

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

МЕНДРІЙ Яна Вячеславівна

УДК 550.384

**ПРОГНОЗУВАННЯ ЗОН ТРІЩИНУВАТОСТІ ЗА ДАНИМИ
СЕЙСМОРОЗВІДКИ В УМОВАХ ВУГЛЕНОСНИХ ФОРМАЦІЙ**

Спеціальність 04.00.22 – «Геофізика»

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата геологічних наук

Дніпропетровськ – 2013

Дисертація є рукописом

Робота виконана на кафедрі геофізичних методів розвідки Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України (м. Дніпропетровськ).

Науковий керівник – чл.-кор. НАН України, д. г.-м.н., професор, професор кафедри геофізичних методів розвідки Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України (м. Дніпропетровськ) **Тяпкін Костянтин Федорович**

Офіційні опоненти:

– **Пігулевський Петро Гнатович**, д.геол.н., старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу сейсмічної небезпеки Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України (м. Київ);

– **Кисельов Микола Миколайович**, к.г.-м.н., старший науковий співробітник, директор Науково-технічного центру охорони надр та споруд при Українському державному науково-дослідному і проектно-конструкторському інституті гірничої геології, геомеханіки і маркшейдерської справи (УкрНДМІ) НАН України (м. Донецьк).

Захист відбудеться «___»_____2013 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.05 при Державному ВНЗ «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України за адресою 49027, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49027, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19

Автореферат розісланий «___»_____2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 08.080.05
к. г.-м. н., доцент

А.Л. Лозовий

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Тектонічна будова вуглепородного масиву має ключове значення при вивченні гірничо-геологічних умов, що визначають розробку вугільних родовищ. Саме із зонами тектонічної порушеності пов'язані локальні зони різкої зміни міцнісних, деформаційних, колекторських та інших фізичних властивостей вуглепородного масиву. Це, в свою чергу, впливає на стійкість порід покрівлі вугільних пластів, на утворення ділянок можливих проривів підземних вод в гірничі виробки, зрушення масиву гірських порід та ін. Природні процеси дезінтеграції вуглепородного масиву можна вважати одним з провідних чинників формування скупчень вільного метану. Локальні порушення суцільності масиву, які приурочені до метанової зони та не мають виходу на поверхню, є сприятливими для скупчення вільного метану в тріщинах, що визначає належність газодинамічних явищ до зон тріщинуватості.

Прогноз зон тектонічної порушеності вуглепородного масиву є найважливішим завданням вугільної геології на всіх етапах експлуатації вугільних родовищ. І якщо тектонічні порушення великої і середньої амплітуди досить впевнено простежуються на етапі розвідки вугільних родовищ на основі геологічної інформації, то малоамплітудні та безамплітудні зони тектонічної порушеності зазвичай встановлюються лише в ході ведення гірничих робіт. Гірничо-геологічні умови робіт при цьому ускладнюються і створюється реальна небезпека для працюючих у шахті людей. Саме тому розробка і впровадження технологій прогнозування зон тектонічної порушеності вуглепородного масиву є актуальною науковою задачею. Успішне вирішення питання, з одного боку, дозволяє підвищити ефективність і безпеку ведення гірничих робіт при видобутку вугілля, а з іншого – прогнозувати зони скупчення вільного метану, що відкриває нові перспективи в освоєнні нетрадиційних джерел вуглеводнів.

На теперішній час пріоритетним геофізичним методом у прогнозі тектонічних порушень є сейсморозвідка. І якщо зони тектонічної порушеності зі значними амплітудами зміщень проявляються в хвильовому полі та візуально впевнено простежуються, то для виділення малоамплітудних порушень і зон тріщинуватості потрібно застосування спеціальних обчислювальних алгоритмів, орієнтованих на посилення аномальних ефектів від цих об'єктів. У зв'язку з цим розробка методики виділення зон тріщинуватості є актуальним завданням, яке має важливе науково-практичне значення при вирішенні задач вугільної геології на всіх етапах розвідки та експлуатації вугільних родовищ.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі геофізичних методів розвідки Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» у рамках таких держбюджетних науково-дослідних тем: "Структура, геодинаміка, техногенез Донбасу як основа його адаптації до ресурсних потреб України" (№ держ. реєстрації 0108U000540), "Наукові основи прогнозу тектонічних деструкцій

вуглепородного масиву і фундаментальні дослідження явища спонтанного утворення вуглеводневих фаз" (№ держ. реєстрації 0112U000870).

Результати досліджень використані при виконанні договірних тем: "Аналіз напружено-деформованого стану геологічного середовища на основі структурно-швидкісних моделей на ділянці сейсмозвідувальних робіт" (замовник ЗАТ "Полярекс", м. Н. Уренгой, Росія), "Впровадження методики прогнозування характеру напруженого стану на родовищах вуглеводнів в Дніпровсько-Донецькій западині" (замовник НАК "Нафтогаз", Україна).

Мета роботи – прогнозування малоамплітудних розривних порушень та зон тектонічної тріщинуватості у вуглепородному масиві на основі атрибутного аналізу сейсмічних даних.

Ідея роботи полягає в розробці та застосуванні атрибутів сейсмічного запису, в полях яких посилюються аномальні ефекти від зон підвищеної тріщинуватості в умовах вуглепородного масиву.

Об'єкт дослідження – формування зон тріщинуватості і малоамплітудних розривних порушень вуглепородного масиву.

Предмет дослідження – сейсмічне зображення та атрибути сейсмічного запису.

Задачі досліджень.

1. Виконати комплексний аналіз інформації, що відображає сучасний стан проблеми вивчення зон підвищеної тріщинуватості.

2. Розглянути можливості сейсмозвідки при прогнозуванні зон підвищеної тріщинуватості.

3. Розробити математичний апарат, алгоритми та програми для розрахунків когерентності та кривизни хвильового поля.

4. Розробити методику прогнозування зон підвищеної тріщинуватості на основі аналізу атрибутів сейсмічного запису.

5. З'ясувати основні закономірності генезису і розташування зон тріщинуватості й малоамплітудної порушеності в Червоноармійському геолого-промисловому районі Донбасу.

6. Апробувати ефективність і надійність запропонованої методики в умовах Червоноармійського геолого-промислового району (на прикладі шахти "Краснолиманська").

Методи досліджень.

Для вирішення поставлених у дисертаційній роботі задач використовувалися: традиційні методи інтерпретації сейсмічних даних та розроблені автором нові алгоритми розрахунку когерентності і кривизни хвильового поля; методи математичного моделювання хвильового поля для оцінки аномальних ефектів, обумовлених зонами підвищеної тріщинуватості; методи цифрової фільтрації сигналів для підвищення якості сейсмічного зображення; лінеаментний аналіз для виділення переважаючих напрямів тріщинуватості.

Основні наукові положення, що захищаються в роботі.

1. В умовах моноклінального залягання вуглепородного масиву атрибути хвильового поля, такі як когерентність і кривизна, є основними геофізичними прогностичними критеріями локалізації зон тектонічної порушеності.

2. Поля когерентності та кривизни сейсмічного запису відображають генезис зон тектонічної порушеності.

Наукова новизна роботи.

1. Вперше запропонований метод розрахунку когерентності хвильового поля, який ґрунтується на моделі сейсмічного запису, що допускає довільне варіювання амплітуд сигналу та завади.

2. Вперше атрибути хвильового поля застосовані для виділення зон тектонічної порушеності в умовах моноклінального залягання вугленосних формацій на прикладі поля шахти «Краснолиманська» Червоноармійського геолого-промислового району Донбасу.

3. Вперше показана можливість визначення генезису зон тектонічної порушеності на основі комплексного аналізу поля сейсмічних атрибутів і узагальнення тектонофізичних даних.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені у рамках виконання дисертаційної роботи підходи вивчення зон тектонічної порушеності на основі аналізу атрибутів хвильового поля мають самостійне значення і дозволяють вирішувати такі практичні завдання:

- прогнозування зон скупчення метану;
- закладення дегазаційних свердловин;
- виконання оптимального розподілу шахтних полів (на етапі розвідки вугільних родовищ);
- створення безпечних умов і підвищення економічної ефективності ведення гірничих робіт (на етапі розробки).

Наукові результати роботи використовуються на практиці в УкрНДМІ НАН України і Придніпровській геофізичній розвідувальній експедиції при виконанні науково-дослідних і виробничих робіт з прогнозу тектонічних порушень і зон скупчення метану в вуглепородному масиві.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи докладалися й обговорювалися на: міжнародних науково-практичних конференціях "Сейсмо-2011", "Сейсмо-2012" (Феодосія, 2011, 2012), міжнародній науково-технічній конференції "Гірнична геологія, геомеханіка і маркшейдерія" (Донецьк, 2011), міжнародних наукових конференціях "Форум гірників" (Дніпропетровськ, 2011), "Підземні катастрофи: моделі, прогноз, попередження" (Дніпропетровськ, 2011), "Геомодель" (Геленджик, 2009), конференціях Європейської асоціації геодослідників та інженерів "Sustainable Earth Sciences Conference & Exhibition" (Валенсія, 2011), "74th EAGE Conference & Exhibition" (Копенгаген, 2012).

Публікації. Результати роботи викладені в 16 роботах. З них 7 статей у фахових виданнях, решта – праці в збірниках та тези доповідей.

Особистий внесок автора. Авторі належать постановка задачі й визначення шляху її вирішення; розробка математичного апарату та алгоритмів обчислення атрибутів хвильового поля, результати їх застосування і геологічна інтерпретація сейсмічних матеріалів.

У ході виконання розрахунків було використано програмне забезпечення, розроблене автором особисто, а також програми моделювання хвильових полів Tesserai-2D та інтерпретації сейсморозвідувальних даних Kingdom 8.6.

Структура та об'єм роботи. Дисертація представляє завершену науково-дослідну роботу і складається з вступу, чотирьох розділів і висновків, викладених на 169 сторінках, включаючи 44 рисунки, список використаної літератури із 178 джерел і 2 додатки.

Подяки. Автор щиро вдячна доктору фізико-математичних наук Ю.К. Тяпкіну за допомогу в розробці алгоритмів обчислення когерентності хвильового поля, цінні консультації, рекомендації та критичні зауваження. Здобувач виявляє почуття вдячності співробітникам УкрНДМІ НАН України і Придніпровської геофізичної розвідувальної експедиції за надані геолого-геофізичні матеріали.

Особливу подяку автор висловлює науковому керівнику члену-кореспонденту НАН України, доктору геолого-мінералогічних наук, професору К.Ф. Тяпкину за цінні поради при виконанні дисертаційної роботи.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформовані мета та задачі досліджень, наведені наукові положення, що виносяться на захист, наукове та практичне значення роботи, а також дані, щодо апробації і публікації досліджень.

Розділ 1. Тріщинуватість як фактор, що визначає метаносність вугленосних фармацій та гірничо-геологічні умови вуглепородного масиву

Розділ присвячено природі тріщинуватості. Первинні (нетектонічні) тріщини зазвичай розташовані через майже однакові відстані одна від одної. Подальші тектонічні деформації порід можуть значно порушити цю закономірність і призвести до утворення згущувань тріщин, що чергуються з їх розрідженнями. Згущування, що називають також коридорами або кластерами (Laubach S.E., Singh S.K.), являють собою вузькі, номінально плоскі зони, усередині яких щільність тріщин набагато вища, ніж за межами цих зон. Такі зони можуть мати протяжність від декількох сотень метрів до декількох кілометрів, охоплювати інтервал від десятків до сотень метрів по глибині при товщині зони від декількох метрів до декількох десятків метрів. Дослідники Донбасу Попов В.С., Бурлуцький Н.С., Корчемагін В.О., Павлов І.О. називають такі зони згущування тріщин, що спостерігаються у вугленосній товщі, тектоносмугами і пов'язують їх переважно зі зсувними процесами. Існування зсувних деформацій, з якими пов'язані головні епізоди формування особливостей тектонічної будови вугленосних відкладів Донбасу, переконливо обґрунтовано в роботах Забігайло В.Є., Лукінова В.В., Куща О.О., Корчемагіна В.О., Привалова В.О., Кисельова М.М. та ін.

На основі аналізу робіт Laubach S.E., Aguilera R., Фейта Г.Н., Захарова В.Н. виділено основні характеристики тріщин, важливі для

формування зон скупчень вільного метану такі як щільність, ступінь розкриття, які визначають проникність резервуару, а також геометрія мережі тріщин та їх взаємозв'язок, що забезпечують шляхи міграції метану до експлуатаційних свердловин у процесі видобутку цього газу.

Розділ 2. Стан проблеми і вибір напрямку досліджень

У розділі виконано комплексний аналіз інформації, яка відображає сучасний стан проблеми вивчення зон тектонічної тріщинуватості, що дозволило визначити напрям подальших досліджень та зробити наведені далі висновки. Геологічні методи прогнозування малоамплітудної тектонічної порушеності неодноразово довели свою ефективність. Але їх основним недоліком є той факт, що вони спираються на дані буріння, які надзвичайно рідкі і практично не дозволяють виявити і надійно простежити тріщинуваті зони за площею. Серед геофізичних методів дослідження граві- і електророзвідка дозволяють виконати тільки регіональний прогноз зон тектонічної порушеності й пов'язаних з ними зон продуктивності метану, та є важливою ланкою в стратегії ухвалення рішень про детальні геолого-геофізичні дослідження. Проте їх результати не можуть бути основою для проектування місць закладення експлуатаційних свердловин. Геофізичним методом, що дозволяє здійснити максимально детальний і точний прогноз зон розривної порушеності та тріщинуватості геологічного середовища, є 3D сейсмозвідка. По-суті, вона – єдиний наземний геофізичний метод, що дозволяє отримати детальне тривимірне зображення геологічного середовища. Перспективи сейсмозвідки ґрунтуються на різноманітті проявів тектонічної порушеності геологічного середовища у хвильовому полі. І хоча малоамплітудні розривні порушення та зони тріщинуватості часто не помітні на часових розрізах, застосування спеціальних методик спрямованих на виявлення та підсилення аномальних ефектів від таких об'єктів дозволяє виділяти порушення, розміри яких знаходяться за межами роздільної здатності сейсмозвідки, тобто становлять величину значно меншу довжини сейсмічної хвилі.

Серед методик виділення зон тріщинуватості за сейсмічними даними розділяють технології азимутного аналізу амплітуд (AVAZ), що ґрунтуються на азимутальній анізотропії P- і S-хвиль (Crampin S., Grechka V., Lynn H.B., Wang Z. та ін.), метод міграції дуплексних хвиль (Мармалевский Н.Я., Роганов Ю.В., Хромова І.Ю.) та атрибутний аналіз хвильового поля (Bahorich M., Gersztenkorn A., Chopra S., Marfurt K.J., Roberts A. та ін.).

Аналіз існуючих методик дозволив авторові вибрати на даному етапі розвитку і проведення сейсмічних досліджень в Україні найбільш перспективний напрям – аналіз атрибутів сейсмічного запису. Такий вибір обумовлений наведеними далі поясненнями. По-перше, оскільки атрибути розраховуються за остаточним зображенням, а не за вихідними сейсмограмами, процес їх отримання більш економічний, характеризується значною стійкістю порівняно з методиками аналізу сейсмограм. По-друге, на відміну від технології AVAZ, яка вимагає дорогих широкоазимутальних спостережень, атрибути можуть бути успішно визначені при будь-якій системі 3D-

спостережень. По-третє, в основу технології AVAZ покладено досить строгі вимоги до моделі тріщинуватого середовища, тоді як атрибути можуть характеризувати тріщинуваті зони з менш ідеалізованою структурою.

Розділ 3. Методика досліджень зон тріщинуватості вуглепородного масиву за сейсмічними атрибутами

Серед сейсмічних атрибутів, перспективних на виявлення латеральних неоднорідностей, таких як розривні порушення, зони підвищеної тріщинуватості, автором вибрані когерентність і кривизна хвильового поля. Перший відображає якість простеження сейсмічних відбиттів і реагує на падіння амплітуди сигналу, обумовлене тектонічними порушеннями. Другий атрибут чутливий до локальних змін форми відбиттів і є мірою палеодеформацій, що призводять до розтріскування порід. Ці атрибути ґрунтуються на різних особливостях аномалій хвильового поля в зонах тектонічної порушеності, що безумовно підвищить надійність прогнозування при їх комплексному використанні.

Когерентність пов'язана з відношенням сигнал-завада або, що зручніше, з відношенням енергії сигнальної компоненти до загальної енергії в деякій локальній області запису. При такому визначенні відсутність сигналу характеризується мінімальною когерентністю, що дорівнює нулю. У свою чергу, "чистий" сигнал, не спотворений ніякими завадами, супроводжується максимальною когерентністю, що дорівнює одиниці.

Таким чином, при розрахунку когерентності прямо або опосередковано використовуються оцінки сигналу, отримані за деяким набором сейсмічних трас. В основі таких оцінок завжди лежить уявлення про передбачувану структуру сейсмічного запису, тобто про її математичну модель. Оскільки когерентність чутлива не лише до варіацій геологічних особливостей розрізу, але і до математичної моделі сейсмічного хвильового поля, що покладена в основу розрахунку когерентності, використовувана модель має бути максимально адекватною реальним ситуаціям. Традиційні підходи розрахунку когерентності в основу яких покладено спрощені моделі сейсмічного запису, ґрунтуються на коефіцієнтній подібності (Marfurt K.J.) та аналізу власних значень коваріаційної матриці (Gersztenkorn A., Marfurt K.J.). Перша модель передбачає незалежність рівня амплітуд сигналу a_k та дисперсії завад σ_k^2 від номера траси, друга допускає довільне варіювання рівня сигналу.

Основна відмінність запропонованого в даній роботі методу розрахунку когерентності хвильового поля пов'язана з використанням реалістичнішої моделі сейсмічного запису, що допускає довільне варіювання амплітуд сигналу і дисперсії завад. В цьому випадку когерентність у межах ковзного в просторі та в часі вікна, що складається з M трас, може бути розрахована як:

$$C = \frac{\sum_{k=1}^M a_k^2}{\sum_{k=1}^M F_{kk}}, \quad (1)$$

де a_k – амплітуди сигналу; $\sum_{k=1}^M F_{kk}$ – повна енергія запису, подана як сума діагональних елементів коваріаційної матриці F .

З умови взаємної некорельованості сигналу та завад елементи коваріаційної матриці $\mathbf{F} = \mathbf{X}^T \mathbf{X}$ можна записати як:

$$F_{km} = a_k a_m + \sigma_k^2 \delta_{km}. \quad (2)$$

З рівняння (2) слідує два критерії оптимальної оцінки сигналу:

$$\min_{\substack{i, m: 1 \\ k: m}}^M |F_{im} - a_i a_m|^2 \quad (3)$$

і

$$\min_{\substack{i, m: 1 \\ k: m}}^M |F_{im} - a_i a_m|. \quad (4)$$

Вирази (3) і (4) дозволяють побудувати прості ітераційні процеси оптимальної оцінки амплітуд сигналу за недіагональними елементами кореляційної матриці F , які не спотворені адитивним шумом:

$$a_k^{(i+1)} = \sum_{m \neq k} F_{km} a_m^{(i)} / \sum_{m \neq k} a_m^{(i)2} \quad (5)$$

і

$$a_k^{(i+1)} = \sum_{m \neq k} \frac{F_{km} a_m^{(i)}}{|F_{km} - a_k^{(i)} a_m^{(i)}|} / \sum_{m \neq k} \frac{a_m^{(i)2}}{|F_{km} - a_k^{(i)} a_m^{(i)}|}. \quad (6)$$

де i – номер наближення.

Ці процеси задовольняють критеріям методу найменших квадратів (МНК) і методу найменших модулів (МНМ) відповідно.

Запропоновано універсальний підхід до підвищення горизонтальної роздільної здатності будь-якого методу розрахунку когерентності. Когерентність розраховується на деякій базі з M трас як відношення енергії сигнальної компоненти до загальної енергії сейсмічного запису в межах бази. Природно, чим більше M , тим більше згладженими за латераллю виходять оцінки когерентності при одночасному підвищенні їх надійності. При досить високому відношенні сигнал-завада, часто властивому сейсмічним зображенням після сучасної обробки, можна підвищити горизонтальну роздільну здатність методів оцінки когерентності, визначивши когерентність як відношення енергії сигнальної компоненти центральної траси в межах ковзної бази до загальної енергії цієї ж траси. Тоді формула (1) трансформується в

$$C_{(1)} = a_c^2 / E_c, \quad (7)$$

де $a_{\text{ц}}$ – результат оцінки амплітуди сигналу на центральній трасі за допомогою ітераційних процесів (5) або (6); $E_{\text{ц}}$ – енергія на центральній трасі ковзної бази.

На основі чисельного експерименту виконано порівняльний аналіз традиційних і нових методів розрахунку когерентності, який показав більш реалістичні, близькі до теоретичних значень оцінки пропонувані підходи в умовах високого рівня завад.

На синтетичних даних, отриманих за допомогою кінцево-різницевого моделювання хвильового поля для тонкошаруватої моделі середовища, що містить вертикальні зони зниженої швидкості, які імітують зони згущування тріщин, показана підвищена роздільна здатність оцінок когерентності за центральною трасою ковзної бази (рис. 1). Задаючи такі розміри моделі, автор враховувала інформацію про так звані тектоносмуги, що являють собою зони скупчення тріщин у вугленосних відкладах Донбасу і є основним об'єктом при пошуках метану.

Розробка основ розрахунку кривизни за сейсмічними даними була виконана Робертсом А. Вона передбачала розрахунок лише вздовж прокорельованих поверхонь відбиваючих меж. В подальшому були сформовані алгоритми об'ємної кривизни (Al-Dossary S., Marfurt K., Klein P., Richard L.), що дозволило отримувати шуканий параметр у кожній точці сейсмічного простору.

Автором виконано розрахунок об'ємної кривизни, що була запропонована Klein P., Richard L. Поверхня, яка апроксимує поведінку відбиваючої межі в деякій точці сейсмічного зображення, може бути розраховано за рівнянням другого порядку:

$$z(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f. \quad (8)$$

Рис. 1. Тонкошарувата глибино-швидкісна модель з трьома вертикальними неоднорідностями (а), глибинний сейсмічний розріз після міграції (б) та результати розрахунку когерентності методами С (в) і $C_{(1)}$ (г)

Рівняння поверхні $z(x, y)$ знаходиться рішенням системи відносно коефіцієнтів a, b, c, d, e, f . Визначаються часові зсуви між центральною і сусідніми трасами за допомогою функції взаємної кореляції. І хоча остання за двома трасами не є досить надійною оцінкою, однак надмірність даних дозволяє отримати перевизначену систему лінійних рівнянь. Крім того, виконується параболічна апроксимація часових зсувів для більш точного визначення вертикального зміщення. Рівняння апроксимуючої поверхні було отримане розв'язком системи лінійних рівнянь методом найменших квадратів з ітераційним уточненням коренів.

Серед атрибутів кривизни найбільш інформативними для виділення зон тектонічної порушеності є найбільші позитивна і негативна кривизни, оцінка яких здійснюється на основі коефіцієнтів рівняння (8) за такими формулами:

$$k_{pos} = (a + b) + \left[(a - b)^2 + c^2 \right]^{1/2}, \quad (9)$$

$$k_{neg} = (a + b) - \left[(a - b)^2 + c^2 \right]^{1/2}. \quad (10)$$

Атрибути кривизни дозволяють не лише виконати картування латерально неоднорідних зон, обумовлених деформаційними процесами, але і заглянути всередину неоднорідностей. Одним із способів вивчення внутрішньої структури зон тріщинуватості виступає автоматична оцінка напрямів тріщин за такими атрибутами кривизни, як індекс форми, вигин і азимуту мінімальної кривизни. За допомогою індексу форми можна виконати диференціювання локальної квадратичної поверхні (купол, гребінь, сідловина, западина, чаша). Вигин визначає інтенсивність деформації поверхні. Комплексування індексу форми з вигином дає змогу отримати інтенсивність тріщин, при цьому азимут мінімальної кривизни характеризує напрям їх простягання. За наявності інформації про напрям сучасного максимального горизонтального напруження аналіз напрямів тріщин дозволить оцінити ступінь розкриття тріщин.

Розділ 4. Апробація методики в умовах Червоноармійського геолого-промислового району Донбасу

Розроблена у рамках дисертаційної роботи методика прогнозування зон тектонічної порушеності за сейсмічними атрибутами була апробована на ділянці Північно-Родинська поля шахти "Краснолиманська". Це одна з двох ділянок на території Донецького басейну, де на даний час виконані сейсморозвідувальні роботи за 3D методикою. Роботи були проведені фахівцями УкрНДМІ НАН України і Придніпровської геофізичної розвідувальної експедиції. Автор у своєму дослідженні використала остаточне сейсмічне зображення, отримане партією обробки геофізичної інформації Технологічного центру ДП "Укргеофізика".

Поле шахти "Краснолиманська" розташовано у висячому крилі Центрального насуву в центральній частині Червоноармійського геолого-промислового району Донбасу. Залягання порід на полі шахти моноклінальне з падінням на схід і північний схід під кутами від 3–5 до 15–20°. Збільшення кутів падіння до 35° спостерігається тільки поблизу тектонічних порушень. Центральний насув є одним з найбільших порушень як Червоноармійського району, так і всього південно-західного Донбасу. Вертикальна амплітуда насуву складає від 200 до 390 м, він тягнеться переважно в північно-східному напрямі й падає до південного сходу під кутом 70–85°. Средньоамплітудна порушеність представлена Глибокоярським і Федоровським скидами для яких відмічена

преривчастість змішувачів та їх кулісоподібне зчленування, а також розгалуження. На даній ділянці, незважаючи на виконаний великий обсяг бурових і спеціалізованих робіт, тектонічна будова в частині точності просторової геометризації конкретних змішувачів, а іноді й кореляції, потребує уточнення.

На першому етапі 3D сейсмічне зображення було піддано медіанній фільтрації з метою послаблення впливу нерегулярних завад, наявність яких може призвести не лише до зниження роздільної здатності шуканого атрибуту, але і до некоректної інтерпретації. Тестування параметрів розрахунку атрибутів (вибір розмірів ковзного вікна, використання окремих відбиттів або всього зображення, урахування нахилу відбиваючих меж) дозволило підвищити їх ефективність і надійність.

Безпосередньо обчислення атрибутів сейсмічного запису здійснювалося в кожній точці сейсмічного простору в інтервалі від 0,2 до 0,6 с, де простежуються витримані відбиваючі горизонти, пов'язані з цільовими вугільними пластами. Крок в подовжньому і поперечному напрямках відповідав розміру біна і склав 10 м. Крок по осі часу відповідав дискрету запису і склав 2 мс. Таким чином, були отримані тривимірні розподіли когерентності, найбільшої позитивної і найбільшої негативної кривизн. Аналіз кубів сейсмічних атрибутів дозволив простежити й закартувати зони розривних порушень та підвищеної тріщинуватості в тривимірному просторі. Кореляція відбиваючих горизонтів m_4^2 , l_3 і k_5 , що відповідають однойменним вугільним пластам, виконувалась в інтерпретаційному пакеті Kingdom 8.6 компанії IHS Global. Це дозволило вибрати з кубів сейсмічних атрибутів відповідні стратиграфічні зрізи.

На рис. 2 наведено зріз когерентності уздовж висячого крила відбиваючого горизонту l_3 , зіставлений зі схемою тектонічної порушеності за результатами геологічних досліджень. Розподіл когерентності на зрізі добре узгоджується з геологічними даними, але однозначно вказує на неоднорідність

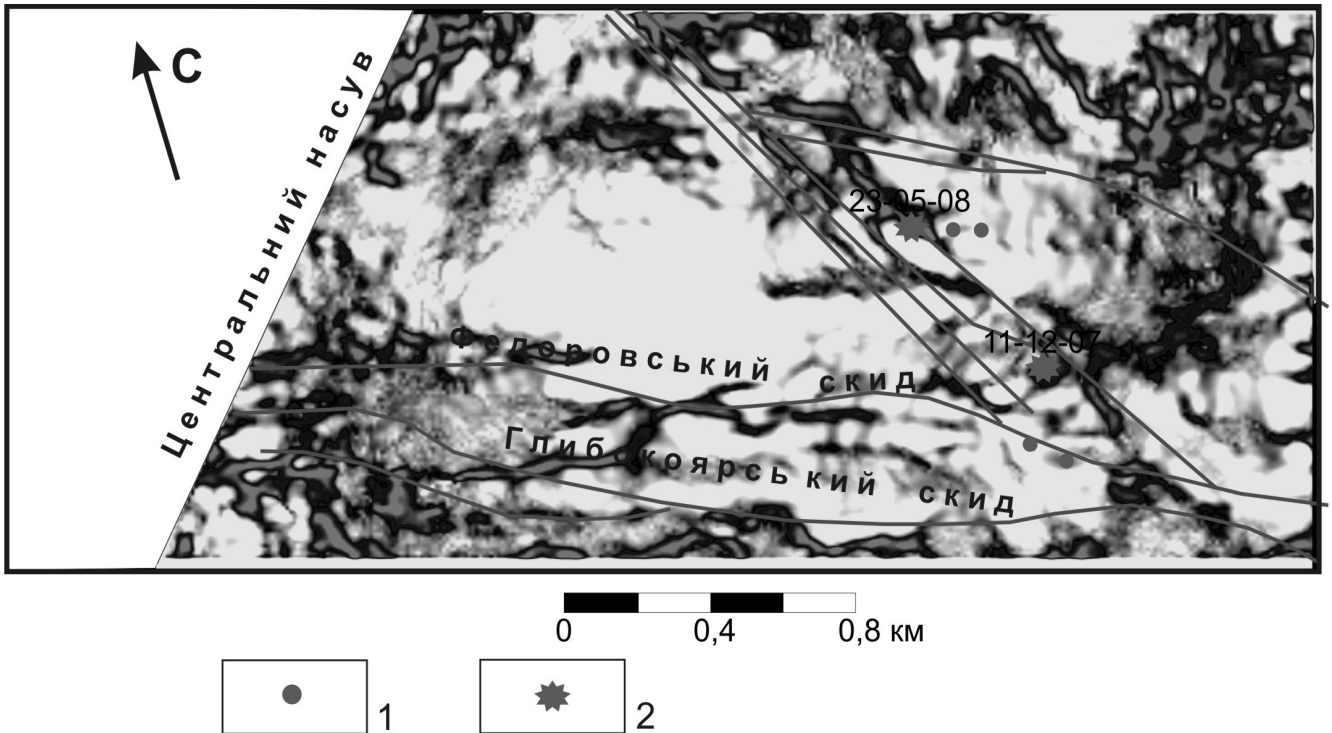
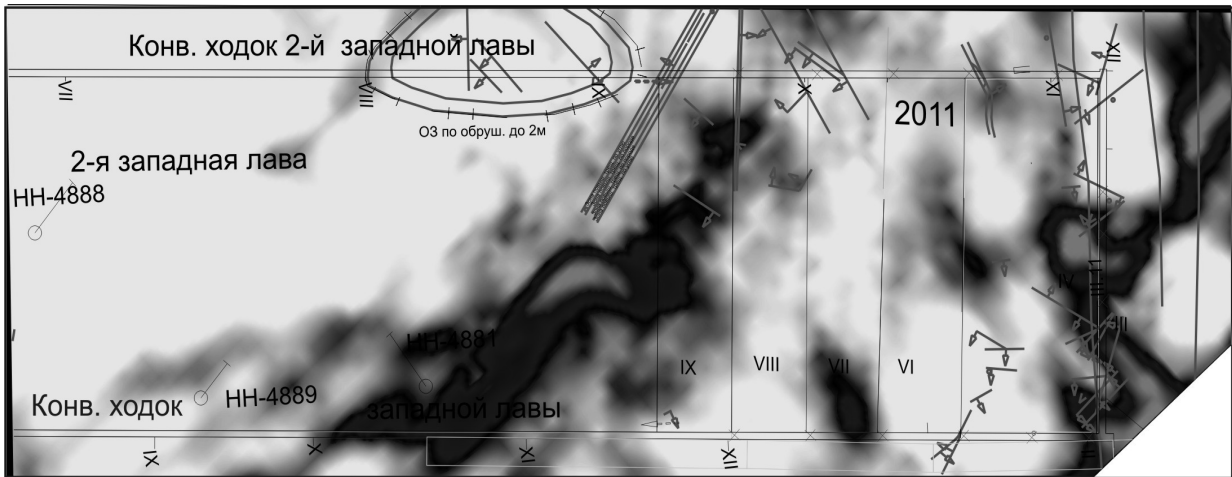


Рис. 2. Зіставлення зрізу когерентності вздовж вугільного пласта l_3 у висячому крилі Центрального насуву зі схемою тектонічної порушеності за даними буріння: 1 – суфляри; 2 – раптові викиди метану, що призвели до аварій

тектонічних зміщень уздовж порушень. Для порушення не можливо виділити одну, чітко виражену площину і амплітуду зміщення. Іншими словами, вони являють собою деякий об'ємом гірських порід насичений розривами різної амплітуди і тріщинами. Елементарні розриви, що утворюють загальну зону тектонічного порушення, формують ешелонований ряд. Така будова зон однозначно вказує на переважаючу роль зсувних деформацій при їх утворенні. На ділянці дослідження мали місце суфляри й раптові викиди газу, які призвели до аварій. Катастрофічна аварія, що спричинила людські жертви, сталася 23 травня 2008 р. Звертає на себе увагу приуроченість суфлярів та аварій до зон аномальних значень когерентності.



а

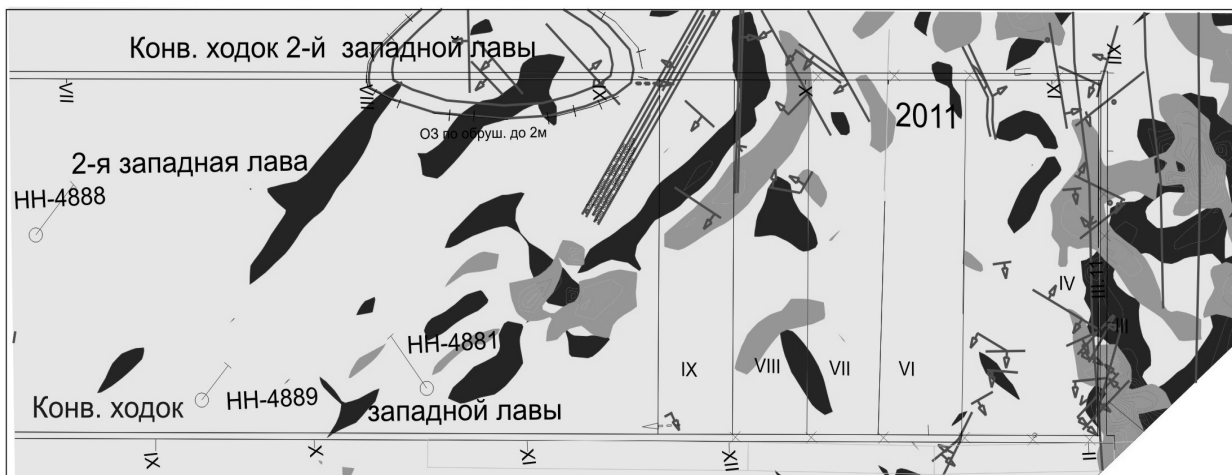


Рис. 3. Зрізи когерентності (а), найбільших позитивної та негативної кривизни (б) в межах 2-ї західної лави: 1 – найбільша позитивна кривизна; 2 – найбільша негативна кривизна; 3 – розривні порушення за результатами гірничих робіт

На рис. 3 наведені фрагменти зрізів сейсмічних атрибутів у межах 2-ї західної лави. При проходженні конвеєрних ходків розробники ввійшли у зону тектонічної порушеності, що швидше за все і обмежило подальшу проходку. В центральній частині рисунку спостерігається аномалія когерентності та кривизни, що практично повністю перетинає лаву. Ця аномалія була підсічена при проходженні конвеєрного ходка 2-ї західної лави на пікетах X–XI. При розробці лави, коли гірничий комбайн увійшов у прогнозовану зону тектонічної порушеності було виявлено ряд малоамплітудних розривів з амплітудою зміщення до 1 м. Вищесказане переконливо доводить зв'язок атрибутів хвильового поля із зонами малоамплітудної та безамплітудної тектонічної порушеності та дає змогу стверджувати – розроблена в рамках даної роботи методика може бути застосована не лише на етапі розвідки вугільних родовищ

при виконанні оптимального розкроювання шахтних полів, але й на етапі розробки, що сприятиме гарантуванню безпеки і підвищенню економічної ефективності ведення гірничих робіт.

За компонентами кривизни було отримано локальні (100x100 м) та загальна рози-діаграми вздовж вугільного пласта l_3 . Зіставлення загальної рози-діаграми за компонентами кривизни та отриманої за результатами аналізу тріщин у гірничих виробках показує достатній рівень збігу (рис. 4). Деякий ступінь розбіжності розподілів напрямів тріщинуватості можна пояснити тим фактом, що гірськими роботами охоплені тільки деякий об'єм ділянки досліджень, тоді як сейсмічні дані рівномірно розподілені за площею.

За результатами аналізу сейсмічного куба та кубів когерентності й кривизни автором було виділено п'ять зон тектонічної порушеності (рис. 5). Перші чотири автор інтерпретує, як тектоносмуги зсувного генезису. На цей факт вказують неоднорідність та ешелонований характер тектонічних зрушень вздовж тектонополос, їх ромбовидна геометрія та заглушення тектонічних деформацій з глибиною. Вони характеризуються шириною 50–100 м, швидше за все, простягаються за межами ділянки досліджень. Тектоносмуга 1 відповідає зоні впливу Глибокоярського і Федорівського скидів; тектоносмуга 2 – зоні малоамплітудних порушень північно-західного простягання (амплітуди зміщення 10–15 м). Дві інші зони порушеності, за даними геологічних досліджень не виділені. Проте слід зазначити, що в зоні розвитку тектоносмуги 3 при проходці гірничих виробок було виділено ряд малоамплітудних розривів. Тектоносмуга 4 не була виділена раніше як окремий тектонічний елемент, оскільки зона її розвитку перетинається з зоною впливу Центрального насуву (зона 5).

Спираючись на модель формування зсувів Ріделя, автором була виконана реконструкція полів напружень, що зумовила формування зон тектонічної порушеності. Зони 1–4 утворюють ромб, бісектриса гострого кута якого складає 126° , що відповідає осі максимального горизонтального стискування σ_1 , ортогонально йому розташована вісь максимального горизонтального розтягування σ_3 (рис. 5). Таке положення осей максимального напруження добре узгоджується з результатами досліджень Корчемагіна В.О., яким було

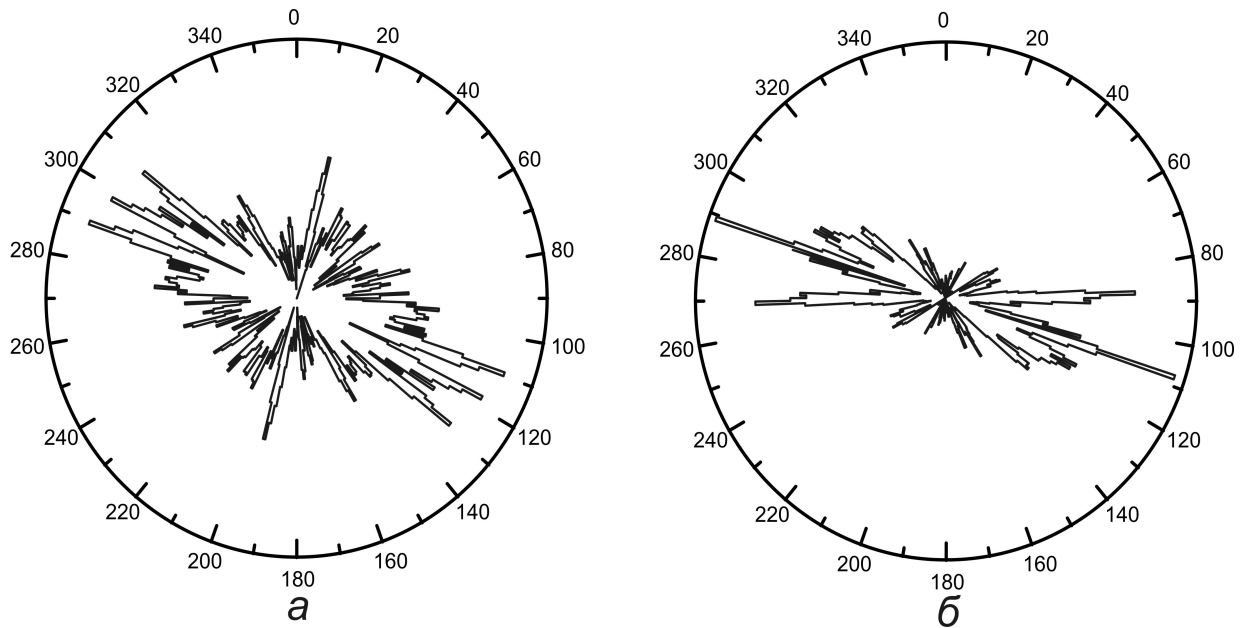


Рис. 4. Рози-діаграми розподілу напрямків тріщинуватості за компонентами кривизни хвильового поля (а) і за вимірами в гірничих виробках (б)

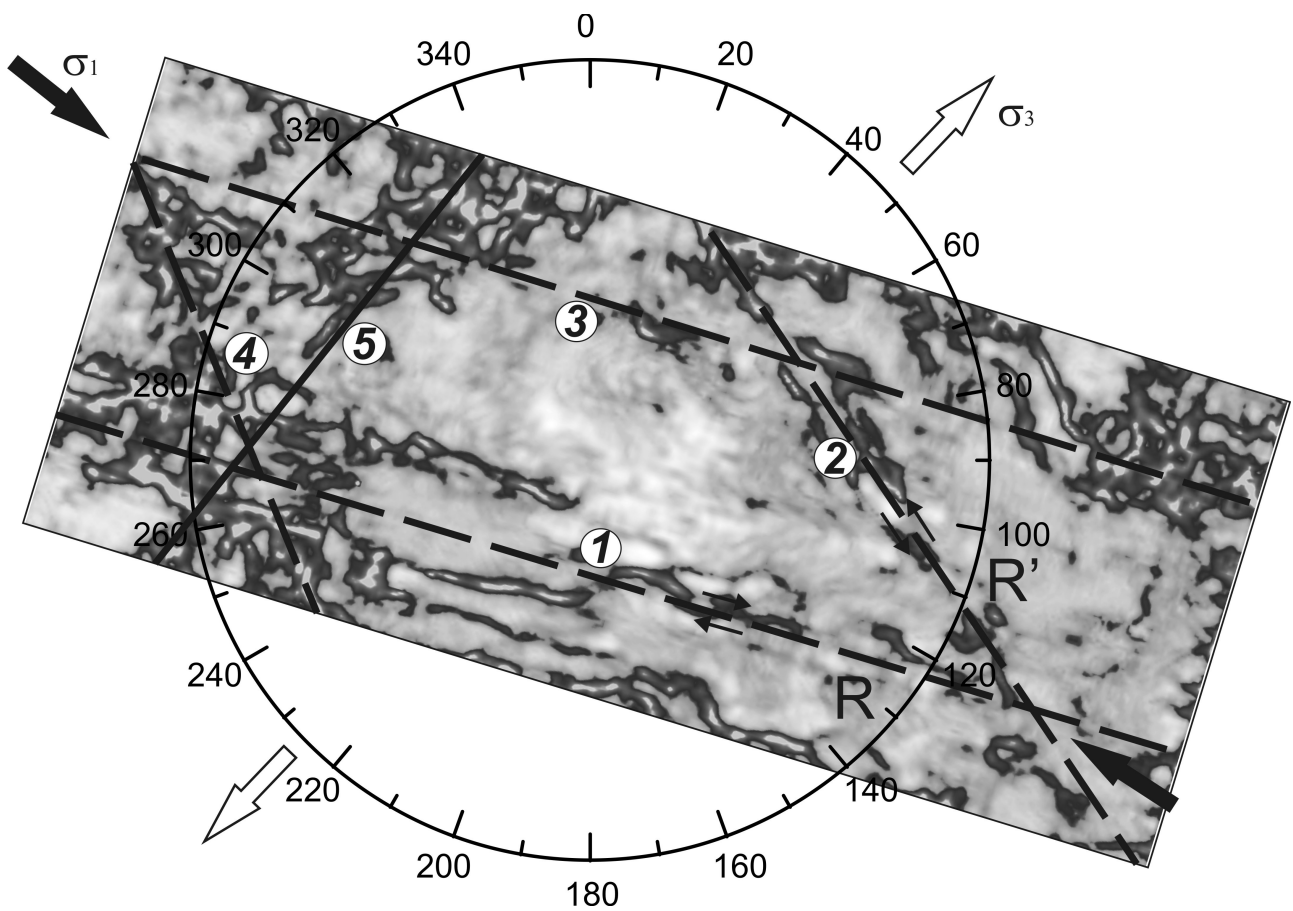


Рис. 5. Реконструкція напрямків максимальних напружень на ділянці Північно-Родинська поля шахти «Краснолиманська»

виконано тектонічну реконструкцію полів напружень Донецького басейну і встановлено, що саме останнє за часом прояву альпійське поле тектонічного напруження, що діє також на даний час, є зсувним і для нього характерне близько горизонтальне положення осей максимального розтягування і стискування.

У контексті метаноперспективності виділені тектоносмуги 1–4 служать каналами підживлення метаном з глибоких горизонтів і є зонами перспективними на наявність зон скупчення вільного метану. Тут слід зауважити, що проникність газового колектора визначається, у тому числі, й ступенем розкриття тріщин, яке для ешелонованих тріщин сколу може бути дуже значним. Окрім відносно великих протяжних тектоносмуг, на зрізах спостерігається ряд дрібніших аномалій. Деякі з них помітні тільки на певному зрізі, інші охоплюють декілька зрізів. Саме такі зони, що не мають виходу на поверхню, є найбільш сприятливими для скупчення вільного метану. Ці зони не досягли повної стадії тектонічного порушення. Так тектонічні дії призвели до розтріскування найбільш міцних порід (вугілля, піщаників, вапняків), але не порушили більш пластичні породи (глини), які зберегли властивості покришки. Перспективність таких зон підвищується за наявності структурного чинника – антиклінальної або структурно-літологічної пастки.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в ході виконання якої здобувачем розв'язане актуальне наукове завдання виділення зон малоамплітудної розривної порушеності й підвищеної тріщинуватості. Використання нових підходів в інтерпретації даних сейсморозвідки дозволило автору показати зв'язок когерентності та кривизни хвильового поля з розподілом тектонічних порушень гірничого масиву.

Виконані дослідження дозволили отримати наведені далі наукові й практичні результати:

1. Розроблено новий метод оцінки когерентності, який ґрунтується на моделі сейсмічного запису, що допускає довільне варіювання не лише рівнів сигналу, але й енергії завад у межах набору трас, що беруть участь у розрахунку даного атрибуту. Виконано тестування запропонованих алгоритмів і їх зіставлення з традиційними аналогами на синтетичних матеріалах.

2. Запропоновано універсальний підхід до підвищення горизонтальної роздільної здатності будь-якого методу розрахунку когерентності.

3. Проаналізовано методичні питання розрахунку атрибутів, які дають змогу підвищити ефективність останніх включають попередню обробку зображень, вибір розмірів ковзного вікна, використання окремих відбиваючих горизонтів або всього зображення, урахування нахилу відбиваючих меж.

4. Виконано програмну реалізацію розрахунку когерентності й кривизни хвильового поля.

5. Розроблену у рамках виконання дисертаційної роботи методику виділення зон підвищеної тріщинуватості на основі аналізу атрибутів хвильового поля апробована в умовах метановугільного розрізу в межах шахти "Краснолиманська".

6. Встановлено, що в полях когерентності та кривизни відображається зсувний генезис зон тектонічної порушеності в межах ділянки Північно-Родинська поля шахти "Краснолиманська".

Розроблена у рамках виконання дисертаційної роботи методика виділення зон підвищеної тріщинуватості на основі аналізу атрибутів хвильового поля представляє самостійне значення і використовується в науково-дослідних і виробничих організаціях України.

Основні положення дисертації опубліковані в таких роботах:

1. **Мендрій Я.В.** Трассирование разрывных нарушений по данным сейсморазведки / **Я.В. Мендрій** // Науковий вісник НГУ. – 2007. – № 4. – С. 96–98.

2. Довбнич М.М. Опыт прогноза трещиноватых зон при изучении нефтегазоперспективности юрских отложений Северо-Западной Сибири / М.М. Довбнич, М.С. Мачула, **Я.В. Мендрій** // Геоинформатика. – 2010. – № 1. – С. 50–57.

3. Геомеханическое моделирование деформационных процессов в осадочной толще: оценка напряженно-деформированного состояния и его геологическое истолкование / В.М. Полохов, М.М. Довбнич, В.П. Солдатенко, **Я.В. Мендрій** // Геоинформатика. – 2011. – № 3. – С. 46–53.

4. Довбнич М.М. Инновационные подходы геофизики и геомеханики при прогнозировании зон скопления свободного метана / М.М. Довбнич, **Я.В. Мендрій**, И.А. Виктосенко // Збірник наукових праць УкрНДМІ. – 2011. – № 9, Ч. II. – С. 311–325.

5. **Мендрій Я.В.** Наклонно-управляемые алгоритмы вычисления когерентности волнового поля: возможности и перспективы / **Я.В. Мендрій** // Збірник наукових праць УкрНДМІ.– 2011.– № 9, Ч. II. – С. 326–343.

6. Довбнич М.М. Перспективы геофизики и геомеханики при прогнозе зон тектонических деструкций углепородного массива / М.М. Довбнич, **Я.В. Мендрій**, А.И. Компанец, И.А. Виктосенко // Уголь Украины. – 2012. – №1. – С.44–48.

7. Довбнич М.М. Новые подходы к анализу геофизических данных при прогнозировании зон скопления свободного метана / М.М. Довбнич, **Я.В. Мендрій**, И.А. Виктосенко // Геоинформатика. – 2012. – № 1. – С. 32–38.

8. **Мендрій Я.В.** Развитие технологии расчета когерентности на основе усовершенствованных моделей сейсмической записи / **Я.В. Мендрій**, Ю.К. Тяпкин // Геофизический журнал. – 2012. – № 3. – С. 102–115.

9. Довбнич М. М. Атрибутивный анализ данных сейсморазведки – ключ к прогнозу зон тектонических деструкций углепородного массива / М.М. Довбнич, **Я.В. Мендрій**, И.А. Виктосенко // Підземні катастрофи:

моделі, прогноз, запобігання: матеріали міжнар. конф. – Дніпропетровськ: НГУ, 2011. – С. 89–97.

10. Опыт применения геомеханического моделирования при изучении нефтегазоперспективности юрских отложений Севера Западной Сибири / М.М. Довбнич, В.П. Солдатенко, П.В. Цыганенко, С.А. Онищенко, М.С. Мачула, **Я.В. Мендрий** // Геомодель-2009: материалы II междунар. конф. – Геленджик, 2009. – 1 электрон. опт. диск (CD-R).

11. **Mendrii I.** Geomechanical modelling – New possibilities in prediction of CO₂ storage properties / **I. Mendrii**, M. Dovbnich, I. Viktosenko // Sustainable Earth Sciences Conference & Exhibition – Technologies for Sustainable Use of the Deep Sub-surface: Expand. Abstr. – 2011. – P02, CD-R.

12. Dovbnich M. Application of geomechanical modeling and attribute analysis of seismic data in prediction of storage CO₂ properties / M. Dovbnich, **I. Mendrii**, I. Viktosenko // Форум гірників: матеріали міжнарод. конф. – Дніпропетровськ: НГУ, 2011. – С. 58–62.

13. Довбнич М.М. Возможности и перспективы инновационных подходов геофизики и геомеханики в изучении зон скопления свободного метана: от модели к прогнозированию / М.М. Довбнич, **Я.В. Мендрий**, И.А. Виктосенко // Форум гірників: матеріали міжнарод. конф. – Дніпропетровськ: НГУ, 2011. – С. 63–72.

14. Довбнич М.М. Зоны скопления свободного метана: от модели к прогнозированию (некоторые возможности геофизики и геомеханики) / М.М. Довбнич, **Я.В. Мендрий**, И.А. Виктосенко // Современные методы сейсморазведки при поисках месторождений нефти и газа в условиях сложнопостроенных структур «Сейсмо-2011»: материалы 2-й междунар. науч.-практ. конфер. – 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-R).

15. Тяпкин Ю. Усовершенствованная мера сейсмической когерентности, использующая более реалистичную модель данных. / Ю. Тяпкин, **Я. Мендрий** // Современные методы сейсморазведки при поисках месторождений нефти и газа в условиях сложнопостроенных структур «Сейсмо-2012»: материалы 3-й междунар. науч.-практ. конфер. – 2012. – 1 электрон. опт. диск (CD-R).

16. Tyapkin Y. Improved measure of seismic coherence using a more realistic data model / Y. Tyapkin, **I. Mendrii** // 74th EAGE Conference & Exhibition: Expand. Abstr. – 2012. – P085, CD-R.

Особистий внесок автора в роботи, які опубліковані в співавторстві: 2, 3, 8–11 – аналіз стану питання, методика розрахунку когерентності хвильового поля; 5, 6, 12–14 – формування завдання, методика розрахунку когерентності хвильового поля, аналіз отриманих результатів; 7, 15–16 – програмна реалізація алгоритмів, проведення розрахунків когерентності хвильового поля, геологічна інтерпретація.

АНОТАЦІЯ

МЕНДРІЙ Я.В. «Прогнозування зон тріщинуватості за даними сейсморозвідки в умовах вугленосних формацій». – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата геологічних наук за спеціальністю 04.00.22 – «Геофізика». Державний ВНЗ «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України м. Дніпропетровськ, 2013 р.

Дисертація присвячена актуальним питанням виділення зон малоамплітудної розривної порушеності та тріщинуватості вуглепородного масиву за сейсмічними даними.

Розглянуто генезис зон тріщинуватості тектонічного походження. Виділено основні характеристики тріщин важливі для формування зон скупчень вільного метану такі як щільність, ступінь розкриття, геометрія мережі тріщин та їх взаємозв'язок.

На основі аналізу існуючих методик виділення зон тріщинуватості за сейсмічними даними обґрунтовано застосування таких атрибутів сейсмічного запису, як когерентність та кривизна.

Розроблено новий метод оцінки когерентності, в який покладено за основу модель сейсмічного запису, що допускає довільне варіювання не лише рівнів сигналу, але і енергії завад в межах набору трас, що беруть участь в розрахунку даного атрибуту. На основі чисельного експерименту виконано порівняльний аналіз традиційних і нових методів розрахунку когерентності, який показав більш реалістичні, близькі до теоретичних значень оцінки пропонованих підходів в умовах високого рівня завад.

Запропоновано універсальний підхід до підвищення горизонтальної роздільної здатності будь-якого методу розрахунку когерентності.

Розроблена у рамках виконання дисертаційної роботи методика прогнозування зон підвищеної тріщинуватості на основі аналізу атрибутів хвильового поля була апробована в умовах метановугільного розрізу на ділянці Північно-Родинська шахти "Краснолиманська". Аналіз поля сейсмічних атрибутів в комплексі з тектонофізичними дослідженнями дозволив встановити генезис зон тектонічної порушеності.

Ключові слова: тріщинуватість, зона скупчення метану, сейсморозвідка, когерентність и кривизна хвильового поля, шахта «Краснолиманська».

АННОТАЦИЯ

МЕНДРИЙ Я.В. «Прогнозирование зон трещиноватости по данным сейсморозведки в условиях угленосных формаций». – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата геологических наук по специальности 04.00.22 – «Геофизика» Государственное ВУЗ «Национальный горный университет» Министерства образования и науки Украины, г. Днепропетровск, 2013 г.

Диссертация посвящена актуальным вопросам выделения зон тектонической нарушенности углепородного массива по сейсмическим данным.

Рассмотрен генезис зон трещиноватости тектонического происхождения, которые играют основную роль при формировании зон скопления метана. Эти зоны служат резервуарами, содержащими как свободный, так и сорбированный на стенках многочисленных трещин газ, служат хорошими путями миграции метана к эксплуатационным скважинам в процессе добычи. Выделены основные характеристики трещин, важные для формирования зон скопления свободного метана, такие как плотность, степень раскрытия, геометрия сети трещин и их взаимосвязь.

На основании анализа существующих методик выделения зон трещиноватости по сейсмическим данным обосновано использование таких атрибутов сейсмической записи, как когерентность и кривизна волнового поля.

Разработан новый метод оценки когерентности, основанный на модели сейсмической записи, допускающей произвольное варьирование не только уровня сигнала, но и энергий помех в пределах набора трасс, участвующих в расчете этого атрибута. На основе численного эксперимента выполнен сравнительный анализ нового метода с его традиционными аналогами, который показал более реалистичные, близкие к теоретическим оценки предлагаемого метода в условиях высокого уровня помех.

Разработан универсальный подход к повышению горизонтальной разрешающей способности любого метода расчета когерентности.

Выполнена программная реализация расчета когерентности и кривизны волнового поля.

Предлагается использовать атрибуты кривизны (индекс изгиба слоев, индекс формы и азимута минимальной кривизны) не только для выделения зон тектонической нарушенности, но и для определения направлений простирания трещин, что при наличии информации о направлении современного максимального горизонтального напряжения позволит оценить степень раскрытия трещин.

Разработанная в рамках выполнения диссертационной работы, методика выделения зон повышенной трещиноватости была апробирована в пределах участка Северо-Родинского поля шахты «Краснолиманская». В результате интерпретации сейсмических данных, основанной на анализе атрибутов волнового поля, было получено распределения разрывных нарушений и зон повышенной трещиноватости в пределах участка исследований, сделаны выводы об их метаноперспективности. Опираясь на модель формирования сдвигов Риделя, автором была выполнена реконструкция полей напряжений, обусловивших формирование тектонической нарушенности.

Ключевые слова: трещиноватость, зоны скопления метана, сейсморазведка, когерентность и кривизна волнового поля, шахта «Краснолиманская»

ABSTRACT

Mendrii I. "Prediction of fracture zones in coal-bearing formations from seismic data." - Manuscript.

Thesis for Candidate Degree of Geological Sciences by specialty 04.00.22 - "Geophysics" State Institution of Higher Education "National Mining University" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnepropetrovsk, 2013

The thesis is devoted actual problem of delineation of fracture zones in coal-bearing formations from seismic data.

The genesis fractured zones of tectonic origin, which play a major role in the formation of coal bed methane (CBM) production sweet spots is considered. The main fracture characteristics important for the formation of CBM production sweet spots such as density, degree of disclosure, the geometry of the fracture network and their relationship are identified.

Based on the analysis of existing techniques for detecting fracture zones from seismic data the use of such seismic attributes as coherence and curvature are justified.

A new method for estimating coherence is developed. It is based on a more realistic model of seismic data that permits arbitrary variations of signal amplitudes and noise variances across the traces involved in coherence computation. Completed testing of the algorithms and their comparison with conventional counterparts on synthetic materials. A generalized approach to enhance the horizontal resolving power of any coherence measure has been suggested.

The developed method for detecting fracture zones has been tested within the area of North-field Rodinsky mine "Krasnolimanska". The analysis of the field of seismic attributes in combination with tectonophysical studies revealed shear genesis of fracture zones.

Keywords: fractures, CBM production sweet spots, seismic exploration, the coherence and the curvature of the wave field, the mine "Krasnolimanska".