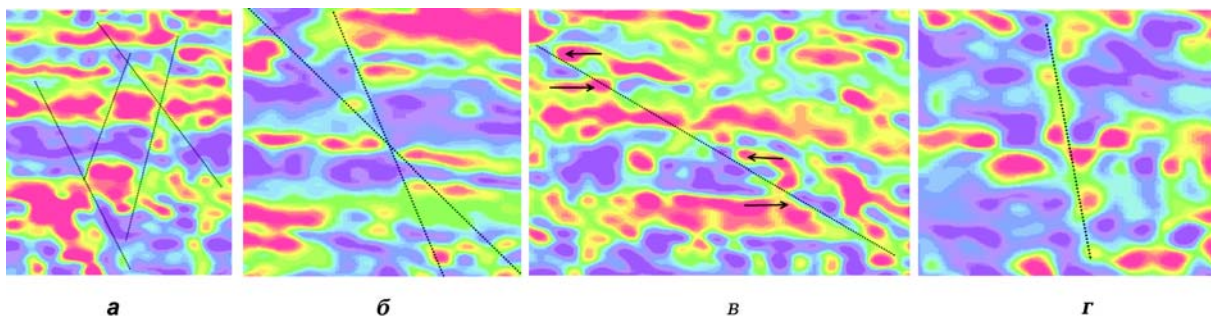


Рис. 4. Приклади ідентифікаторів розломних зон, які виділяють у геологічному середовищі за часовими розрізами ЛДЗ.

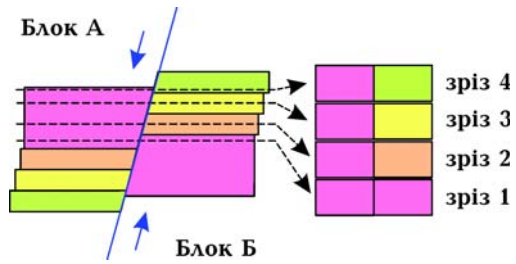


Рис. 5. Схематичне зображення можливих варіантів поєднання пластів з різними фізичними властивостями (для горизонтального і вертикального напрямків).

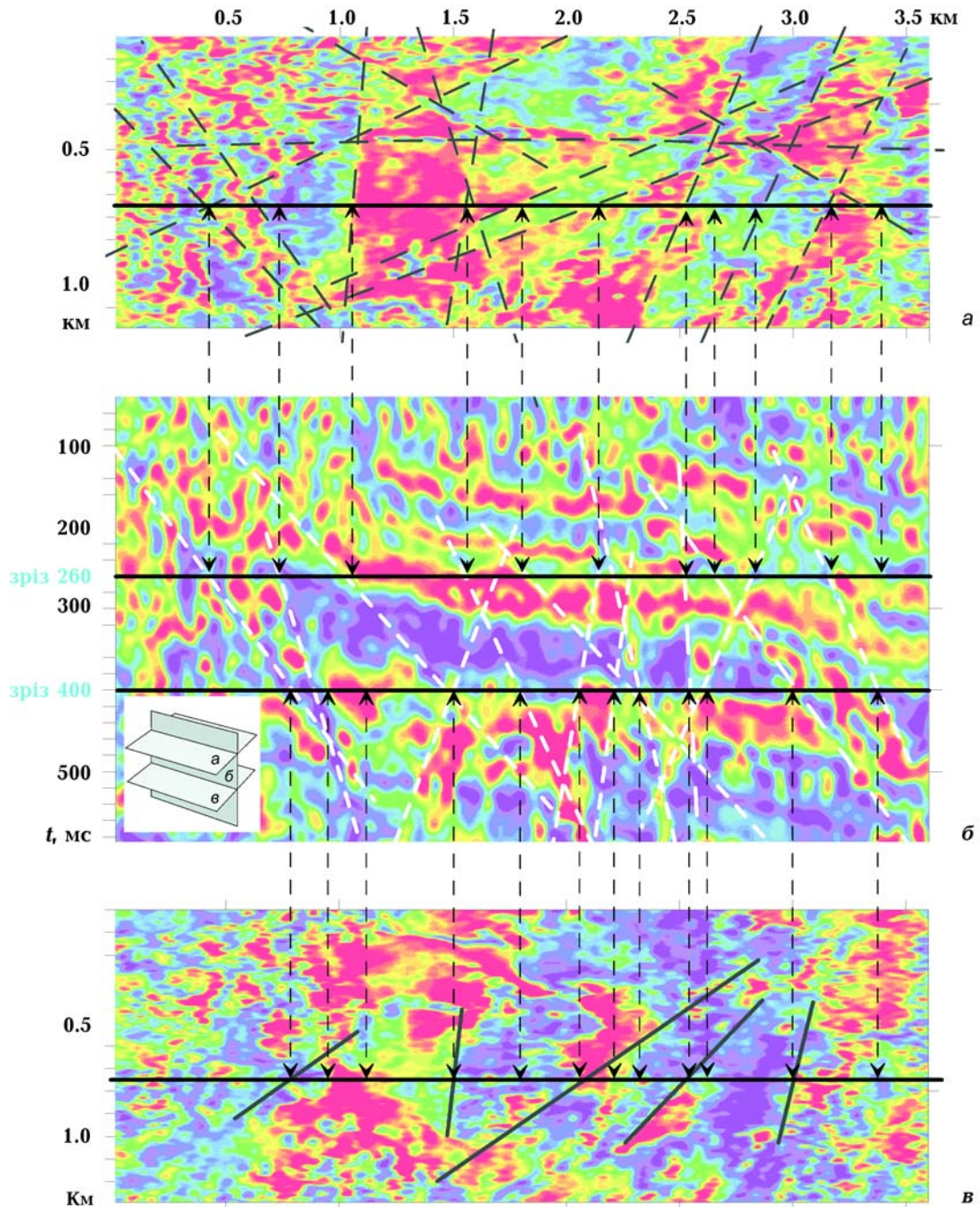


Рис. 6. Поєднання вертикального і горизонтального зрізів куба ЛДЗ 3D з поміченими точками розломних зон на верхній і нижній площинах.

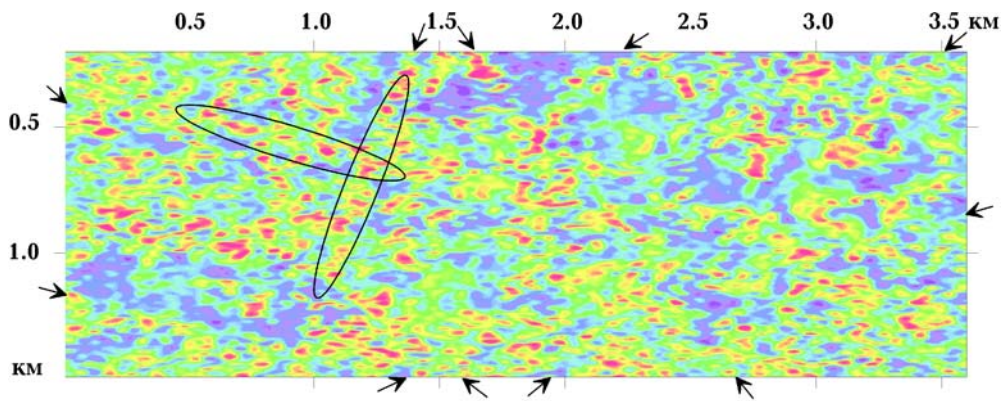


Рис. 7. Приклад блокової структури району досліджень в околі шахти "Краснолиманська", горизонтальний зріз куба 3D на часі 1 с (найбільша глибина).

ну із глибших горизонтів і пасток. Максимальний розмір лінійних розломів, які легко прослідковують на горизонтальному зрізі, сягає 2,5 км.

Відображення геологічної будова за даними ЛДЗ над шахтним полем. Верхня частина сейсмічного розу, як і нижня, під шахтними полями, найменше зазнала впливу

діяльності людини і зберегла свою первинну геологічну структуру. На рис. 8 зображено горизонтальні зрізи з часовим кроком за глибиною у 20 мс. Чітко бачимо всю шарувату структуру покривної товщі, участь розломів у формуванні складної будови скидів, насувів і зон стискання, поступову зміну за глибиною пластів

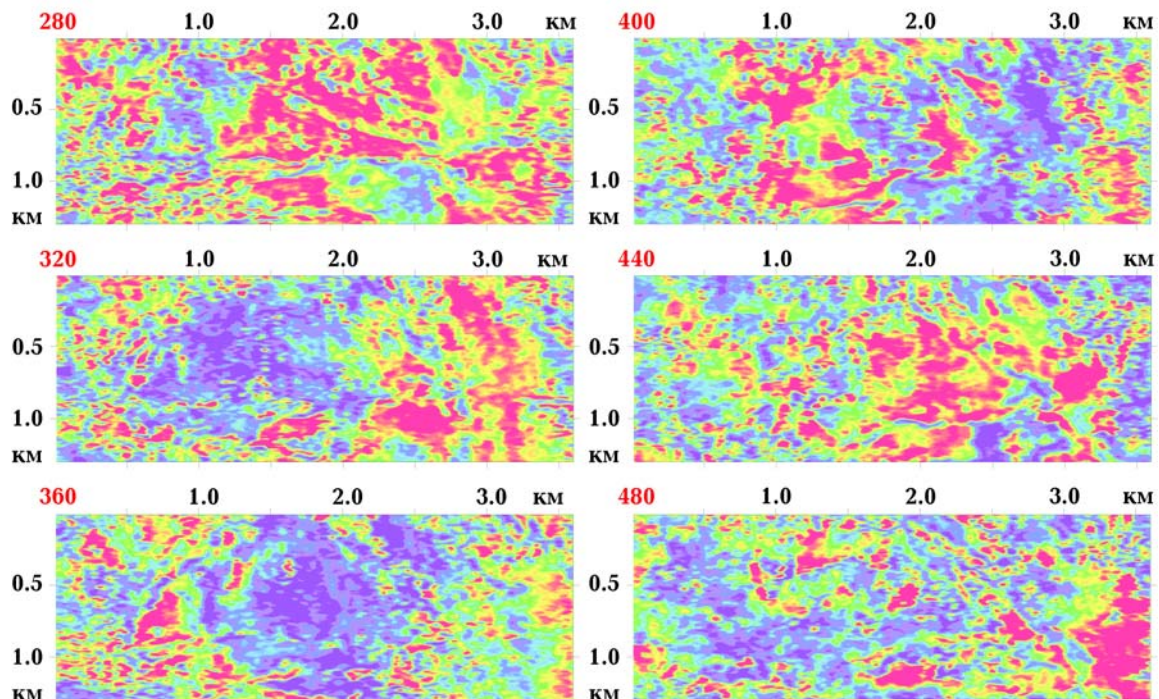


Рис. 8. Часові зрізи логарифмічних декрементів згасання, які демонструють зміну геологічної будови у вертикальному напрямку (за глибиною). Зрізи зроблено на часі, мс: 280, 320, 360, 400, 440, 480.

з великим поглинанням на геологічні пласти з малим поглинанням.

Відображення можливих підземних шахтних об'єктів за даними ЛДЗ. Основною ознакою підземних об'єктів, які можна вважати рукотворними, є правильні геометричні форми, велика просторова видовженість і певна закономірність у їх розташуванні та розгалуженості. Такі закономірності одночасно прослідковуються на 10—12 часових зрізах, що свідчить про їхні розміри у глибину. На рис. 9 показано приклади горизонтальних зрізів куба ЛДЗ 3D, на яких є аномалії хвильового поля, що утворилися, можливо, внаслідок наявності підземних конструкцій та елементів шахти. Так, на часовому зрізі 460 мс виділяються колоподібні об'єкти, характерні для вертикального стовбура шахти. Він чітко фіксується на зрізі 452 мс і набирає іншої форми на зрізі 528 мс. На зрізі 532 мс можна легко помітити відображення від двох груп тіл. Перша група — тіла хаотичної форми є результатом геологічних процесів складкоутворення і змінання середовища, друга група — тіла з чітким напрямком, великою довжиною (до одного кілометра), чітко структуровані. Вони проявляються в жовто-червоних відтінках, що відповідає великому поглинанню. Вуглевмісні поріди шахти "Краснолиманська" мають півден-

но-східний нахил, що спричинює відповідне сповзання високопоглинальних ділянок (з глибиною), які асоціюються з елементами конструкції шахти, в цьому самому напрямку.

Встановлення просторового розташування підземних об'єктів у хвильовому полі, де були виділені розломи та тріщинуваті зони, суттєво спрощує їх спільну ув'язку і робить безпомилковим встановлення точного місця перетину розломом шахтного тунелю та можливого місця викиду метану. Однак відсутність достовірної багаторівневої схеми виробок шахти на різних вуглевмісних пластах, на даний момент, унеможливує вирішення такого завдання.

Висновки. Оцінювання результатів обробки куба 3D за методом логарифмічних декрементів згасання показало таке.

1. Часові розрізи логарифмічних декрементів згасання значно інформативніші, ніж сейсмічні записи. Геологічний розріз, представлений у вигляді горизонтів з різними поглинальними властивостями детальніше і чіткіше відтворює реальну геологічну картину, що дає змогу відстежувати зміну поглинальних властивостей на певній незначній ділянці горизонту.
2. Роздільна здатність методу залежить від роздільної здатності сейсміки. Чим

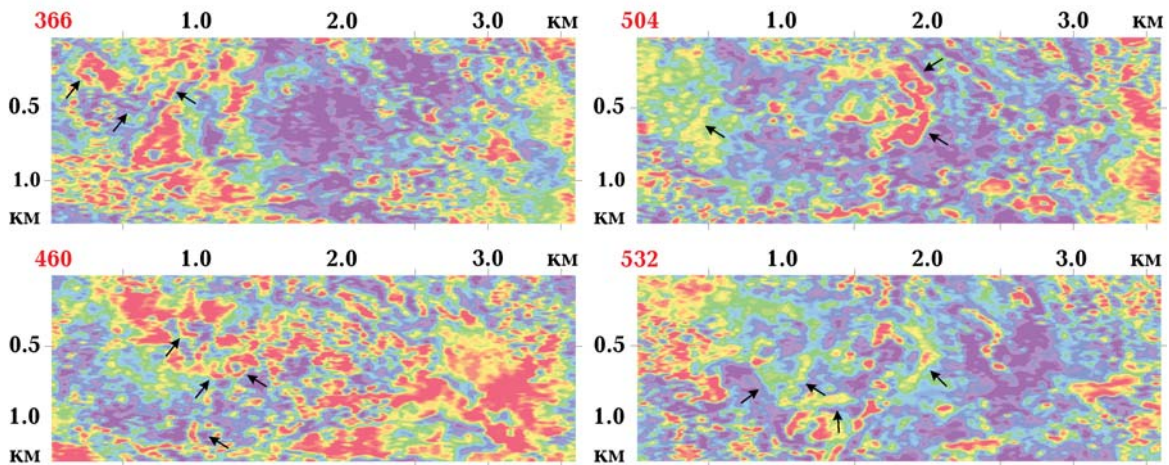


Рис. 9. Аномалії поглинання хвильового поля ЛДЗ від можливих підземних об'єктів шахти "Краснолиманська". Часові зрізи на 366, 460, 504, 532 мс відповідно. Стрілками позначено можливі шахтні об'єкти.

більш високочастотніший сейсмічний запис, тим більшу роздільну здатність мають часові розрізи ЛДЗ. За наявності правильної високочастотної складової в сейсмограмах є можливість ана-

лізувати поглинальні властивості середовища у локальній зоні. Це важливо для пошуку невеликих об'єктів, таких як пастки метану, та зон розущільнень, пов'язаних з тріщинами.

Список літератури

- Бахаревская Т. М., Бродов Л. Ю. О выделении сбросов малой амплитуды по данным обменных отраженных волн PS. В кн.: *Поперечные и обменные волны в сейсморазведке*. Москва: Недра, 1967. С. 219—226.
- Вегелянська Н. В., Провотворова О. В. Особливості геологічної будови окремих вугільних пластів Красноармійського вуглепромислового району (на прикладі шахти "Краснолиманська"). *Тектоніка і стратиграфія*. 2009. Вип. 36. С. 54—59.
- Вергельська Н. В. Особливості будови пласта I₃ Красноармійського вуглепромислового району Донецького басейну. *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України*. 2012. Вип. 5. С. 206—208.
- Вергельська Н. В., Правоторова О. В., Назарова І. О. Про особливості газової складової вугільних пластів в тектонічно активних зонах (на прикладі ділянки Північно-Родінська-2 ДП ВК "Краснолиманська"). *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*. 2011. № 9. С. 440—450.
- Волкова Т. П., Шарина О. С. Закономерности распределения природной газоносности на шахтах Красноармейского углепромышленного района. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2016. № 2 (39). С. 3—9.
- Гринь Д. М. Базисні функції, спектральна корекція та обвідні сейсмічних трас. *Геофиз. журн.* 2001 а. Т. 23. № 3. С. 95—105.
- Гринь Д. М. Логарифмічні декременти та інші функції згасання сейсмічних хвиль. *Геофиз. журн.* 2001 б. Т. 23. № 4. С. 91—102.
- Гринь Д. М. Часові розрізи логарифмічних декрементів згасання тонкошарового середовища: Сборник трудов III Международной научно-технической конференции "Горная геология, геомеханика и маркшейдерия", 2011, Донецк, Украина.
- Гринь Д. М., Гринь М. Є. Різницеві оператори для виділення цільових хвиль. *Геофиз. журн.* 2003. Т. 25. № 4. С. 84—97.
- Довбнич М. М., Мендрій Я. В., Виктосенко І. А. Новые подходы к анализу геофизических данных при прогнозировании зон скопления метана угольных пластов. *Геоинформатика*. 2012. №1 (41). С. 32—38.
- Король В. И., Скобенко А. В. Акустический способ прогноза газодинамических явлений в угольных шахтах. Днепропетровск: Изд. НГУ, 2013. 181 с.
- Кочерга В. Н., Сытник И. В., Левчинский Г. С. Эффективность комплексной дегазации выемочных участков на шахте "Краснолиманская". *Уголь Украины*. 2014. № 11. С. 26—30.
- Ляховицкий Ф. М., Невский М. В. Анализ и интерпретация годографов отраженных волн в случае поперечно-анизотропных сред. Москва: Изд. ВИЭМС, 1972. 43 с.
- Мендрій Я. В. Атрибутний аналіз сейсмічних даних при картируванні зон тріщиноватості. *Збірник наукових праць УкрДГРІ*. 2013. № 4. С. 42—51.
- Мендрій Я. В., Тяпкин Ю. К. Развитие технологии расчета когерентности на основе усовершенствованных моделей сейсмических записей. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 3.

- C. 102—115. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i3.2012.116646>.
- Минеев С. П., Кочерга В. Н., Дубовик А. И., Лосев В. И., Кишкань М. А. Расследование аварии на шахте "Краснолиманская". *Физико-технические проблемы горного производства*. 2016а. Вып. 18. С. 163—174.
- Минеев С. П., Кочерга В. Н., Дубовик А. И., Лосев В. И., Кишкань М. А. Расследование аварии с двумя взрывами метановоздушной смеси, произошедшей на шахте "Краснолиманская". *Уголь Украины*. 2016б. № 9-10. С. 7—15.
- Многоволновые сейсмические исследования. Под ред. Н. Н. Пузырева. Новосибирск: Наука, 1987. 214 с.
- Мушин И. А., Корольков Ю. С., Чернов А. А. Выявление и картирование дизъюнктивных дислокаций методами разведочной геофизики. Москва: Научный мир, 2001. 120 с.
- Оболенцева И. Р., Клем-Мусатова Г. А. Поляризационные характеристики отраженных обменных волн PS от границ нарушенных системой параллельных сбросов. *Геология и геофизика*. 1986. № 2. С. 128—144.
- Пузырев Н. Н., Тригубов Ф. В., Бродов Л. Ю. Сейсмическая разведка методов поперечных и обменных волн. Москва: Недра, 1985. 277 с.
- Тригубов А. В., Хохлов М. Т., Кривченков Б. С. Излучение малоамплитудных тектонических нарушений отраженными волнами различных типов. *Тр. Сиб. отг. АН СССР*. 1975. Вып. 273. С. 64—77.
- Тяпкин Ю. К., Мендрий Я. В., Щеголихин А. Ю., Тяпкина А. Н. Сейсмическая когерентность при флуктуациях временных задержек сигнала. *Геофиз. журн.* 2018. Т. 40. № 2. С. 30—47. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i2.2018.128878>.
- Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка. Т. 2. Обработка и интерпретация данных. Москва: Мир, 1987. 400 с.
- Chopra, S., & Marfurt, K. (2007). Seismic curvature attributes for mapping faults/fractures, and other stratigraphic features. *CSEG Recorder*, 32(9), 37—41.
- Qi, J., Lyu, B., AlAli, A., Machado, G., Hu, Y., & Marfurt, K. (2019). Image processing of seismic attributes for automatic fault extraction. *Geophysics*, 84(1), O25—O37. doi: 10.1190/GEO-2018-0369.1.
- Si, G., Durucan, S., Jamnikar, S., Lazar, J., Abraham, K., Korre, A., Shi, J.-Q., Zavšek, S., Mutke, G., Lurka, A. (2015). Seismic monitoring and analysis of excessive gas emissions in heterogeneous coal seams. *International Journal of Coal Geology*, 149, 41—54. doi: 10.1016/j.coal.2015.06.016.
- Wang, B., Liu, S., Zhou, F., Zhang, J., & Zheng, F. (2017). Diffraction Characteristics of Small Fault ahead of tunnel face in coal roadways. *Earth Sciences Research Journal*, 21(2), 95—99. doi: <http://dx.doi.org/10.15446/esrj.v21n2>.
- Wu, X., Shi, Y., & Fomel, S. (2018). Convolutional neural networks for fault interpretation in seismic images. *SEG International Exposition and 88th Annual Meeting*, 1946—1950. doi: 10.1190/segam2018-2995341.1.
- Zhou, B., & Hatherly, P. (2012). Seismic fault detectability: a view from numerical modeling. *22nd ASEG Conference*, 26—29 February 2012. Brisbane, Australia.
- Zhou, B., Hatherly, P., & Sunc, W. (2017). Enhancing the detection of small coal structures by seismic diffraction imaging. *International Journal of Coal Geology*, 178(1), 1—12. doi: 10.1016/j.coal.2017.04.010.

Methods of determination of spatial distribution of minor-amplitude faults and fissures in thin-layered coal-bearing geological medium

D. M. Gryn, 2019

A problem of determining location of faults and fissures in geological medium which appear in the process of formation of the main types of geological structures: shears, nappes, faults, grabens, axes of folding and compression zones is considered. Areal seismic records of MCDP 3D obtained in the mine field of "Krasnolimanskaya" mine (Donetsk district) were used as initial data. It is located on the monocline of the southwestern part of Kalmius-Torets basin in the hanging wing of the Central nappe with amplitude up to 310 m. Monocline occurrence of rocks is complicated by numerous disjunctive faults of the faulting type with amplitudes up to 95 m. The main marker for identification for presence of a fault on the seismic records of MCDP 3D under conditions of horizontally-layered medium is interruption and (or) displacement of the axis of reflected waves phase synchronism. In some cases a diffracted wave appears in the place of horizon rupture. Provided that in the case of complicated geology it seems impossible to identify minor-amplitude displacements and discordant occurrence of reflecting margins related to faults. For spatial identification of the fault structures position the results of solving the inverse seismic problem are proposed — logarithmic decrements of fading (LDF) with their method of calculation that was put forward by the author previously. Temporal cross-sections of LDF have the same permissive ability as seismic data of MCDP 3D. Such a detail allows separating out minor-amplitude derangements related to faults and fissures. Special feature of temporal data of LDF is in the point that the identifiers of discordant occurrence of reflecting margins are their absorbing properties. The examples of vertical and horizontal LDF sections of a seismic cube 3D where a lot of deep and surface faults can be traced are given in the paper. Taking into account the complexity of mapping the planes of faults in three-dimensional space a method of automatic determination of the point of drastic change of absorbing properties of the medium (on each of horizontal cuts of the cube) with application of wavelet analysis has been proposed. A matrix of attributes is created of such points by which the planes of faults are plotted.

Key words: seismicity, fault, fissure, nappe, mine field, Logarithmic decrement of absorption.

References

- Bakharevskaya, T. M., & Brodov, L. Yu. (1967). On the allocation of low-amplitude faults according to the data of the reflected waves PS. In *Transverse and exchange waves in seismic exploration* (pp. 219—226). Moscow: Nedra (in Russian).
- Vehelyanska, N. V., & Provotvorova, O. V. (2009). Features of the geological structure of individual coal seams of the Krasnoarmeysk coal-mining district (as an example of the "Krasnolimansk" mine). *Tektonika i stratyografiya*, (36), 54—59 (in Ukrainian).
- Verhelska, N. V. (2012). Features of the structure of the l_3 formation of the Krasnoarmeysk coal-mining district of the Donetsk basin. *Zbirnyk naukovykh prats Instytutu heolohichnykh nauk NAN Ukrayiny*, (5), 206—208 (in Ukrainian).
- Verhelska, N. V., Pravotorova, O. V., & Nazarova, I. O. (2011). On the features of the gas component of coal seams in tectonically active zones (on the example of the North-Rodinsk-2 section of the "Krasnolimanskaya" SC). *Naukovi pratsi UkrNDMI NAN Ukrayiny*, (9), 440—450 (in Ukrainian).
- Volkova, T. P., & Sharina, O. S. (2016). Patterns

- of distribution of natural gas content in the mines of the Krasnoarmeysky coal-industrial region. *Visti Donetskoho hirnychnoho instytutu*, (2), 3—9 (in Russian).
- Grin, D.M. (2001 a). Basis functions, spectral correction and bypass seismic lines. *Geofizicheskiy zhurnal*, 23(3), 95—105 (in Ukrainian).
- Grin, D.M. (2001 b). Logarithmic decrement and other features attenuation of seismic waves. *Geofizicheskiy zhurnal*, 23(4), 91—102 (in Ukrainian).
- Grin, D.M. (2011). Temporal sections of logarithmic decrements of the extinction of a thin-layered medium: *Proc. of the III International Scientific and Technical Conference "Mining Geology, Geomechanics and Surveying", 2011, Donetsk, Ukraine* (in Ukrainian).
- Grin, D.M. & Grin, M.E. (2003). Difference operators for allocation of target waves. *Geofizicheskiy zhurnal*, 25(4), 84—97 (in Ukrainian).
- Dovbnich, M.M., Mendriy, Y.V., & Viktosenko, I.A. (2012). New approaches to the analysis of geophysical data in predicting the zones of accumulation of methane in coal seams. *Geoinformatika*, (1), 32—38 (in Russian).
- Korol, V.I., & Skobenko, A.V. (2013). *Acoustic method for forecasting gas-dynamic phenomena in coal mines*. Dnepropetrovsk: National Mining University Edition, 181 p. (in Russian)
- Kocherga, V.N., Sytnik, I.V., & Levchinsky, G.S. (2014). The effectiveness of integrated degassing of mining sites at the "Krasnolimanskaya" mine. *Ugol Ukrainy*, (11), 26—30 (in Russian).
- Levkovich-Maslyuk, L., & Pereberin, A. (1999). *Introduction to wavelet analysis: Training course*. Moscow: Graficon'99, 120 p. (in Russian).
- Lyakhovitsky, F.M., & Nevsky, M.V. (1972). *Analysis and interpretation of hodographs of reflected waves in the case of transverse anisotropic media*. Moscow: Edition of the All-Union Research Institute of the Economics of Mineral Resources and Exploration, 43 p. (in Russian).
- Mendry, Ya.V. (2013). Attribute analysis of seismic data when mapping fracture zones. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDHRI*, (4), 42—51 (in Russian).
- Mendry, Y.V., & Tyapkin, Yu.K. (2012). Development of coherence calculation technology based on improved seismic recording models. *Geofizicheskiy zhurnal*, 34(3), 102—115. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i3.2012.116646> (in Ukrainian).
- Mineev, S.P., Kocherga, V.N., Dubovik, A.I., Losev, V.I., & Kishkan, M.A. (2016 a). Investigation of the accident at the "Krasnolimanskaya" mine. *Fiziko-tehnicheskkiye problemy gornogo proizvodstva*, (18), 163—174 (in Russian).
- Mineev, S.P., Kocherga, V.N., Dubovik, A.I., Losev, V.I., & Kishkan, M.A. (2016 b). Investigation of the accident with two methane-air mixture explosions that occurred at the "Krasnolimanskaya mine". *Ugol Ukrainy*, (9-10), 7—15 (in Russian).
- Puzyrev, N.N. (Ed.). (1987). *Multiwave seismic surveys*. Novosibirsk: Nauka, 214 p. (in Russian).
- Mushin, I.A., Korolkov, Yu.S., & Chernov, A.A. (2001). *Identification and mapping of disjunctive dislocations by exploration geophysics methods*. Moscow: Nauchnyy Mir, 120 p. (in Russian).
- Obolentseva, I.R., & Klem-Musatova, G.A. (1986). Polarization characteristics of reflected PS waves from boundaries disturbed by a parallel fault system. *Geologiya i geofizika*, (2), 128—144 (in Russian).
- Puzyrev, N.N., Trigubov, F.V. & Brodov, L.Yu. (1985). *Seismic exploration of shear and transverse waves*. Moscow: Nedra, 277 p. (in Russian).
- Trigubov, A.V., Khokhlov, M.T. & Krivchenkov, B.S. (1975). Radiation of low-amplitude tectonic disturbances by reflected waves of various types: *Proc. of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences*, (273), 64—77 (in Russian).
- Tyapkin, Yu. K., Mendrii, Ya. V., Shchegolik-

- hin, A. Yu., & Tyapkina, A. N. (2018). Seismic coherence in the presence of signal time-delay fluctuations. *Geofizicheskiy zhurnal*, 40 (2), 30—47. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i2.2018.128878> (in Russian).
- Sheriff, R., & Geldart, L. (1987). *Seismic exploration. Processing and interpretation of data* (Vol. 2). Moscow: Mir, 400 p. (in Russian).
- Chopra, S., & Marfurt, K. (2007). Seismic curvature attributes for mapping faults/fractures, and other stratigraphic features. *CSEG Recorder*, 32 (9), 37—41.
- Qi, J., Lyu, B., AlAli, A., Machado, G., Hu, Y., & Marfurt, K. (2019). Image processing of seismic attributes for automatic fault extraction. *Geophysics*, 84 (1), O25—O37. doi: 10.1190/GEO2018-0369.1.
- Si, G., Durucan, S., Jamnikar, S., Lazar, J., Abraham, K., Korre, A., Shi, J.-Q., Zavšek, S., Mutke, G., Lurka, A. (2015). Seismic monitoring and analysis of excessive gas emissions in heterogeneous coal seams. *International Journal of Coal Geology*, 149, 41—54. doi: 10.1016/j.coal.2015.06.016.
- Wang, B., Liu, S., Zhou, F., Zhang, J., & Zheng, F. (2017). Diffraction Characteristics of Small Fault ahead of tunnel face in coal roadways. *Earth Sciences Research Journal*, 21 (2), 95—99. doi: <http://dx.doi.org/10.15446/esrj.v21n2>.
- Wu, X., Shi, Y., & Fomel, S. (2018). Convolutional neural networks for fault interpretation in seismic images. *SEG International Exposition and 88th Annual Meeting, 1946—1950*, doi: 10.1190/segam2018-2995341.1.
- Zhou, B., & Hatherly, P. (2012). Seismic fault detectability: a view from numerical modeling. *22nd ASEG Conference, 26—29 February 2012. Brisbane, Australia*.
- Zhou, B., Hatherly, P., & Sunc, W. (2017). Enhancing the detection of small coal structures by seismic diffraction imaging. *International Journal of Coal Geology*, 178 (1), 1—12. doi: 10.1016/j.coal.2017.04.010.