

УДК 550.834:622.12

## ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НЕМИГРИРОВАННЫХ РАЗРЕЗОВ МОГТ 2,5D ДЛЯ ПРОГНОЗА МЕЛКОАМПЛИТУДНЫХ НАРУШЕНИЙ УГЛЕНОСНОГО МАССИВА

Сухинина Е. В., Бородин Д. С.  
(УкрНИМИ, г. Донецк, Украина)

*Запропоновано новий метод інтерпретації сейсмічних розрізів МОГТ 2,5D для випадку моноклінального залягання, що відображають шари з невеликими (до  $10^{\circ}$ - $15^{\circ}$ ) кутами падіння, де не виконується міграція сейсмічних розрізів. Показано перевагу методу при трасуванні мелкоамплітудних порушень між профілями сейсмічних спостережень. Результати випробування методу наведені на прикладі ділянки поля шахти «Краснолиманська» в Донбасі.*

*The article is devoted to the new method of interpretation seismic sections in the case of CDP 2,5D monocline occurrence of reflecting layers with non-large ( $10^{\circ}$ - $15^{\circ}$ ) dips, in which the procedure of migration seismic sections is not executed. The advantage of the method when tracing small amplitude faults between profiles of seismic monitoring is given. The results of testing method in the area of the field of mine "Krasnolimanskaya" in the Donetsk Basin are presented.*

Сейсмические исследования угленосной толщи методом отраженных волн с поверхности земли с целью прогноза мелкоамплитудных нарушений угольных пластов давно проводятся на угольных шахтах Донбасса [1-4]. Большой объем исследований выполнен сотрудниками Приднепровской и Луганской геофизических экспедиций. За прошедший период были решены важные задачи обработки сейсмических данных и интерпретации резуль-

татов при исследовании углеводородных массивов. Однако точность и вероятность обнаружения мелкоамплитудных нарушений остается низкой, что снижает эффективность сейсморазведки при решении этой актуальной для угольной отрасли задачи.

С целью повышения точности и достоверности прогноза был выполнен анализ расположения точек отражения в трехмерном пространстве угленосного массива при сейсмических исследованиях МОГТ 2,5D.

Опыт работ показывает, что большая часть шахтных полей Донбасса расположена на участках моноклиналильного залегания угольных пластов и вмещающих пород. В их числе такие мощные шахты, как «Краснолиманская» и «Красноармейская-Западная № 1». Угол падения пластов небольшой от  $3^\circ$  до  $10^\circ$ , на отдельных участках доходит до  $16^\circ$ . Моноклиналильное залегание пластов осложнено редкими пологими складками и многочисленными разрывными нарушениями с амплитудами смещения от долей метра до нескольких десятков метров. Поэтому поверхности напластования пород, или отражающие поверхности для сейсмических волн, можно аппроксимировать набором плоских участков с разными углами простирания и падения в пределах от 0 до 10 градусов.

Рассмотрим один такой плоский участок отражающей поверхности.

На рисунке 1 показана плоская горизонтальная поверхность приведения для сейсмического разреза МОГТ – плоскость  $ADE$ .  $AEC$  – фрагмент отражающей поверхности.  $AD$  – участок сейсмического профиля,  $ADM$  – плоскость нормалей, восстановленных от линии сейсмического профиля к отражающей поверхности.  $ADCB$  – вертикальный срез горного массива через линию сейсмического профиля.  $AM$  – линия пересечения (скрещения) отражающей поверхности с плоскостью  $ADM$ .

Плоскость  $ADM$  в случае согласного моноклиналильного залегания отражающих поверхностей соответствует мигрированному разрезу МОГТ. Линия  $AM$  на таком разрезе соответствует оси синфазности отраженных сейсмических волн.

В случае редкой нерегулярной сети профилей 2,5D сейсмической съемки разрезы МОГТ после миграции содержат погреш-

ность в результате обнуления значений поля вдоль  $Y$  координаты (перпендикулярно линии профиля) [5]. Миграция точно восстанавливает пространственное положение точек отражения, когда одиночный сейсмический профиль проходит вкост простирания отражающей поверхности. Однако профили 2,5D сейсмической съемки расположены случайным образом по отношению к простиранию отражающих поверхностей.

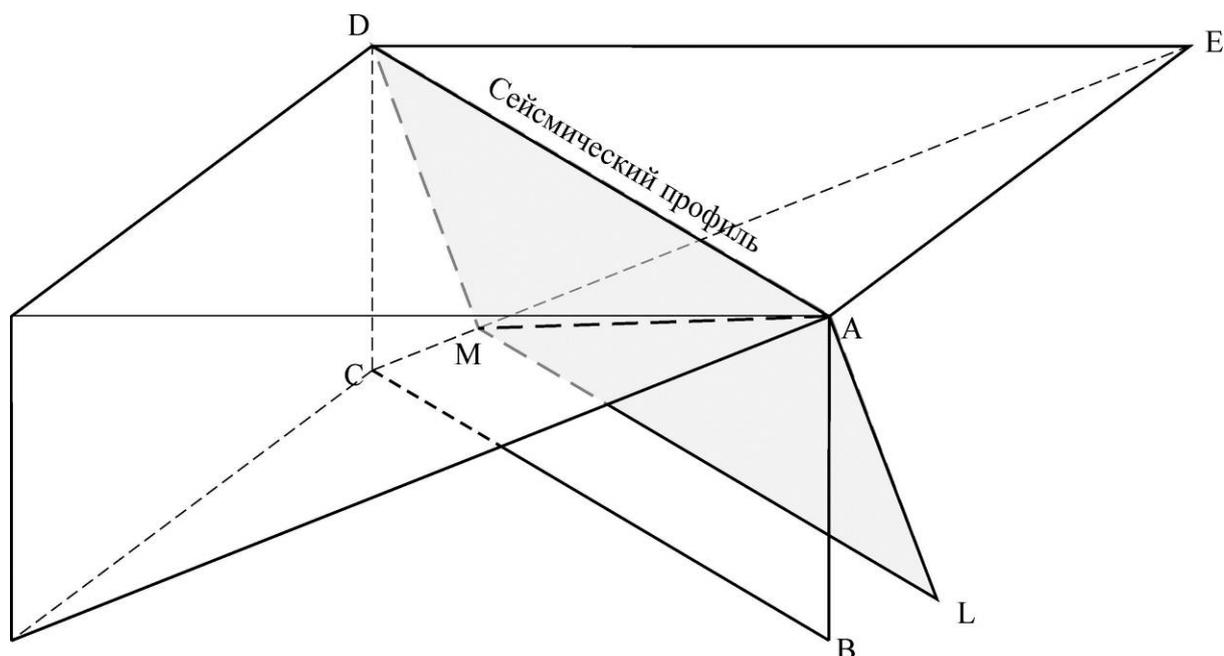


Рис. 1. Пространственное положение сейсмического разреза в модели моноклиналичного залегания горных пород

Структура их залегания до выполнения сейсмических исследований неизвестна, или известна по данным разведочных скважин в общих чертах, что не позволяет восстанавливать положение отражающих точек в 3D пространстве с высокой точностью, необходимой для точного прогноза мелкоамплитудных нарушений.

Пространственный анализ смещений точек отражения по всем трем проекциям ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) для модели горного массива, показанной на рисунке 1, позволил найти простое решение задачи точного восстановления точек отражения, не прибегая к классическим алгоритмам миграции.



$DEC$  – угол падения пласта  $\delta$  ;

$EAD$  – угол между простиранием пласта и линией профиля  $\sigma$  ;

$CAD$  – видимый угол падения пласта на вертикальном срезе  $(ABCD)$   $\theta$  ;

$MAD$  – видимый угол падения пласта в плоскости нормалей (отражений)  $ADM$   $\theta'$  ;

$HGJ$  – угол падения нарушения  $\alpha$  ;

$GFJ$  – угол между простиранием нарушения и линией профиля  $\beta$  ;

$HFJ$  – видимый угол падения нарушения на вертикальном срезе  $(ABCD)$   $\gamma$  ;

$MFD$  – видимый угол падения нарушения в плоскости нормалей (отражений)  $ADM$ , т.е. в плоскости идеально мигрированного разреза,  $\gamma'$  .

Выберем на линии сейсмического профиля  $AD$  любую точку  $D$  и построим вертикальную плоскость  $CED$ . Плоскость  $CED$  пересекает плоскость угольного пласта по линии падения пласта  $EC$ . Отрезок  $DM$ , проведенный перпендикулярно к линии падения пласта  $EC$ , это путь нормального (источник и приемник волн совмещены) сейсмического луча, отраженного от плоскости  $AEC$ . Очевидно, что отрезок  $DM$  перпендикулярен плоскости  $AEC$  как нормаль к линии пересечения двух перпендикулярных плоскостей.

Совместим с точкой  $D$  начало прямоугольной системы координат  $XYZ$ , в которой ось  $Z$  направлена вертикально, а ось  $X$  совмещена с линией профиля  $AD$ . Теперь точку отражения  $M$  в пространстве можно определять по ее проекциям на оси координат  $(M_x, M_y, M_z)$ . Величина  $M_z$  показывает глубину точки отражения от плоскости приведения сейсмического разреза, значения  $M_x$  и  $M_y$  задают смещение отражающей точки относительно линии профиля на горизонтальной поверхности, например, на плане поверхности пласта.

Возьмем точку  $C$  на поверхности пласта так, чтобы её проекция на план пласта совпала с точкой  $D$ . Допустим, что точка  $C$  так же как и точка  $M$  принадлежит участку, где пласт сохраняет

характер залегания. Точка  $C$  находится на пересечении вертикального среза массива  $ABCD$ , плоскости  $CED$  и плоскости пласта  $AEC$ . Её глубина от линии приведения вычисляется по формуле:

$$CD = \frac{MD}{\cos \delta}, \quad (1)$$

где угол  $CDM$  совпадает с углом падения пласта  $\delta$  по подобию треугольников  $CDM$  и  $CED$ .

Теперь сравним отрезки  $MD$  и  $CD$  по величине.

Например, на шахтах Красноармейского углепромышленного района средняя глубина разрабатываемых угольных пластов составляет 600 м. Средний угол падения пластов на большей части шахтных полей составляет  $5^\circ$ , максимальный -  $10^\circ$ . На небольших по площади участках, где угольные пласты залегают под углами  $16^\circ$ - $20^\circ$ , обсуждаемый метод интерпретации не работает, хотя его можно применять с некоторыми поправками.

При подстановке среднего значения глубины залегания и максимального значения угла падения пласта в формулу 1 получаем, что разница между отрезками  $MD$  и  $CD$  не превышает 10 м. Даже для максимальной глубины отработки пласта, порядка 1200 м, разница небольшая и составляет 18 м.

Интерпретация сейсмических разрезов и плана пласта выполняется обычно в масштабе 1:10000, в этом масштабе разница между отрезками  $MD$  и  $CD$  не превышает 1 мм.

Таким образом, на вертикальном срезе массива углевмещающих пород, проходящем через линию профиля  $AD$ , глубины залегания поверхности пласта практически совпадают с длинами пробега отраженных волн. Следовательно, вертикальный срез массива пород практически совпадает с немигрированным сейсмическим разрезом, при условии, что линия пересечения поверхности пласта с вертикальным срезом массива пород и точки отражения от этой поверхности находятся в пределах одного плоского участка пласта. Линия  $AC$  на вертикальном срезе совпадает с осью синфазности отраженных волн на немигрированном сейсмическом разрезе.

Используя расстояния до точек отражения на сейсмических разрезах, можно построить достаточно точную карту поверхности пласта. Неточности будут рядом с крупными тектоническими нарушениями (границами аппроксимирующих плоских участков пласта), положение которых известно, как правило, по данным геологоразведки до выполнения сейсмических исследований, поэтому их легко исправить.

Фрагмент карты изогипс залегания пласта  $m_4^2$ , построенной по данным сейсморазведки и разведочных скважин на участке сейсмических исследований на поле шахты «Краснолиманская», показан на рисунке 3.

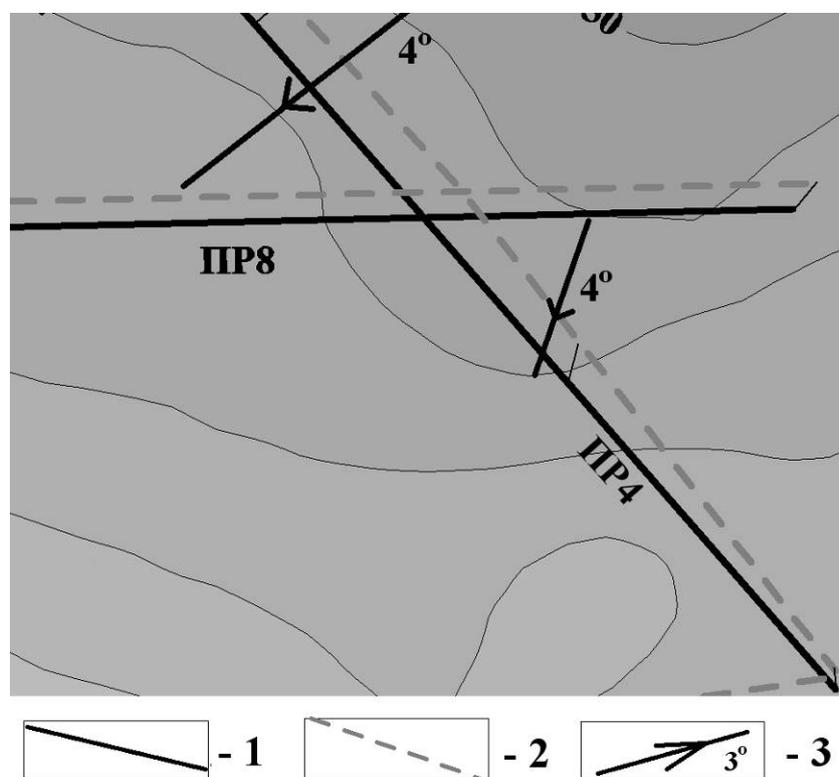


Рис 3. Карта залегания пласта по данным сейсморазведки:  
1 – сейсмический профиль, 2 – горизонтальная проекция точек отражения, 3 – направление и угол падения пласта

Изолинии на карте соответствуют линиям простирания пласта. Расстояние между изолиниями и значение их относительного превышения позволяют определить угол падения пласта  $\delta$ . По-

ложение точек отражения  $M$  на плане пласта относительно линии профиля задаются проекциями  $M_x$  и  $M_y$ . Их значения вычисляются по формулам:

$$M_x = KD = MD \cdot \sin \delta \cdot \sin \sigma, \quad (2)$$

$$M_y = NK = MD \cdot \sin \delta \cdot \cos \sigma \quad (3)$$

Предложенная методика позволяет просто вычислять положение точек отражения на плане пласта, используя немигрированные сейсмические разрезы. Следует заметить, что максимальные значения горизонтальных проекций  $M_x$  и  $M_y$  точки отражения  $M$  в рамках обсуждаемой модели составляют 100 м при глубине пласта 600 м и 200 м при глубине пласта 1200 м. Это заметные величины, которые необходимо учитывать в процессе интерпретации с целью прогноза мелкоамплитудных тектонических нарушений.

Полученные точки отражения могут принадлежать спокойным участкам сейсмического разреза, либо находится в пределах зоны с признаками тектонической нарушенности. Для уверенной трассировки многочисленных зон тектонических нарушений между профилями сейсмических наблюдений необходимо использовать дополнительные предположения. А именно, осевая поверхность зоны тектонических смещений представляет собой плоскость, либо несколько смежных плоских участков. Угол падения этой поверхности более устойчивая ее характеристика, по сравнению с азимутом простирания.

Эти предположения позволяют находить угол падения тектонического нарушения  $\alpha$ , используя значение видимого угла падения нарушения на вертикальном срезе массива  $\gamma$ . Методика построения пространственной модели тектонических нарушений в данной статье не рассматривается. Необходимо сказать, что она опирается на простую зависимость:

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} \alpha \cdot \sin \beta. \quad (4)$$

Строго говоря, видимый угол падения нарушения на сейсмическом разрезе, даже после миграции не совпадает со значением видимого угла падения нарушения на вертикальном срезе

массива  $\gamma$ . Для того, чтобы оценить расхождения между видимым углом падения нарушения на вертикальном срезе и видимыми углами нарушения на сейсмических разрезах, были найдены зависимости, которые их связывают.

Для вывода зависимостей на рисунке 2 была нарисована плоскость случайного нарушения  $FGM$ , проходящая через точку  $M$ .  $FM$  это линия скрещения (пересечения) плоскости нарушения с плоскостью нормальных лучей сейсмического профиля. Угол  $FGJ$  прямой. Чтобы найти линию скрещения нарушения  $FGM$  с вертикальным срезом массива пород  $ABCD$  воспользуемся методикой картирования тектонических нарушений на угольных месторождениях [6]. Для этого на вертикальном срезе и на плоскости тектонического нарушения проведем линии равных высот, а именно, изолинию  $C_1B_1$  на вертикальном срезе и изолинию  $MN$  в плоскости тектонического нарушения. Точка пересечения  $MN$  и  $C_1B_1$  принадлежит как вертикальному срезу, так и нарушению, поэтому линия  $FH$  будет линией скрещения вертикального среза и нарушения. Угол  $HGJ$  это угол падения нарушения  $\alpha$ . Все элементы залегания нарушения были определены выше.

Из прямоугольных треугольников (см. рис. 2) можно вывести, что

$$\operatorname{tg} \gamma' = \frac{\operatorname{tg} \gamma \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \delta \cdot \sin^2 \sigma}}{\cos \delta + \sin \delta \cdot \cos \sigma \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \beta}. \quad (5)$$

Вынесем на отдельный рисунок плоскость сейсмического разреза  $ADM$ .

На рисунке 4  $AM$  это ось синфазности отраженных волн на мигрированном разрезе, а  $FM$  – линия скрещения мигрированного разреза с тектоническим нарушением. На немигрированном сейсмическом разрезе соответствующие элементы выглядят как  $AP$  и  $FP$ .

Выше по тексту даны определения углов  $\theta'$  и  $\gamma'$ , видимых углов падения пласта и тектонического нарушения на мигрированном сейсмическом разрезе. Добавим определение видимого угла падения нарушения на немигрированном сейсмическом разрезе  $\gamma''$ .

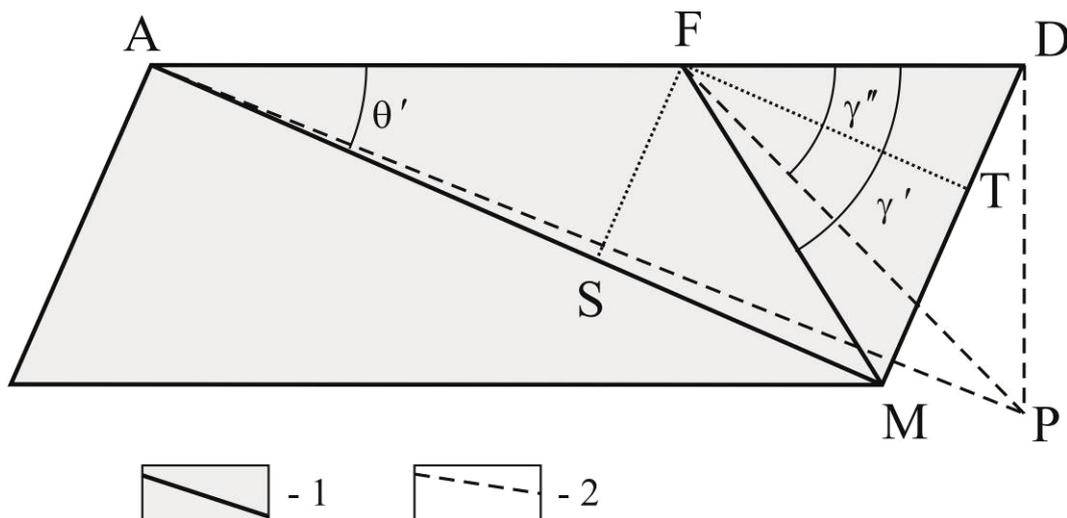


Рис. 4. Плоскость сейсмического разреза: 1 – элементы мигрированного разреза; 2 – элементы немигрированного разреза

$FPD$  – видимый угол падения нарушения на немигрированном сейсмическом разрезе  $\gamma''$ .

$MD$  перпендикулярно  $AM$  по условию отражения.

$PD$  перпендикулярно  $AD$  по способу изображения немигрированных разрезов.

$MD$  – путь волны, отражённой от  $AM$ , очевидно равен  $PD$ .

Из треугольника  $FPD$  с учётом (4) и (5) можно вывести, что

$$\operatorname{tg} \gamma'' = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\cos \delta + \sin \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos(\sigma - \beta)}. \quad (6)$$

Для сравнения видимых углов на мигрированном разрезе  $\gamma'$  и немигрированном разрезе  $\gamma''$  с видимым углом падения нарушения на вертикальном срезе  $\gamma$  рассчитаем их конкретные значения для нескольких групп параметров. Задаём угол падения пласта  $\delta$  в диапазоне  $[0^{\circ}, 10^{\circ}]$ . Рассмотрим три основных случая расположения сейсмического профиля по отношению к простиранию пласта. Здесь идёт перебор значений угла между сейсмическим профилем и простиранием угольного пласта  $\sigma$ : профиль расположен вдоль простирания пласта, профиль расположен в крест простирания пласта и профиль расположен под некоторым (для определённости  $45^{\circ}$ ) углом.

Получен ряд значений углов для ключевых параметров залегания пласта и тектонического нарушения. Для того чтобы оценить максимальное расхождение между углами, был выбран максимальный угол падения пласта в обсуждаемой модели массива углевмещающих пород, а именно,  $10^{\circ}$ . Было установлено, что отличие видимых углов  $\gamma'$  и  $\gamma''$  на мигрированном и немигрированном разрезах соответственно от видимого угла  $\gamma$  на вертикальном срезе меняется от 0 % до 10 % для большего числа исходных параметров. Исключение составляет область взаимного расположения нарушения и сейсмического профиля, когда угол между ними принимает значение  $20^{\circ}$  и меньше. В этом случае плоскость тектонического нарушения (особенно круто залегающего) субпараллельна плоскости сейсмического разреза и задача сравнения углов становится неустойчивой.

Эту особенность поведения видимого угла  $\gamma''$  на немигрированном разрезе для малых углов подхода сейсмического профиля к простиранию тектонического нарушения ( $\beta < 20^{\circ}$ ) необходимо учитывать в процессе интерпретации, причем в силу случайного расположения линий сейсмических профилей такая ситуация встречается редко. В остальных случаях отличие на 10 % видимого угла падения нарушения на немигрированном сейсмическом разрезе от видимого угла падения нарушения на вертикальном срезе не мешает использовать метод построения модели тектонической нарушенности массива пород, который опирается на зависимость (4).

Предложенный метод интерпретации был опробован на участке «Северо-Родинский» поля шахты «Краснолиманская».

Схема расположения тектонических нарушений на уровне угольного пласта  $m_4^2$ , построенная по результатам интерпретации немигрированных сейсмических разрезов, показана на рисунке 5.

Сравнение схемы нарушенности по данным геологии и сейсморазведки показывает, что практически совпадают положения крупноамплитудных тектонических нарушений – Глубокоярского сброса ( $H = 20 - 86$  м) и Федоровского сброса ( $H = 0 - 15$  м).

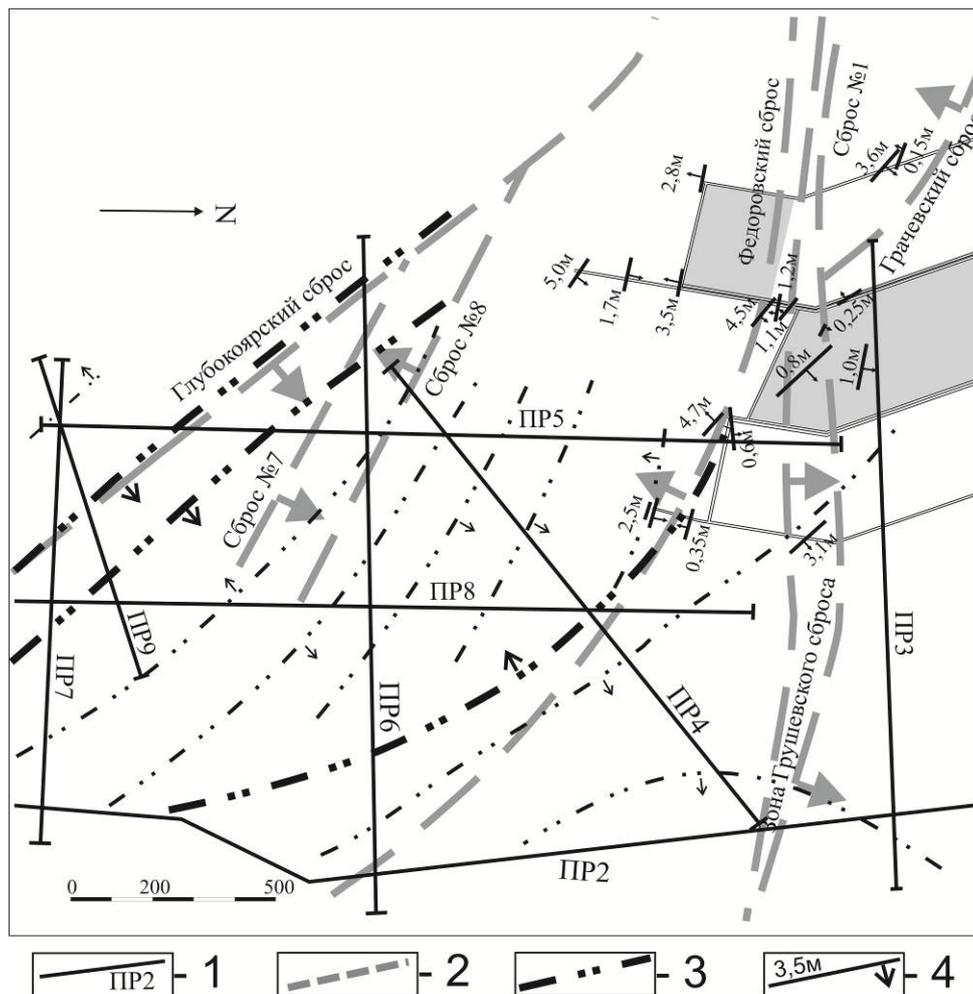


Рис. 5. Схема тектонической нарушенности угольного пласта  $m_4^2$  на участке «Северо-Родинский» поля шахты «Краснолиманская»: 1 – сейсмический профиль; 2 – прогноз нарушения по данным геологии; 3 – прогноз нарушения по данным сейсморазведки; 4 – тектонические нарушения встреченные в горных выработках

С помощью сейсмических исследований были обнаружены новые мелкоамплитудные нарушения и более точно построены установленные геологоразведкой нарушения. Достаточно высокая точность картирования нарушений сейсморазведкой подтверждена данными горных работ.

Простираение Федоровского сброса в центре участка исследований совпадает с геологическим прогнозом и подтверждено горными работами, в юго-восточной зоне простираение сброса по данным сейсморазведки отклоняется от его простираения по дан-

ным геологии и заворачивает на юг. Это неудивительно, так как Федоровский сброс в направлении на юго-восток затухает. В крайней западной зоне карты Федоровский сброс также не подтверждается горными работами, но это скорее ошибка геологической интерпретации, так как горные работы показывают, что в этой западной зоне он совпадает с Грачевским сбросом.

Таким образом, горные работы подтверждают северо-западное простирание Федоровского сброса, которое было установлено по данным сейсморазведки.

Субширотное простирание зоны Грушевского сброса вообще не подтвердилось горными работами. По данным сейсморазведки он направлен на северо-запад, его положение было подтверждено нарушением с амплитудой смещения 3,1 м северо-восточного падения, которое было встречено несколько месяцев назад в горной выработке.

Группа мелкоамплитудных нарушений по данным сейсморазведки, направленных на северозапад-запад между Глубокоярским и Федоровским сбросами, подтверждена сбросами с амплитудами 3,5 м; 1,7 м; 5,0 м, которые были встречены в горной выработке к западу от сейсмического профиля 5.

В результате можно сделать следующие выводы.

Предложен метод интерпретации немигрированных сейсмических разрезов. Доказано, что на моноклиналях с небольшим углом падения пород (до  $10^\circ$ ) пространственное положение отражающей границы (пласта) на немигрированном разрезе практически совпадает с положением этой границы на вертикальном срезе массива пород. При условии сохранения пластом простирания и падения на участке между плоскостью нормальных отраженных лучей сейсмического профиля и вертикальным срезом массива пород.

Кроме того, для этой модели залегания пород доказано, что в случае достаточного отклонения линии сейсмического профиля от простирания нарушения, углы падения нарушения, которые видны на вертикальном срезе массива и на сейсмическом немигрированном разрезе отличаются меньше, чем на 10 %, что достаточно для построения точной модели тектонической нарушенности массива.

Данный метод интерпретации опробован на поле шахты «Краснолиманская». Горные работы, проведенные после выполнения сейсмических исследований, показали высокую точность картирования тектонических нарушений по данным сейсморазведки.

Эти выводы ставят под сомнение устоявшуюся точку зрения об обязательном использовании миграции при обработке 2.5D сейсмических данных.

Окончательный вывод следующий: в условиях моноклиналичного полого залегания пластов углевмещающего массива при выполнении сейсмических исследований 2,5 D с целью прогноза мелкоамплитудных нарушений угольных пластов, предпочтительнее использовать сейсмические разрезы без миграции.

### **СПИСОК ССЫЛОК**

1. Методика поверхностной сейсморазведки нарушений [Текст]: РД 12.001 59226.006-94. – Утв. Минуглепромом Украины 10.08.94. – Донецк, 1994. – 20 с.
2. Хохлов Т.М., Харитонов О.М., Трифонов П.Г. и др. Многоволновые сейсмические исследования угольных месторождений Донбасса. – Киев: Наук. думка, 1990. – 132 с.
3. Тиркель М.Г., Компанец А.И., Сухинина Е.В. Особенности обработки данных наземной сейсморазведки тектонической нарушенности угольных пластов // Сб. тр. ИГТМ НАНУ. – Днепропетровск, 2002. – № 35. – С. 96-101.
4. Кенжин Б. М., Сухинина Е.В., Компанец А. И., Бородин Д. С. Сейсмические исследования угленосных пород для прогноза геологических неоднородностей угольных пластов. – Донецк: Наукові праці УкрНДМІ НАН України, 2009 – № 5 (частина 1). – С. 395 – 417.
5. Козлов Е.А. Миграционные преобразования в сейсморазведке. – М: Недра, 1986.
6. Очеретенко И.А. Методическое пособие по изучения тектоники при разведке угольных месторождений. Л.: Недра, 1988.