

Виявлення геологічних порушень геофізичними методами з метою прогнозу загрозливих факторів при підземній розробці корисних копалин

О.В. Сухініна, 2022

Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України,
Київ, Україна
Надійшло 16 серпня 2022 р.

Для ефективного та безпечного видобутку корисних копалин підземним способом необхідний високоточний прогноз геологічних порушень, особливо малоамплітудних тектонічних. Наближені до реальних дані щодо розміщення порушень у масиві гірських порід зменшують імовірність обвалення та викиду гірських порід, вибуху газу, прориву води. Моделювання тектонічної будови масиву порід за даними розвідувального буріння і наземних геофізичних спостережень мають вирішальне значення для розробки корисних копалин. Зазвичай у районах видобутку корисних копалин тектонічні порушення добре вивчені за допомогою цих даних, але змодельовані тектонічні порушення мають вигляд умовних спрощених поверхонь, які поділяють різні структурні частини масиву порід і, отже, не розкриваються гірничими роботами. Реальна структура порушеності виявляється у процесі гірничих робіт, але для подальшого прогнозу порушень потрібно залучення методів сейсмозвідки. Досвід застосування цих методів показано на прикладах досліджень тектонічної порушеності вугільних пластів на шахтних полях Донбасу в період від 2008 до 2012 р.

Можливості підземної та наземної 2D сейсмозвідки точно прогнозувати розміщення порушень продемонстровано на ділянці шахти «Дніпровська», яка характеризується найбільшим обсягом даних розвідувального буріння та геофізичних досліджень. На відміну від практики робіт, коли ділянки пластів списуються за результатами досліджень через складні геологічні умови або не документуються геологами під час відпрацювання лав, на згаданій ділянці проведено картування реальних порушень, розкритих гірничими роботами.

Попередні та виконані за допомогою сейсмозвідки СГТ прогнози порушень зіставлені з реальними порушеннями, розкритими підземними гірничими роботами.

Серед поодиноких випадків досліджень шахтних полів методом сейсмозвідки 3D СГТ наведено приклад досліджень на полі шахти «Краснолиманська». Проаналізовано результати прогнозу тектонічних порушень, особливостей обробки та інтерпретації даних.

Результати досліджень, що викладені в цій статті, можуть бути використані для подальшого розвитку методів сейсмозвідки з метою високоточного прогнозу геологічних порушень.

Ключові слова: геологічне порушення, малоамплітудне тектонічне порушення, гірничавиробка, підземна сейсмозвідка, відбивні хвилі, спільна глибинна точка, високоточний прогноз, поле шахти, 2D і 3D сейсмічні знімання, інтерпретація.

Вступ. Інформація про геологічні порушення масиву гірських порід, що містять корисні копалини, дає змогу оптимізувати видобуток та уникнути аварійних ситуацій. Основні закономірності розташування

геологічних порушень добре досліджені в районах залягання корисних копалин.

Проте безпосередній контакт з масивом порід у процесі видобутку виявляє або відхилення наявної картини порушення від

апріорної моделі, або недостатню деталізацію моделі. Неочікувана зустріч з тектонічними порушеннями створює різні ускладнення — від зміни ритму робіт до аварійних ситуацій, наприклад, прориву води, вибуху газу, викиду та обвалу породи. Цю проблему буде розглянуто на прикладі досліджень, що виконувались за участю авторки в Українському державному науково-дослідному і проектно-конструкторському інституті гірничої геології, геомеханіки і маркшейдерської справи НАН України (УкрНДМІ).

Метод. Такий геофізичний метод, як сейсморозвідка в наземному та підземному виконанні, застосовується для прогнозу порушень з деталізацією, що дає змогу планувати безпечні підземні гірські роботи [Goossens, Buchanan, 1984; Malehmir et al., 2012].

Історія. Починаючи з 80-х років ХХ ст. в УкрНДМІ розпочалися дослідження та впровадження сейсморозвідки з цифровою реєстрацією та обробкою сигналів з метою прогнозу порушення вугільних пластів у вугільних басейнах колишнього СРСР. Цей напрям був ініційований показом технології шахтної сейсморозвідки на міжнародній виставці «Вугіль-83», що пройшла в Донецьку. Німецька компанія PRAKLA SEISMOS пропонувала обладнання для підземної цифрової реєстрації сейсмічних сигналів, програми та методику обробки даних.

Керівниками вугільної галузі було придбано кілька комплектів сейсмічного обладнання, проте методику та оброблювальні програми вирішили не купувати. Спираючись на відкриті дані з методики та обробки даних, в інституті у співпраці з відомою у СРСР на той час Центральною геофізичною експедицією було створено комплект програм для обробки даних підземної сейсморозвідки у вугільних пластах.

Багато програм запозичили з комплекту програм для обробки даних наземної сейсморозвідки. Порівняно з наземним варіантом сейсморозвідки відбитими хвилями в підземних гірничих виробках спо-

стерігалось простіше хвильове поле, але обробка та інтерпретація даних підземної сейсморозвідки відбитими хвилями виявилась складною внаслідок дуже низького рівня відбитих хвиль на тлі перешкод. Це пов'язано з характером границь, що відбивають хвилі. Вони представлені шорсткими поверхнями тектонічних порушень, границями зон підвищеної тріщинуватості та зон розмиву вугільного пласта.

Недоліки підземної сейсморозвідки відбитими хвилями перетворюються на переваги сейсморозвідки прямими хвилями, що просвічують ділянку пласта між пунктами збудження та прийому хвиль. Прямі хвилі втрачають значну частину своєї енергії або змінюють свої частотні та швидкісні параметри при проходженні через тектонічні порушення, зони підвищеної тріщинуватості та розмиви вугільного пласта, що надає більш наявні критерії порушення для інтерпретації результатів.

На початку більша частина сейсмічних досліджень виконувалась за методом сейсмічної томографії (просвічування прямими хвилями). Надалі скорочення фінансування програм підземної сейсморозвідки призвело до скорочення робіт методом просвічування, який потребує багато часу та спеціальних умов для виконання досліджень.

Метод просвічування виконується за наявності не менше ніж трьох виробок, що оконтурюють ділянку досліджень:

- для збудження сейсмічних хвиль;
- для прийому хвиль;
- для розташування лінії зв'язку між сейсмічним обладнанням у перших двох.

Якісний результат потребує значної кількості пунктів збудження та прийому хвиль. Підготовка досліджень і сам експеримент проводились протягом щонайменше одного тижня та потребували зупинки гірських робіт для забезпечення акустичної тиші. До того ж дослідження лише уточнюють положення порушень, що були вже розкриті виробками по контуру ділянки досліджень.

Надалі потреба у детальному випереджальному прогнозі порушень стимулю-

вала розвиток підземної сейсморозвідки відбитими хвилями, яка була простіша за виконанням порівняно із сейсморозвідкою прямими хвилями [Кенжин та ін., 2009].

Менш тривала зупинка гірничих робіт для проведення сейсмічного експерименту відбитими хвилями не порушувала темпу видобувних робіт. Для розташування пунктів збудження і прийому хвиль була потрібна лише одна гірничка виробка. Сейсморозвідка відбитими хвилями в методи локації виконувалася навіть із вибою одиначної гірничої виробки.

Огляд методів сейсморозвідки відбитими хвилями, що були випробувані та розвивалися в УкрНДМІ для прогнозу тектонічних порушень вугільних пластів, буде показано на конкретних прикладах.

Сейсмічні дослідження на шахті «Дніпровська». На полі вугільної шахти «Дніпровська», що розташована в Західному Донбасі на північно-східному схилі Українського щита, у період розвідки та дорозвідки родовища тектонічне порушення вугленосної товщі було досліджено у найповнішому обсязі.

З початку пошукових робіт у 1951 р. до здачі в експлуатацію у 1975 р. та впродовж експлуатації площу шахтного поля було розбурено по прямокутній мережі, відстань між лініями 300—400 м, між свердловинами 150—300 м.

У період з 1991 по 2002 р. співробітниками Придніпровської геофізичної експедиції та інших геолого-геофізичних підприємств України з метою вивчення малоамплітудних порушень та їх елементів залягання було здійснено дорозвідку шахтного поля такими геофізичними методами, як наземна сейсморозвідка, структурне геодинамічне картування, природне імпульсне електромагнітне поле Землі.

Встановлено, що тектонічна будова осадової товщі, яка містить вугільні пласти, спадкує блокову будову кристалічного фундаменту, створену системою численних паралельних і збіжних скидів. Скиди розривають всю вугленосну товщу, їхні площини зміщувачів мають відносно прості просторові характеристики.

У 2008—2010 рр. на цій шахті було обрано експериментальну ділянку для дослідження малоамплітудних тектонічних порушень вуглепородного масиву методами наземної та підземної сейсморозвідки. Робота виконувалась фахівцями УкрНДМІ у рамках створення пілотного проєкту автоматизованої системи для прогнозу гірничо-геологічних умов розробки вугільних родовищ на основі створення просторової геолого-геофізичної моделі вуглепородного масиву.

На обраній ділянці (рис. 1) за апріорними даними розташовані скиди № 14 та № 2 з амплітудою зміщення 5—8 м.

Гірничими роботами у вугільному пласті C_{10}^B було розкрито скид № 2 з орієнтовною амплітудою 7,6 м північніше 1052 лави і апофізи скиду № 14 у вигляді дрібних амплітудних порушень з амплітудами від 0,07 до 1,35 м у 1084-му збірному штреку.

З метою уточнення положення цих скидів та їхніх апофіз на рівні вугільного пласта C_{10}^B в районі запланованих гірничих робіт було проведено сейсмічні дослідження у 2008 і 2010 рр. Дослідження 2008 р. склалися з наземної сейсморозвідки над експериментальною ділянкою та підземних сейсмічних досліджень. Лінії сейсмічних профілів та результати досліджень у вигляді зон порушень вугільного пласта зображені на оглядовій карті експериментальної ділянки (див. рис.1). Зони порушень I—VIII отримано за даними наземної зйомки, зони А1-А2, А3-А4, Б1-Б2, В1-В2, Г1-Г2, Д1-Д2, Д3-Д4, Е1-Е2 — за даними підземної зйомки.

Вугільний пласт C_{10}^B на цій ділянці залягає на невеликій відстані від земної поверхні (230—240 м), чим відрізняється від більшості інших об'єктів досліджень у Донбасі, де гірничі роботи виконуються на глибинах від 600 до 1500 м. Цей факт додатково ускладнив обробку сейсмічних даних та вплинув на отримані результати.

Використання наземної сейсморозвідки для прогнозу порушення вугільних пластів можливе за наявності потужних сейсмолітологічних, та сеймостратиграфічних границь поблизу вугільних пластів і про-

сторового зв'язку прояву порушень у вуглевміщувальній товщі з вугільним пластом. Самі вугільні пласти внаслідок невеликої потужності є прозорими для сейсмічних хвиль з поверхні землі.

Вуглевміщувальна товща на площі досліджень представлена нашаруванням пісковиків, алевролітів та аргілітів потужністю 15—30 м та сприяє створенню низькочастотного інтерференційного пакету відбитих хвиль (30—40 Гц). Проте найпотужнішою є сейсмостратиграфічна границя між породами карбону та палеогену, що за умов неглибокого залягання вугільного

пласта наближена до нього досить близько (120—150 м). Тому хвилі, заломлені на поверхні порід карбону і відбиті від меж нашарування порід у безпосередній близькості від вугільного пласта C_{10}^B , практично не розділені в часі і навіть перекриваються. Оскільки зменшення співвідношення сигнал/перешкода в процесі стиснення хвильових пакетів при обробці даних виявилось критичним для слабких відбитих хвиль, заломлені хвилі були обнулені на ширину хвильового пакету. Це призвело до того, що хвилі відбиті від поверхонь нашарування порід вище за рівень і на рів-

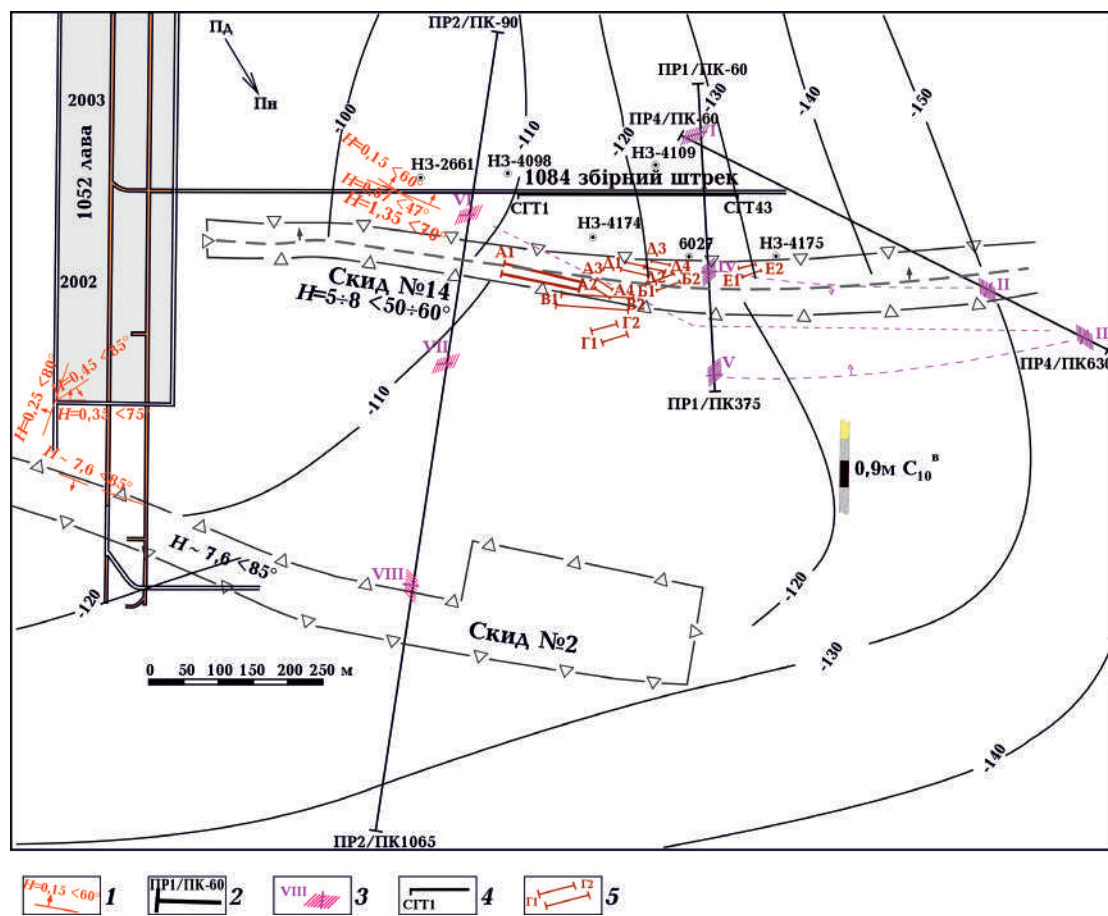


Рис. 1. Оглядова карта експериментальної ділянки на полі шахти «Дніпровська» на момент виконання сейсмічних досліджень у 2008 р.: 1 — тектонічні порушення вугільного пласта C_{10}^B , що розкрито гірничими роботами; 2 — наземний профіль сейсмозв'язки; 3 — зона порушень вугільного пласта C_{10}^B за даними наземної сейсмозв'язки; 4 — підземний профіль сейсмозв'язки; 5 — зона порушень вугільного пласта C_{10}^B за даними підземної сейсмозв'язки.

Fig. 1. Overview map of the experimental site at the Dniprovskaya mine at the time of seismic research in 2008: 1 — faults of the C_{10}^B coal seam exposed by mining operations; 2 — ground seismic profile; 3 — fault zone of the C_{10}^B coal seam according to ground seismic data; 4 — underground seismic profile; 5 — fault zone of the C_{10}^B coal seam according to the data of underground seismic survey.

ні вугільного пласта C_{10}^B , були відрізані, а перші відбиття, зафіксовані на глибинних розрізах методом спільної глибинної точки (МСГТ), були отримані від меж, що залягають в середньому на 70 м глибше за вугільний пласт.

Глибинні розрізи МСГТ (рис. 2) отримані при обробці поздовжніх відбитих хвиль, що спостерігаються на частоті 30—40 Гц та розповсюджуються у вуглевміщувальній товщі зі швидкістю 2800 м/с. На розрізах

тектонічні порушення виділено за наступними ознаками:

- аномальне згасання енергії відбитих сейсмічних хвиль у зоні порушення;
- втрата кореляції відбитих сейсмічних хвиль у зоні порушення;
- зсув осей синфазності відбитих сейсмічних хвиль у зоні порушення;
- зміна рівня відбитих хвиль внаслідок зміни швидкості у зонах впливу тектонічних порушень.

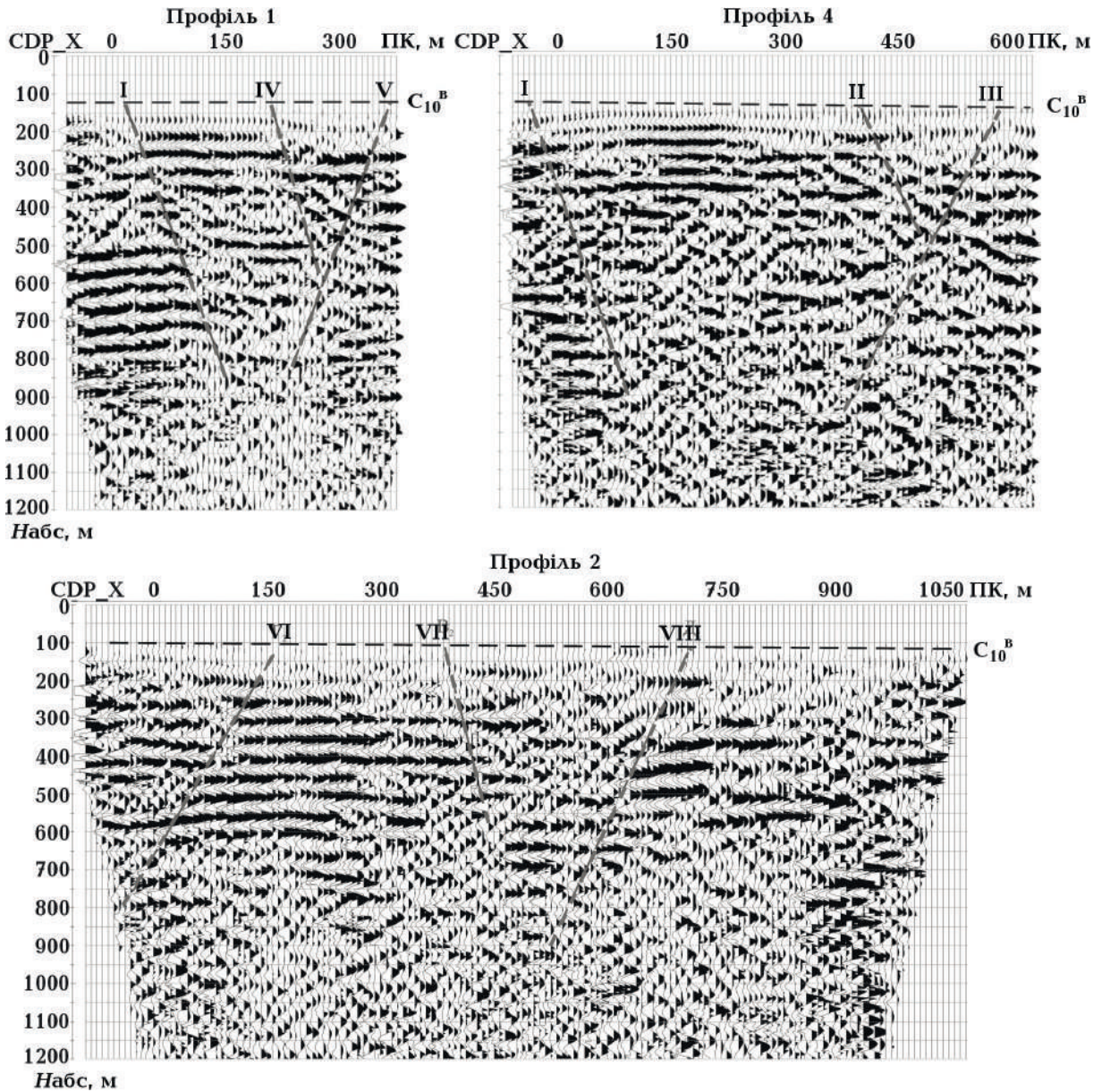


Рис. 2. Розрізи МСГТ за даними наземної сейсмозв'язки на ділянці поля шахти «Дніпровська».

Fig. 2. CDP cross-sections according to the data of ground seismic survey at the «Dniprovsk» mine.

Рівень вугільного пласта C_{10}^B зображено на розрізах МСГТ пунктирною лінією, до якої були продовжені лінії схрещування площин зміщувачів тектонічних порушень з глибинними розрізами.

З урахуванням апріорних даних тектонічні порушення було ідентифіковано і простежено між профілями на плані пласта. Для ідентифікації порушень використовували такі ознаки, як нахил площини зміщувача тектонічного порушення та схожість хвильового малюнку в крилах.

Підземний сейсмічний профіль МСГТ довжиною 315 м був розташований у 1084-му збірному штреку одиночної в той час гірничої виробки на площі робіт. Для прогнозу порушень було обрано прямі поздовжні хвилі, що розповсюджуються у породах, що містять вугільний пласт. Швидкість хвиль може змінюватися зі зміною типу порід, у межах профілю коливалася від 2800 до 3100 м/с. Тектонічні порушення за даними підземної зйомки зображені у вигляді пари поверхонь, що відбивають сейсмічні хвилі. Ширина пари зумовлена похибкою у визначенні швидкості та фази хвилі.

Наступні гірничі роботи (рис. 3) підтвердили наявність порушень у зоні Г1-Г2, що була спрогнозована підземними сейсмічними дослідженнями, та розкрили тектонічні порушення в зоні скиду № 2. Щоб визначити напрямок розповсюдження порушень у 1086-й лаві між 1086-м збірним і 1086-м бортовим штреками, у 2010 р. були проведені підземні сейсмічні дослідження. Підземний сейсмічний профіль МСГТ довжиною 240 м був розташований у 1086-му бортовому штреку. Також було виконано сейсмічні дослідження методом просвічування між 1086-м збірним і бортовим штреками.

За результатами досліджень відбитими хвилями виявлено, що малоамплітудне порушення у вигляді скидів з амплітудами зміщення від 1,1 до 4,8 м в 1086-му бортовому штреку розповсюджується у південно-східному напрямку в бік 1086-го збірного штреку (зона 1-1) до середини 1086 лави. Зони 2-2 і 3-3 з довжиною мен-

шою ніж профіль МСГТ прогнозувалися як дрібні порушення з амплітудами порядку та менше потужності вугільного пласта. Дослідження методом просвічування підтвердило значне порушення пласта в районі зони 1-1 та відсутність порушень з амплітудою, що перевищує потужність пласта, поза зоною 1-1.

На сейсмічному розрізі МСГТ за результатом підсумовування поздовжніх хвиль (рис. 4) можна побачити відбиття 1-1, 2-2, 3-3 та навіть відбиття 5-5 від протилежного 1086-го збірного штреку, слабке за зоною 1-1 і більш потужне за її межами, що також свідчить про значну амплітуду порушення в зоні 1-1. Вісь синфазності 4-4 відноситься до поперечних хвиль, що розповсюджуються повз 1086-й бортовий штрек та відбиваються від зони малоамплітудного порушення, що позначена, як 4 на плані пласта.

Надалі ділянка сейсмічних досліджень була майже повністю розкрита гірничими роботами, що дало змогу оцінити достовірність сейсмічного прогнозу (рис. 5).

Зона порушення 1-1 за даними підземної сейсмічної зйомки 2010 р. збіглася у 1086-й біс лаві з розкритим порушенням у вигляді скидів із сумарною амплітудою зміщення 4 м. Також підтвердилося поступове згасання його амплітуди у південно-східному напрямку від 2,5 м до дрібних тріщин у 1086-й біс розрізної печі. Інші зони, прогнозовані у 2010 р., не підтвердилися гірничими роботами. Припущення про зону 2-2 будуть наведені нижче. Зона 3-3, імовірно, пов'язана з літологічною границею в породах, що містять вугільний пласт.

Майже всі зони порушень, прогнозовані за результатами підземної зйомки 2008 р., залишилися на невідпрацьованій ділянці пласта. Відсутність у сусідніх лавах порушень з апріорною амплітудою скиду № 14 свідчить про розповсюдження скиду в цій невідпрацьованій частині, що може бути доказом підтвердження сейсмічного прогнозу зон порушень А1-А2, А3-А4, Б1-Б2, Д1-Д2, Д3-Д4, Е1-Е2. Зона Г1-Г2 збіглася з апофізою скиду № 14 у 1086-му збірному штреку.

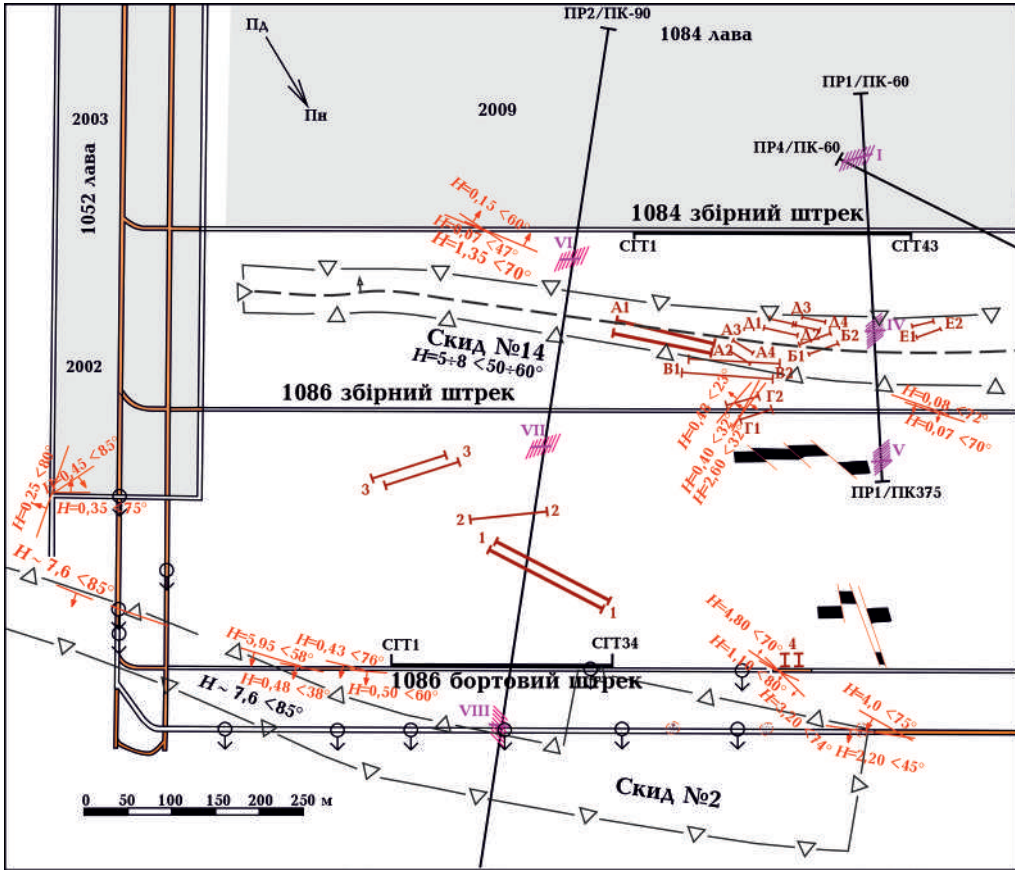


Рис. 3. Експериментальна ділянка на полі шахти «Дніпровська» на момент сейсмічних досліджень 2010 р.
 Fig. 3. An experimental site at the «Dniprovskaya» mine at the time of seismic survey in 2010.

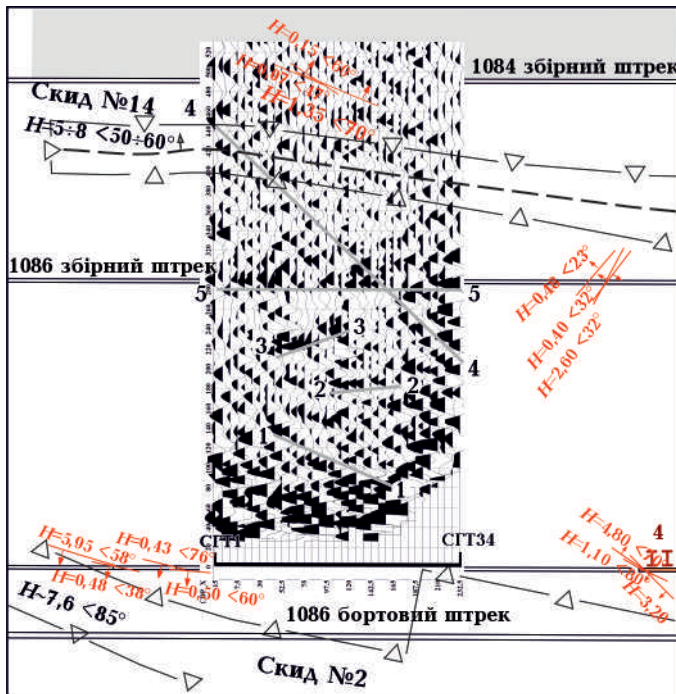


Рис. 4. Розріз МСГТ за даними підземної сейсморозвідки у 1086-й біс лаві на ділянці поля шахти «Дніпровська».
 Fig. 4. CDP cross-section according to the data of underground seismic survey in panel 1086 bis at the «Dniprovskaya» mine.

Прогноз за даними наземної сейсмічної зйомки 2008 р. підтвердився частково. Зону I на профілях 1 і 4 не було підтверджено, зону II на профілі 4 підтверджено опосередковано, зона III, імовірно, пов'язана з дрібноамплітудними скидами на кінці 1086-го збірного штреку, але її положення визначено з похибкою у декілька десятків метрів. Зону IV на профілі 1 підтверджено опосередковано, зону V не підтверджено. Зону VI на профілі 2 підтверджено опосередковано, зону VII майже підтверджено, зона VIII відповідає скиду № 2, але її положення визначено з похибкою у декілька десятків метрів. Зараз очевидно, що було пропущено порушення між зонами VII та VIII (див. рис. 2), що відповідає скиду з амплітудою 4 м у 1086-й біс лаві. За тими ж ознаками можна припустити наявність широкої зони порушень за VIII зоною на кінці профілю 2.

Трасування між зонами порушень на плані пласта надає дуже приблизну карти-

ну розповсюдження порушень. Лінія між зонами III і V явно помилкова. Лінія між зонами II і V, можливо, приблизно зображує положення скиду № 14, або його апофізи. Найімовірнішим зображенням скиду № 14 виглядає лінія, що з'єднує зону VI на профілі 2 і зону III на профілі 4 та проходить між зонами IV і V на профілі 1.

Ділянку вугільного пласта з сейсмічними роботами 2010 р. також було досліджено у 2012 р. силами підрозділу DMT (Exploration & Geosurvey) німецької компанії ІМС Montan Consulting GmbH, Essen на замовлення компанії ДТЕК «Павлоградвугілля». На відміну від зйомки, що була виконана силами УкрНДМІ, ця зйомка відрзнялася великим обсягом сейсмічних вимірювань. Пласт був просвічений у прямому та зворотному напрямках, дослідження відбитими хвилями здійснені в обох штреках (збірному і бортовому) на більш довгих профілях, більш досконалі датчики реєстрували два компоненти хвильового поля.

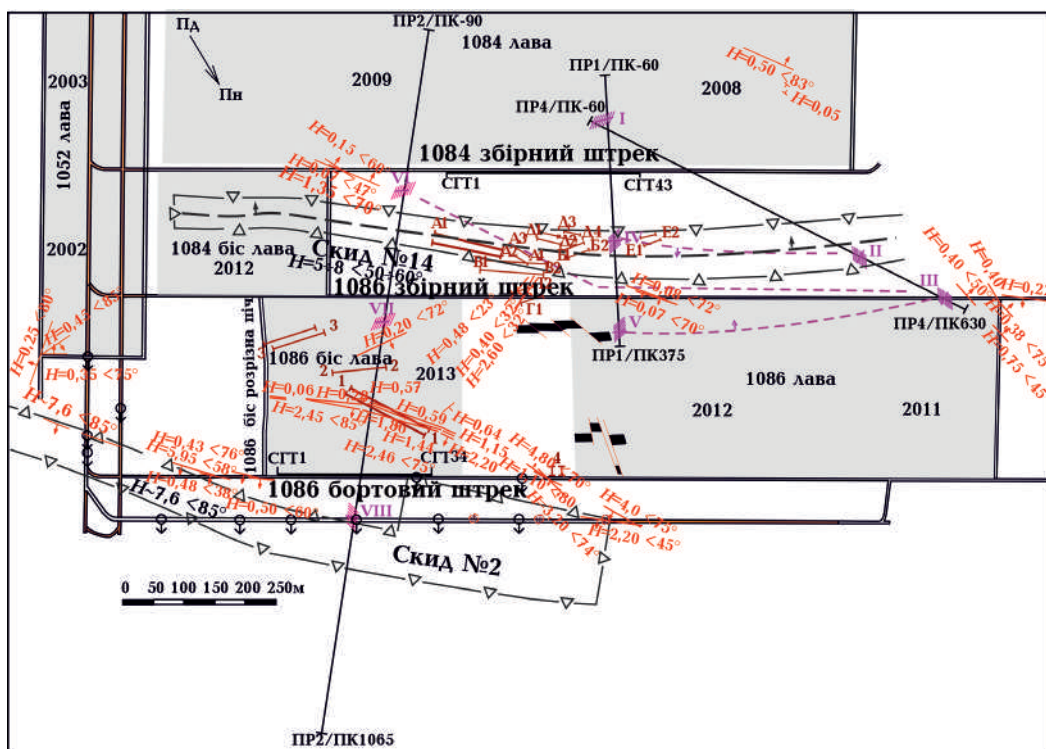


Рис. 5. Підтвердження прогнозу тектонічних порушень гірничими роботами на експериментальній ділянці сейсмічних досліджень на полі шахти «Дніпровська».

Fig. 5. Verification of the faults prediction by mining operations at the experimental site of seismic survey at the «Dniprovsk» mine.

Також реєстрували та обробляли хвилі іншого типу (у дослідженні УкрНДМІ тільки прямі поздовжні хвилі). Дослідження DMT виконали за допомогою інтерференційних хвиль, що розповсюджуються у хвильовому каналі, який складається з ослаблених порід покрівлі, підшви і вугільного пласта, розташованих між пісковиками. Частотні, швидкісні характеристики та орієнтація коливань цих каналових хвиль мало відрізняються від параметрів прямих поперечних хвиль, що розповсюджуються у суміжних відносно вугільного пласта породах і які аналізувалися у дослідженні УкрНДМІ. За результатами томографічної оцінки [Schott, Waclawik, 2015] та обробки відбитих хвиль за допомогою каналових хвиль були отримані дуже важливі геологічні параметри — напрямок падіння площини зміщувача порушення, амплітуда зміщення та відстань від вугільного пласта до пісковика.

На рис. 6 зіставлені результати сейсмічного прогнозу DMT (R1, R2, R3) і УкрНДМІ (1-1, 2-2, 3-3) з тектонічними порушеннями, що були розкриті гірничими роботами у 1086 біс лаві. Зони R1 і 1-1 збіглися з реальним порушенням вугільного пласта значної амплітуди. Зони R2 та 2-2 збіглися одна з одною, але не відповідали жодному порушенню у вугільному пласті.

Наявність відбиття R2, 2-2, імовірно, пов'язана з відбиттям поперечних хвиль від потужної сейсмостратиграфічної границі між породами карбону та палеогену, що залягає вище вугільного пласта на відстані приблизно 120—150 м, тому що осі чутливості датчиків сейсмічних хвиль, що орієнтовані в площині вугільного пласта, збігалися з напрямком зміщень частинок середовища в поперечній хвилі субвертикального поширення. Тобто датчики максимально сприяли прийому поперечних хвиль такого поширення.

В експерименті УкрНДМІ використовували датчики з однією віссю чутливості, що була спрямована у вугільний пласт поперек штреку. У разі розташування границі 2-2 в площині пласта лише незначну частку енергії відбитих поперечних хвиль було зареєстровано такими датчиками. І навпаки, на сейсмічному розрізі МСГТ за результатом підсумовування поперечних хвиль (рис. 7, б) границя 2-2 має більшу інтенсивність і протяжність порівняно із сумою поздовжніх хвиль (див. рис. 4).

Розповсюдження поперечних хвиль від вугільного пласта до границі на межі порід карбону та палеогену схематично зображено на рис. 7, а.

Стрілками показано, що осі чутливості датчика сейсмічних хвиль орієнтовані

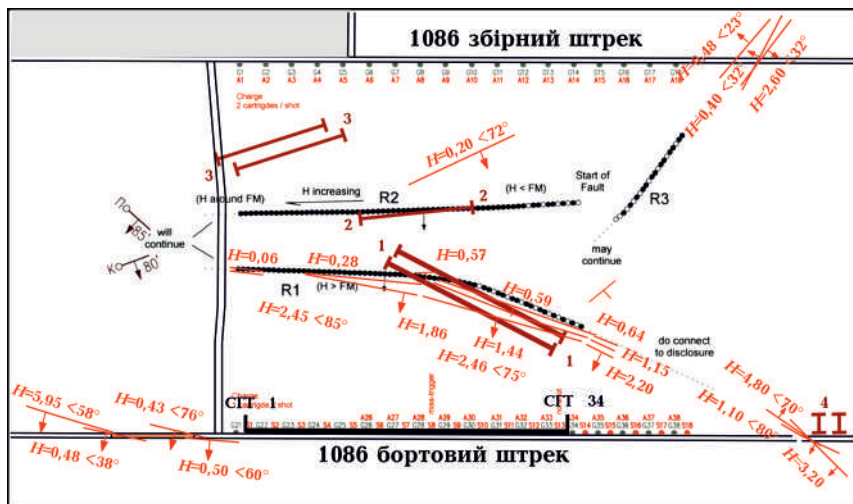


Рис. 6. Зіставлення результатів сейсмічного прогнозу порушень у 1086-й біс лаві на ділянці поля шахти «Дніпровська».

Fig. 6. Comparison of the results of the seismic prediction of faults in the panel 1086 bis at the «Dniprovsk» mine.

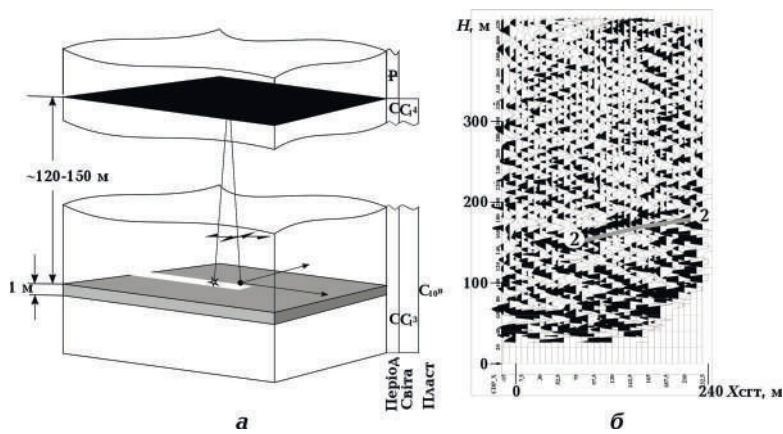


Рис. 7. Схема розповсюдження відбитих поперечних хвиль над вугільним пластом (а) та результат їх підсумовування (б).

Fig. 7. The scheme of propagation of the reflected shear waves over the coal seam (a) and their summation result (b).

в площині пласта, одна вздовж штреку, друга поперек. Також зображено зміщені частинки середовища у хвилі.

У підсумку можна сказати, що експериментальна ділянка сейсмічних досліджень виявилась унікальною за кількістю об'ємів і методів досліджень та за повнотою відпрацювання гірничими роботами після проведення геофізичних досліджень. Показано, що підземні сейсмічні дослідження спроможні прогнозувати тектонічні порушення вугільного пласта з високим ступенем точності. Попередні геологічний та геофізичні прогнози мають спрощений вигляд без деталей, але мають значення для глобального планування гірничих робіт. Наземні сейсмічні дослідження поступаються за точністю підземним методам внаслідок неочевидного прояву порушень на сейсмічних розрізах, їх багатоваріантної інтерпретації та значної ширини зон порушення.

Велика відстань між профілями наземної 2D сейсмозрозвідки також призводить до помилок у прогнозі розповсюдження порушень на плані пласта. Логічно припустити, що відстань між профілями не повинна перевищувати половини довжини прямолінійної частини порушення на плані пласта (мінімум дві точки для визначення прямої лінії). Тому великі очікування були пов'язані з наземною 3D сейсмозрозвідкою на шахтних полях, яка забезпечує сейсміч-

ні спостереження високої щільності.

Наземна 3D сейсмозрозвідка на полі шахти «Краснолиманська». Сейсмічні дослідження 3D на ділянці поля шахти «Краснолиманська» виконані відповідно до рішення Урядової комісії (створена за розпорядженням КМУ від 28.05.2008 р. № 745) з розслідування причин та ліквідації наслідків аварії, що сталася на державному підприємстві «ВК «Краснолиманська» 23.05.2008 р.

Вибух метану стався в момент розкриття вугільного пласта гірничою виробкою на горизонті 845 м на невідпрацьованій ділянці вугільного пласта I_3 у висячому крилі Глибокоярського скиду, у так званій заскидовій частині шахтного поля. Було припущено, що прогноз тектонічних порушень за геологічними даними виявився помилковим і не показав порушення, при розкритті якого вибухнув метан. Було заплановано здійснити сейсмічну зйомку із щільністю 10 м, внаслідок чого фахівці геологічного відділу шахти очікували отримати прогноз порушень з точністю 10 м. Оглядову карту заскидової частини поля шахти «Краснолиманська» на рівні пласта I_3 на момент планування сейсмічної зйомки 3D наведено на рис. 8.

За даними геологічного прогнозу заскидова частина поля розташована у висячому крилі потужного Центрального насуву з амплітудою зміщення 300—400 м. Глибо-

коярський та Федорівський скиди з амплітудою більше 20 м простяглися у субширотному напрямку. Зона скидів південно-західного простягання прогнозується у східній частині поля. У Магістральному польовому штреку було розкрито порушення з амплітудою 20 м, багато малоамплітудних порушень, вивалів порід, зон дроблення до стану пилу.

Наземну 3D зйомку було проведено силами ДГП «Укргеофізика» Придніпровської геофізичної розвідувальної експедиції.

Обсяг сейсмічних даних МСГТ 3D по площі робіт склав 2275 фізичних спостережень 606-канальних сейсмограм з довжиною запису 3,0 с та кроком дискретизації 2 мс.

Обробку матеріалів сейсмозвідки 3D було виконано партією обробки геофізичної інформації Технологічного центру ДГП «Укргеофізика» в системі ProMAX 3D версії 2003.12.1. За результатами обробки було отримано сумарний куб 3D СГТ.

Інтерпретацію результатів та побудову карти порушень пласта l_3 здійснено в УкрНДМІ. Результати обробки отримано на електронних носіях у формі часових сейсмічних розрізів МСГТ за позовжніми (in-line) і поперечними (cross-line) лініями

сейсмічної зйомки. Всього отримано 152 розрізи in-line та 361 розріз cross-line з інтервалом 10 м між розрізами та трасами на них. Отримані матеріали візуалізували та аналізували покроково, на початку з інтервалом 200 м, потім 100 м і наостанок 10 м у межах обраних ділянок.

З кожним вугільним пластом m_4^2 , l_3 та k_5 пов'язаний інтерференційний пакет хвиль, відбитих від поверхонь нашарування порід вуглевміщувальної товщі. Чергування тонких шарів (5—25 м) пісковиків, алевролітів, аргілітів з інверсією швидкості на границях нашарування сприяє створенню низькочастотних інтерференційних пакетів хвиль. Особливості нашарування: ритм, літологічний зміст, потужності, біля кожного з пластів відбиваються у хвильовій картині у вигляді ширини хвильового пакету, переважної частоти, амплітуди, розподілу амплітуди та частоти всередині хвильового пакету.

Швидкість хвиль у породах пов'язана зі ступенем епігенетичних перетворень і майже не змінюється з глибиною. Тому для перерахунку часу у глибину використовували постійне значення середньої швидкості. Рівень вугільного пласта прив'язували до певної фази хвильового пакету за допомогою геологічних розрізів свердловин.

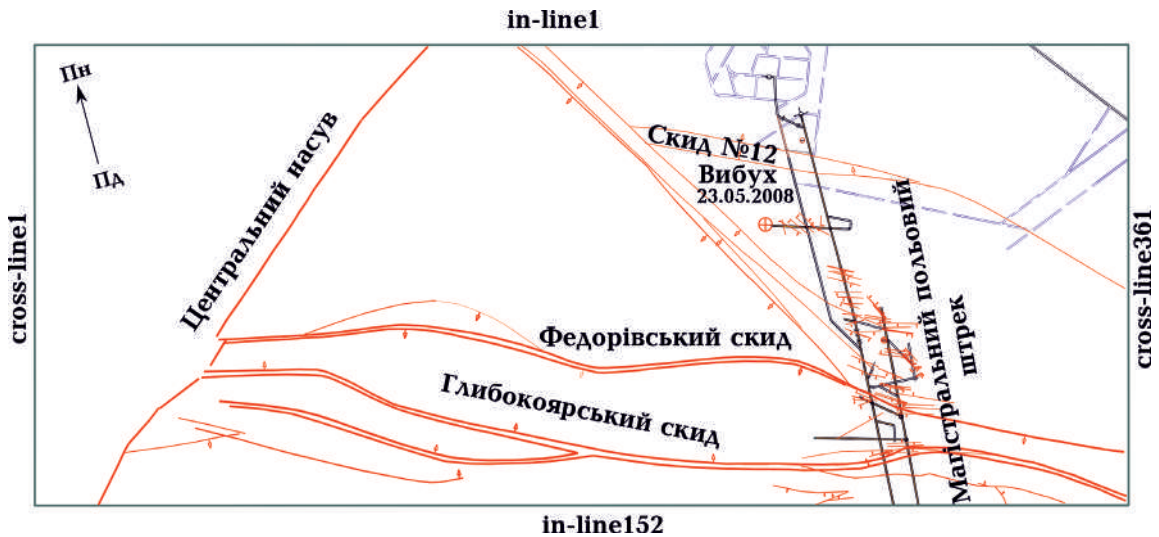


Рис. 8. Оглядова карта заскидової частини поля шахти «Краснолиманська» на рівні пласта l_3 з прогнозом порушень за геологічними даними та контуром 3D сейсмічної зйомки.

Fig. 8. Overview map of the behind-the-fault area of the Krasnolymanska mine at the level of layer l_3 with the faults prediction based on geological data along with a 3D seismic survey contour.

Тектонічні порушення простежували на розрізах за стандартними критеріями, наведеними на початку статті. Для прикладу на рис. 9 показано розріз по лінії in-line 90.

Побудова несуперечливої моделі порушень потребувала багаторазового перегляду матеріалу для уточнення рівня вугільних пластів на розрізах та ув'язування тектонічних порушень між ними.

Прогноз тектонічних порушень на рівні вугільного пласта I_3 за даними сейсмозвідки 3D і реальні порушення, що були розкриті гірничими роботами пізніше, показано на рис. 10.

Геологічний та геофізичний прогнози майже збігаються для великих порушень, але замість геологічного прогнозу протяжного скиду північно-західного простягання спостерігаються короткі розриви субширотного та північно-західного простягання з амплітудою від метрів до десятків метрів. Було виявлено апофізу Федорівського скиду з амплітудою 20 м, якої немає у геологічному прогнозі. Пізніше її підтвердили гірничими роботами в західній лаві 1.

За рівнем залягання пластів виявлено низькоамплітудні складки у висячому крилі Центрального насуву: брахісинкліналь з пологим дном у центрі ділянки 3D сейсмічних досліджень та антиклінальна складка на сході ділянки. Зона антикліналі обмежена з півночі та зі сходу короткими розривами з амплітудою більше 20 м, а на

півдні — Федорівським скидом. Породи в межах антиклінальної складки значно порушені на рівні вугільного пласта I_3 та у 100-метровій товщі над ним, що сприяє накопиченню метану, який вибухнув під час входження штреку у вугільний пласт.

Порівняння розкритих у гірничих виробках західних лав 1 та 2 і прогнозованих за даними 3D сейсмозвідки порушень показує низьку точність прогнозу (більше 30 м), що в кілька разів перевищує щільність сейсмічної зйомки (10 м). Потенціал цієї потужної 3D зйомки не було використано у повному обсязі для точного прогнозу порушень. Ось перелік причин, що призвели до цього негативного результату.

1. Помилки ручної інтерпретації великого обсягу даних.

2. Особливість обробки, метою якої було точне відображення поверхонь на шарування порід, що відбивають хвилі. Багато процедур обробки задля безперервного простеження сейсмічних горизонтів знищують ознаки порушень.

3. Вплив сейсмічного зносу. Лише часткова міграція сейсмічних трас перед підсумовуванням залишає розкид відбивних точок, який може перевищувати щільність зйомки. Міграція результативного 3D кубу виправляє положення сумотрас, але ознаки порушення змішуються на майданчиках розкиду точок, що спричиняє зниження точності прогнозу порушень.

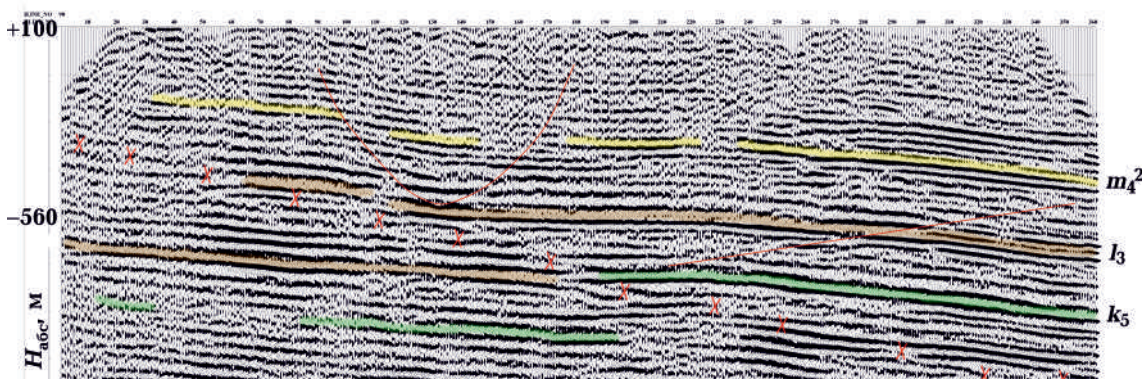


Рис. 9. Приклад простеження вугільних пластів і тектонічних порушень на розрізі inline 90 на ділянці 3D сейсмозвідки на полі шахти «Краснолиманська».

Fig. 9. An example of coal seams and faults tracing performed at the 3D seismic survey site section inline 90 of the «Krasnolymanska» mine.

4. Зменшення вертикальної роздільної здатності сейсмічних розрізів унаслідок низькочастотної фільтрації відбивних хвиль тонкошаруватим середовищем, що містить вугільні пласти. При швидкості позовжніх хвиль 3300 м/с і середній потужності пісковиків з сильними акустичними границями 25 м на ділянці 3D сейсмозвідки утворюються інтерференційні пакети хвиль з основним максимумом амплітуди на частоті 33 Гц.

У підсумку можна сказати, що мета 3D зйомки для точного прогнозу тектонічних порушень вугільного пласта не була досягнута, але досвід цієї роботи є уні-

кальним. Розробка графа обробки не тільки для отримання тривимірної структури залягання пластів, а також для точного відображення і збереження ознак порушення на сейсмічних горизонтах може значно підвищити точність прогнозу порушень.

Висновки. Розглянуто приклади підземної та поверхневої сейсмозвідки на полях шахт, які показують можливість цього методу забезпечувати детальний прогноз геологічних порушень, необхідний для безпечного та ефективного виконання гірничих робіт. Тобто сейсмічний прогноз відповідає масштабу гірничих

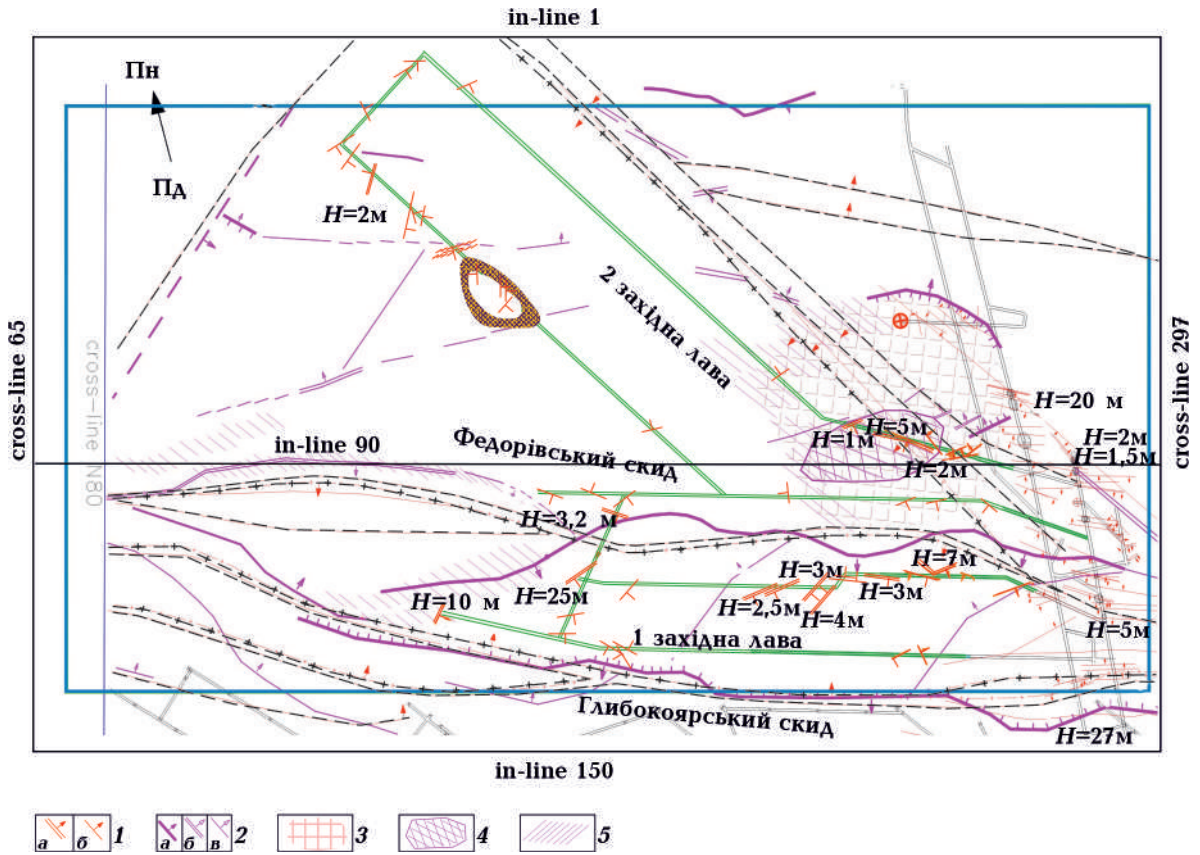


Рис. 10. Прогноз тектонічних порушень на заскидовій частині поля шахти «Краснолиманська» на рівні пласта I_3 за даними 3D сейсмозвідки і результати гірничих робіт 2010 р.: 1 — тектонічні порушення вугільного пласта I_3 , розкриті гірничими роботами (а — $H > 1$ м, б — $H \leq 1$ м); 2 — тектонічні порушення вугільного пласта I_3 за даними 3D сейсмозвідки (а — $H > 20$ м, б — $H > 3 \div 5$ м, в — $H \leq 3 \div 5$ м); 3 — контур антикліналі; 4 — зона значного порушення на рівні вугільного пласта I_3 та над ним у 100-метровій товщі; 5 — зона підвищеної тріщинуватості пласта I_3 і вуглевміщувальних порід.

Fig. 10. Prediction of faults at the behind-the-fault area of the Krasnolymanska mine at the level of layer I_3 according to 3D seismic survey data along with the results of mining operations in 2010: 1 — faults of the coal seam I_3 exposed by mining operations (a — $H > 1$ m, б — $H \leq 1$ m); 2 — faults of the coal seam I_3 according to 3D seismic data (a — $H > 20$ m, б — $H > 3 \div 5$ m, в — $H \leq 3 \div 5$ m); 3 — anticline contour; 4 — a multiple-fault zone at the level of layer I_3 and above it in a layer of 100 m; 5 — zone of increased fracturing that includes layer I_3 and coal-bearing rocks.

робіт на відміну від геологічних та інших геофізичних методів, які прогнозують порушення у більш дрібному масштабі, незважаючи на об'єм розвідувальних даних і досконалість інтерпретації.

Розглянуто унікальний приклад 3D сей-

сморозвідки на полі вугільної шахти. Досліджено потенціал цього методу розвідки для детальнішого прогнозу тектонічних порушень, який може бути розкритий за умови вдосконалення графа обробки та автоматизації інтерпретації.

Список літератури

- Кенжин Б.М., Сухинина Е.В., Компанец А.В., Бородин Д.С. Сейсмические исследования угленосных пород для прогноза геологических неоднородностей угольных пластов. *Збірник наук. праць УкрНДМІ*. 2009. № 5(1). С. 395—417. [https://doi.org/10.1016/S0167-9031\(84\)90299-8](https://doi.org/10.1016/S0167-9031(84)90299-8).
- Kenzhin, B.M., Sukhinina, E.V., Kompanets, A.V., & Borodin, D.S. (2009). Seismic studies of coal-bearing rocks for the prediction of geological heterogeneities of coal seams. *Transactions of UkrNDMI*, (5), 395—417 (in Russian).
- Malehmir, A., Durrheim, G., Bellefleur, G., Urošević, M., Juhlin, C., White, D.J., Milkereit, B. & Campbell, G. (2012). Seismic methods in mineral exploration and mine planning: A general overview of past and present case histories and a look into the future. *Geophysics*, 77(5), WC173—WC190. <https://doi.org/10.1190/geo2012-0028.1>.
- Goossens, R.F., & Buchanan, D.J. (1984). The role of seismic surveying in coal mining exploration. *Mining Science and Technology*, 1(4), 253—267.
- Schott, W., & Waclawik, P. (2015). On the quantitative determination of coal seam thickness by means of in-seam seismic surveys. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(10), 1496—1504. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0466>.

Identification of geological faults by geophysical methods for risk assessment in underground mining

O.V. Sukhinina, 2022

M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

High-accuracy prediction of geological faults, especially small-amplitude tectonic faults, is essential for an efficient and safe underground mining. Having such information about the location of tectonic faults in the rock mass reduces the likelihood of rock collapse and outburst, gas explosion, and water breakthrough during the mining operations. Modeling of the tectonic structure of the rock mass based on the data from the exploratory drilling and ground geophysical observations is of crucial importance to the extraction of mineral raw materials. Typically, in the areas of mineral extraction, tectonic faults in the rock mass are well studied using these data, but the predicted faults are represented by simplified imaginary surfaces that separate different structural parts of the rock mass and are not normally found by mining in such a form.

The actual structure of tectonic faults is revealed in the course of mining, but the use of seismic survey is required for further prediction of such faults. The experience of applying these methods is shown in the examples of studies of tectonic faults of coal seams in the Donbass mines during the period from 2008 to 2012.

To illustrate the capabilities of underground and surface 2D seismic surveys to accurately predict the location of faults, a site was chosen at the Dneprovskaya mine, which is characterized by the most amount of data collected from exploration drilling and geophysical methods. Also, in contrast to the mining practice when the coal seams areas are

discarded based on the results of research due to difficult geological conditions or are not documented by geologists in the process of panel mining, this specific area is distinguished by the completeness of mapping of real faults exposed by mining operations. Predictions of faults obtained by preliminary and CDP seismic surveys are compared with the real faults exposed by mining operations.

An example of research at the Krasnolimanskaya mine shown in this paper is among a few isolated cases utilizing 3D CDP seismic survey at mines. The results of the prediction of tectonic faults and the specifics of data processing and interpretation are examined.

The research results considered in this paper can be used for further development of seismic survey methods for high-accuracy prediction of geological faults.

Key words: geological fault, low-amplitude tectonic fault, drift of a mine, underground seismic survey, reflected waves, common deep point, high-accuracy predictions, mining field, 2D and 3D seismic survey, interpretation.

References

- Kenzhin, B.M., Sukhinina, E.V., Kompanets, A.V., & Borodin, D.S. (2009). Seismic studies of coal-bearing rocks for the prediction of geological heterogeneities of coal seams. *Transactions of UkrNDMI*, (5), 395—417 (in Russian). [https://doi.org/10.1016/S0167-9031\(84\)90299-8](https://doi.org/10.1016/S0167-9031(84)90299-8).
- Kenzhin, B.M., Sukhinina, E.V., Kompanets, A.V., & Borodin, D.S. (2009). Seismic studies of coal-bearing rocks for the prediction of geological heterogeneities of coal seams. *Transactions of UkrNDMI*, (5), 395—417 (in Russian).
- Malehmir, A., Durrheim, G., Bellefleur, G., Urosevic, M., Juhlin, C., White, D.J., Milkereit, B. & Campbell, G. (2012). Seismic methods in mineral exploration and mine planning: A general overview of past and present case histories and a look into the future. *Geophysics*, 77(5), WC173—WC190. <https://doi.org/10.1190/geo2012-0028.1>.
- Goossens, R.F., & Buchanan, D.J. (1984). The role of seismic surveying in coal mining exploration. *Mining Science and Technology*, 1(4), 253—267.
- Schott, W., & Waclawik, P. (2015). On the quantitative determination of coal seam thickness by means of in-seam seismic surveys. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(10), 1496—1504. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0466>.