

Я. В. Мендрий, канд. геол. наук, ассистент кафедры геофизических методов разведки (Государственное высшее учебное заведение “Национальный горный университет”, Украина, г. Днепрпетровск), mendriy_dp@mail.ru

АТРИБУТНЫЙ АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИ КАРТИРОВАНИИ ЗОН ТРЕЩИНОВАТОСТИ

Приведена история развития и методика расчета таких сейсмических атрибутов как когерентность и кривизна. На примере 3D сейсмических данных в пределах шахты “Краснолиманская” в украинской части Донецкого бассейна показано, что эти атрибуты дают возможность не только выделять зоны трещиноватости, но и изучать их генезис. По атрибутам кривизны получены розы-диаграммы направления трещиноватости. Обсуждаются возможности использования направлений трещиноватости для оценки степени раскрытия трещин.

Ключевые слова: сейсморазведка, атрибуты, трещиноватость.

Введение. В последние годы, в связи с истощением традиционных коллекторов углеводородов, значительно возрос интерес к коллекторам, проницаемость которых обусловлена, главным образом, степенью их трещиноватости (метан угленосных отложений, сланцевый газ, карбонатные коллекторы). Перспективы картирования зон трещиноватости связывают с сейсморазведкой. По-существу, она является единственным наземным геофизическим методом, который позволяет получить детальное трехмерное изображение геологической среды.

Интенсивно развивающиеся в настоящее время методики выделения зон трещиноватости по сейсмическим данным включают в себя технологии азимутального анализа амплитуд (AVAZ), основанные на азимутальной анизотропии P- и S-волн, метод миграции дуплексных волн, атрибутный анализ волнового поля. Сейсмические атрибуты обычно называют косвенными методами изображения трещиноватых зон. Однако при этом сейсмические атрибуты обладают рядом

достоинств, способствующих их успешному применению при поисках и изучении зон скопления трещин. Во-первых, вследствие того, что атрибуты рассчитываются по окончательному изображению, а не по исходным сейсмограммам, процесс их получения более экономичен, характеризуется большей устойчивостью по сравнению с методиками анализа сейсмограмм. Во-вторых, в отличие от технологии AVAZ, требующей дорогостоящих широкоазимутальных наблюдений, атрибуты могут быть успешно определены при любой системе 3D-наблюдений. В-третьих, в основе технологии AVAZ лежат достаточно строгие требования к модели трещиноватой среды, в то время как атрибуты могут успешно характеризовать трещиноватые зоны со значительно менее идеализированной структурой.

Методика исследований. Среди сейсмических атрибутов, перспективных на обнаружение латеральных неоднородностей, таких как зоны выклинивания, погребенные русла, разрывные нарушения, зоны повышенной трещиноватости

в первую очередь следует назвать когерентность (coherence) и кривизну (curvature). Первая отражает качество прослеживаемости сейсмических отражений и реагирует на падение амплитуды сигнала, обусловленное, в том числе, и тектоническими нарушениями. Второй атрибут чувствителен к локальным изменениям формы отражений и является мерой палеодеформаций, приводящих к растрескиванию пород. Данные атрибуты основаны на различных особенностях аномалий волнового поля в зонах тектонической нарушенности, что, безусловно, повысит надежность прогнозирования при их комплексном использовании.

Когерентность. Коэффициент когерентности впервые был введен выдающимся американским математиком Норбертом Винером еще в 1930 г. Эта важная концепция с множеством полезных приложений с тех пор активно развивалась и использовалась в различных отраслях знания и нашла успешное применение в том или ином виде и в сейсморазведке. Одной из причин аномального поведения когерентности сейсмических записей в области малоамплитудных тектонических нарушений, выклиниваний, зон повышенной трещиноватости и контуров палеорусел служит деструктивная интерференция отраженных и дифрагированных волн [2]. Миграционные преобразования, в числе прочего направленные на подавление дифрагированных волн, по ряду причин не могут полностью устранить этот эффект. В результате указанные зоны на сейсмических изображениях, как правило, сопровождаются локальным падением амплитуды отраженных волн и, как следствие, пониженным отношением сигнал-помеха и пониженной когерентностью.

Когерентность связана с отношением сигнал-помеха или, что более удобно, с отношением энергии сигнальной компоненты к общей энергии в некоторой локальной области записи. При таком определении отсутствие сигнала характеризуется минимальной когерентностью, равной нулю. В свою очередь, “чистый”

сигнал, не искаженный никакими помехами, сопровождается максимальной когерентностью, равной единице. Таким образом, при расчете когерентности прямо или косвенно используются оценки сигнала, полученные по некоторому набору сейсмических трасс. В основе таких оценок всегда лежит представление о предполагаемой структуре сейсмической записи, т. е. о ее математической модели.

В первой работе этого направления [6] для расчета когерентности использовалась функция взаимной корреляции ФВК трасс. Такие оценки не отличались высокой помехоустойчивостью, так как когерентность определялась только по трем трассам (как среднее из ФВК в продольном и поперечном направлениях сейсмического куба). Подходы, допускающие произвольные размеры окна анализа, основаны на коэффициенте подобия [18] и собственных значениях ковариационной матрицы [8]. Первая модель предполагает независимость уровня амплитуд сигнала и дисперсии помех от номера трассы, вторая допускает произвольное варьирование уровня сигнала.

Развитие метода расчета когерентности связано с использованием более реалистичной модели, допускающей произвольное варьирование не только амплитуд сигнала, но и энергии помехи. В основе такого подхода лежит определение амплитуды сигнала по внедиагональным элементам ковариационной матрицы посредством итерационных процессов. В этом случае когерентность в пределах скользящего в пространстве и во времени окна, состоящего из M трасс и L отчетов на каждой трассе, может быть рассчитана как

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

где a_k – амплитуды сигнала; $\sum_{k=1}^M F_{kk}$ – полная энергия записи, представленная как сумма диагональных элементов ковариационной матрицы F .

Из условия взаимной некоррелируемости сигнала и помех элементов ковариационной матрицы можно записать

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

Из уравнения (2) следуют два критерия оптимальной оценки амплитуд сигнала

$$\min \sum_{\substack{k, m=1 \\ k \neq m}}^M (F_{km} - a_k a_m)^2 \quad (3)$$

и

$$\min \sum_{\substack{k, m=1 \\ k \neq m}}^M |F_{km} - a_k a_m|. \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) позволяют построить простые итерационные процессы оптимальной оценки амплитуд сигнала по внедиагональным элементам корреляционной матрицы F , которые не искажены аддитивным шумом

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

и

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

где i – номер приближения.

Эти процессы удовлетворяют критерию метода наименьших квадратов (МНК) и метода наименьших модулей (МНМ) соответственно.

Преимущества данного подхода освещены в работе [4]. Здесь посредством численного эксперимента показано, что упрощенный метод, основанный на коэффициенте подобия, полностью исключает какие-либо вариации амплитуд сигнала, в том числе смену знака. Метод, основанный на анализе собственных значений ковариационной матрицы, допускает произвольные вариации амплитуд сигнала, и как метод, использующий первый член СР как оценку сигнала, не допускает существенных вариаций уровня шума между кана-

лами. Если такие вариации имеют место на практике, они порождают так называемые ошибки модельных предположений или ошибки спецификации, приводящие к абсолютно нежелательным результатам.

Кривизна. Атрибуты кривизны начали активно использоваться для предсказания малоамплитудных разрывных нарушений и зон трещиноватости с тех пор, как было в работе [16] продемонстрировано корреляцию значений кривизны с разрывными нарушениями. Поскольку объемная кривизна пластов фокусируется скорее на изменениях формы, чем амплитуд, она меньше подвержена влиянию изменений поля сейсмической амплитуды, обусловленного изменчивостью флюида и литологии, и в большей степени сосредотачивается на изменчивости, обусловленной нарушениями и складчатостью. По мнению авторов работы [9], кривизна – превосходящая мера палеодеформаций, приводящих к растрескиванию пород. Данный атрибут позволяет не только картировать трещиноватые зоны, но и судить о плотности трещин. Связь кривизны с плотностью трещин базируется на следующих трех предположениях: порода хрупкая и поэтому подвержена трещинообразованию; рост кривизны предполагает рост напряжения; рост напряжения предполагает рост плотности трещин.

Разработка основ вычисления кривизны по сейсмическим данным выполнена в работе [19] и предполагала вычисление искомым параметров только вдоль отражающих горизонтов. Несмотря на ряд практических положительных примеров использования так называемой погоризонтной кривизны она содержит ряд недостатков [7]. Во-первых, даже сейсмические данные высокого качества содержат некоррелируемый шум, к которому очень чувствителен искомый атрибут. Во-вторых, она может быть получена только вдоль границ резкого изменения акустических свойств – прокоррелированных отражающих горизонтов. То есть мы вынуждены, обладая трехмерным сейсмическим изображением геологической сре-

ды, перейти к двумерным результатам. И наконец, на результаты значительное влияние оказывает субъективный фактор. Корреляция в зонах уменьшения интенсивности, расхождения отражений, в областях потери корреляции (а именно они представляют наибольший интерес) будет целиком зависеть от опыта и геологических представлений интерпретатора. И если обычным способом борьбы с первой проблемой является фильтрация, имеющая целью подавление шума и сохранение интересующих геологических особенностей, то два последующих недостатка не могут быть устранены. Впоследствии были сформулированы алгоритмы объемной кривизны, которые предполагают выполнение локальной оценки искомого параметра в каждой точке сейсмического пространства. Объемная кривизна требует добавления еще одного этапа в вычислительную схему – необходимо найти поверхность, вдоль которой будут выполнены последующие оценки разнообразных атрибутов кривизны. Два принципиально различных подхода используют для поиска уравнения аппроксимирующей поверхности [5]. Первый предполагает предварительную оценку углов наклона и азимутов в локальной области сейсмического изображения. Оценки углов наклона и азимутов выполняются на основе Гильберт преобразования, расчета частных производных в частотной области либо сканирования. Во втором подходе предварительные оценки углов и азимутов не выполняются, а точки поверхности определяются посредством временных сдвигов между центральной и соседними трассами.

В рамках настоящего исследования реализован второй подход вычисления объемной кривизны, основанный на алгоритме [14]. Поверхность, которая оптимально аппроксимирует поведение отражающей границы в некоторой точке сейсмического изображения, может быть описана уравнением второго порядка

$$z(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f. \quad (7)$$

Уравнение поверхности $z(x, y)$ находится решением системы уравнений относительно коэффициентов a, b, c, d, e, f . Определяются временные сдвиги между центральной и соседними трассами посредством функции взаимной корреляции. И хотя последняя по двум трассам не является достаточно надежной оценкой, однако избыточность данных позволяет получить переопределенную систему линейных уравнений. Кроме того, выполняется параболическая аппроксимация временных сдвигов для более точного определения вертикального смещения по максимуму взаимной корреляции. Уравнение аппроксимирующей поверхности было получено решением системы линейных уравнений методом наименьших квадратов с итерационным уточнением корней [1].

Различными авторами было показано, что различные меры кривизны (гауссова, простиране, падение и т. д.) имеют высокую корреляцию с разрывными нарушениями, но информативными для картирования тектонической нарушенности являются наибольшие положительная и отрицательная кривизны [11]

$$k_{pos} = (a + b) + [(a - b)^2 + c^2]^{1/2}, \quad (8)$$

$$k_{neg} = (a + b) - [(a - b)^2 + c^2]^{1/2}. \quad (9)$$

Атрибуты кривизны позволяют не только выполнить картирование латерально неоднородных зон, обусловленных деформационными процессами, но и заглянуть внутрь неоднородностей. Одним из способов изучения внутренней структуры зон трещиноватости выступает оценка направлений трещин по таким атрибутам кривизны как индекс формы, изгиб и азимут минимальной кривизны [10].

Индекс формы определяется как

$$s = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \left[\frac{k_{\min} + k_{\max}}{k_{\min} - k_{\max}} \right], \quad (10)$$

где k_{\min} и k_{\max} – минимальная и максимальная кривизны соответственно.

Классификация локальных поверхностей по индексу формы следующая: купол ($s = +1$), гребень ($s = +1/2$), седловина ($s = 0$), впадина ($s = -1/2$) и чаша ($s = -1$). Выбор формы зависит от используемой геологической модели. Например, при картировании погребенного русла его края будут отражаться в атрибуте гребня, в то время как ось канала – в атрибуте впадины. Интересный вывод сделан в работе [17], автор которой высказал предположение, что атрибуты гребня характеризуют закрытую трещиноватость в режиме сжатия, а в режиме растяжения лучше использовать атрибут впадины для описания открытых трещин. Кроме того, такие формы как гребень и впадина (также как вытянутые купол и чаша) характеризуются направленностью. Направление их простирания будет определяться как азимут минимальной кривизны

$$\psi = \begin{cases} \pi/4 - \tan^{-1} [c/(a-b)] & \text{при } a \neq b \\ 0 & \text{при } a = b \end{cases} \quad (11)$$

Если рассчитать индекс формы вдоль некоторой поверхности, то изображение будет малоприменимым для интерпретации, так как любой, сколь либо малый изгиб поверхности будет находить свое отображение. Поэтому индекс формы комплексируется с индексом изгиба слоев (curvedness) C

$$C = \left[\frac{(k_{\max}^2 + k_{\min}^2)}{2} \right]^{1/2}, \quad (12)$$

который определяет интенсивность деформации поверхности.

При наличии информации о направлении современного максимального горизонтального напряжения анализ направлений трещин позволит оценить степень раскрытия трещин.

В качестве успешного примера применения атрибутов когерентности и кривизны для изучения зон трещиноватости приведем результаты, полученные в пределах Северо-Родинского блока шахты “Краснолиманская” украинской части Донецкого бассейна.

Краткая сейсмогеологическая характеристика. Поле шахты “Краснолиманская” расположено висячем крыле Центрального надвига в центральной части Красноармейского геолого-промышленного района Донбасса. Залегания пород на поле шахты моноклиналиное с падением на восток и северо-восток под углами от 3–5 до 15–20°. Увеличение углов падения до 35° наблюдается только вблизи тектонических нарушений. Центральный надвиг представляет собой одно из самых крупных нарушений как Красноармейского района, так и всего юго-западного Донбасса. Вертикальная амплитуда надвига составляет от 200 до 390 м, он простирается преимущественно в северо-восточном направлении и падает к юго-востоку под углом 70–85°. Среднеамплитудная нарушение представлена Глубокооярским и Федоровским сбросами, для которых отмечена прерывистость сместителей и их кулисообразное сочленение, а также разветвления. На данной площади, несмотря на выполненный большой объем буровых и специализированных работ, тектоническое строение в части точности пространственной геометризации конкретных сместителей, а иногда и их корреляции, нуждается в уточнении.

На рассматриваемой площади были проведены 3D сейсморазведочные работы с использованием продольных волн. Работы были выполнены специалистами УкрНИМИ НАН Украины и Приднестровской геофизической разведочной экспедиции. Автор в своем исследовании использовал окончательное сейсмическое изображение размером 3,6×1,5 км, которое было получено партией обработки геофизической информации Технологического центра ДГП “Укргеофизика”.

Результаты. На рис. 1. приведен комплексный срез сейсмических атрибутов вдоль висячего крыла отражающего горизонта l_3 , совмещенный со схемой тектонической нарушенности по результатам геологических исследований. Распределение атрибутов на срезе хорошо согласуется с геологическими данными, но однозначно

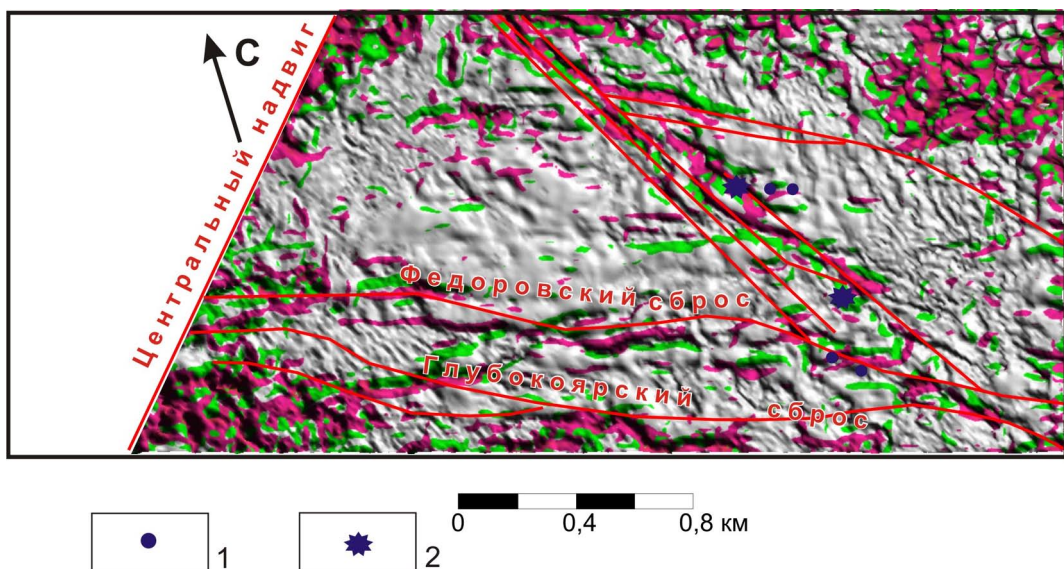


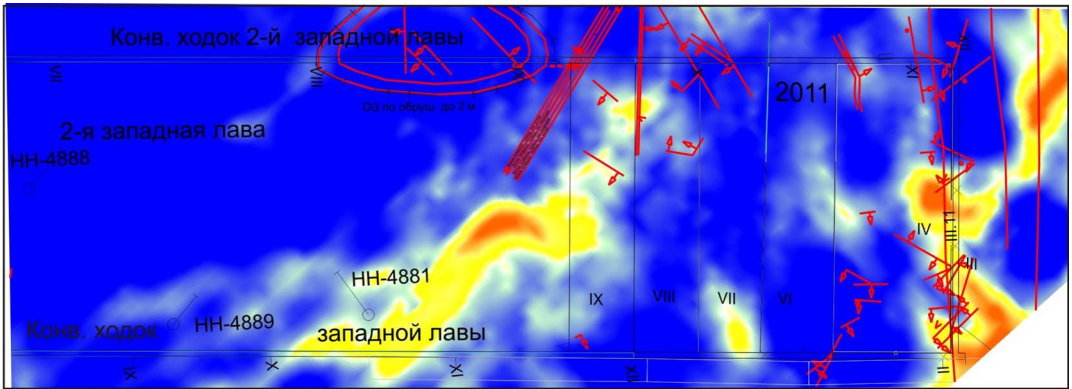
Рис. 1. Комплексное изображение когерентности (серый), наибольших положительной (красный) и отрицательной (зеленый) кривизн вдоль угольного пласта I_3 : 1 – суфляры; 2 – внезапные выбросы метана, которые привели к авариям

указывает на неоднородность тектонических подвижек вдоль нарушений. Для нарушения не представляется возможным выделить одну четко выраженную плоскость и амплитуду смещения. Другими словами, они представляют собой некоторый объем горных пород, насыщенный разрывами различной амплитуды и трещинами. Элементарные разрывы, образующие общую зону тектонического нарушения, состоящую из отдельных локальных разрывов, формируют эшелонированный ряд. Такое строение зон указывает на преобладающую роль сдвиговых деформаций. На участке исследований за время эксплуатации имели место суфляры и внезапные выбросы газа, которые привели к авариям. Наиболее крупная авария, повлекшая за собой человеческие жертвы, произошла 23 мая 2008 г. Обращает на себя внимание приуроченность суфляров и аварий к зонам аномальных значений сейсмических атрибутов.

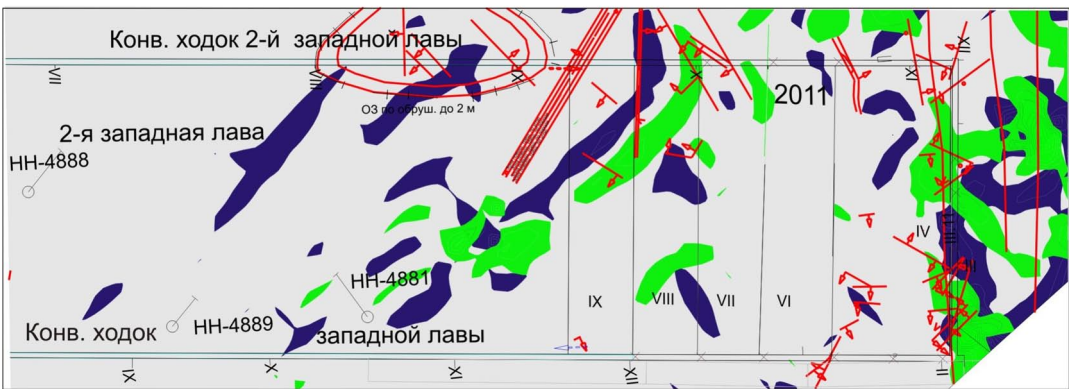
На рис. 2 приведены фрагменты срезов сейсмических атрибутов в пределах второй западной лавы. При проходке конвейерных ходков разработчики вошли в зону

тектонической нарушенности, что скорее всего и ограничило дальнейшую разработку. В центральной части рисунка наблюдается аномалия когерентности и кривизны, пересекающая лаву почти полностью. Эта аномалия была подсечена при проходке конвейерного ходка второй западной лавы на пикетах X–XI. При разработке лавы, когда горный комбайн вошел в прогнозируемую зону нарушенности, был обнаружен ряд мелкоамплитудных разрывов с амплитудой смещения до 1 м.

По компонентам кривизны были получены локальные (100×100 м) и обобщенная розы-диаграммы вдоль угольного пласта I_3 . Сопоставление обобщенной розы-диаграммы по компонентам кривизны и полученной по результатам анализа трещин в горных выработках показывает достаточный уровень совпадения (рис. 3а, б). Некоторую степень несовпадения распределений направлений трещиноватости можно объяснить тем фактом, что горными работами охвачен только некоторый объем участка исследований, в то время как сейсмические данные равномерно распределены по площади.



а



б

Рис. 2. Срезы когерентности (а), наибольших положительной (синий) и отрицательной (зеленый) кривизн (б) на уровне 0,4 с в пределах второй западной лавы
Красным цветом показаны разрывные нарушения по результатам горных работ

Распределение направлений локальных роз-диаграмм еще раз подтверждает сделанное выше предположение о преобладающей роли сдвиговых смещений, так как направление трещин косое относительно направления зон трещиноватости.

Опираясь на модель формирования сдвигов Риделя, автором была выполнена реконструкция полей напряжений. Зоны тектонической нарушенности образуют ромб, биссектриса острого угла которого составляет 126° , что соответствует оси максимального горизонтального сжатия σ_1 , ортогонально ему расположена ось максимального горизонтального растяжения σ_3 (рис. 3в). Такое положение осей максимальных напряжений хорошо со-

гласуется с результатами исследований В. А. Корчемагина [3], которым была выполнена тектоническая реконструкция полей напряжений Донецкого бассейна и установлено, что самое последнее по времени проявления альпийское поле тектонических напряжений, действующее и в настоящее время, является сдвиговым и для него характерно близгоризонтальное положение осей максимальных растяжения и сжатия.

Дискуссия. Предложенная в данной работе методика, как и любые другие, основанные на интерпретации данных сейсморазведки, нуждаются в калибровке и верификации скважинными данными. При калибровке сейсмического атрибута,

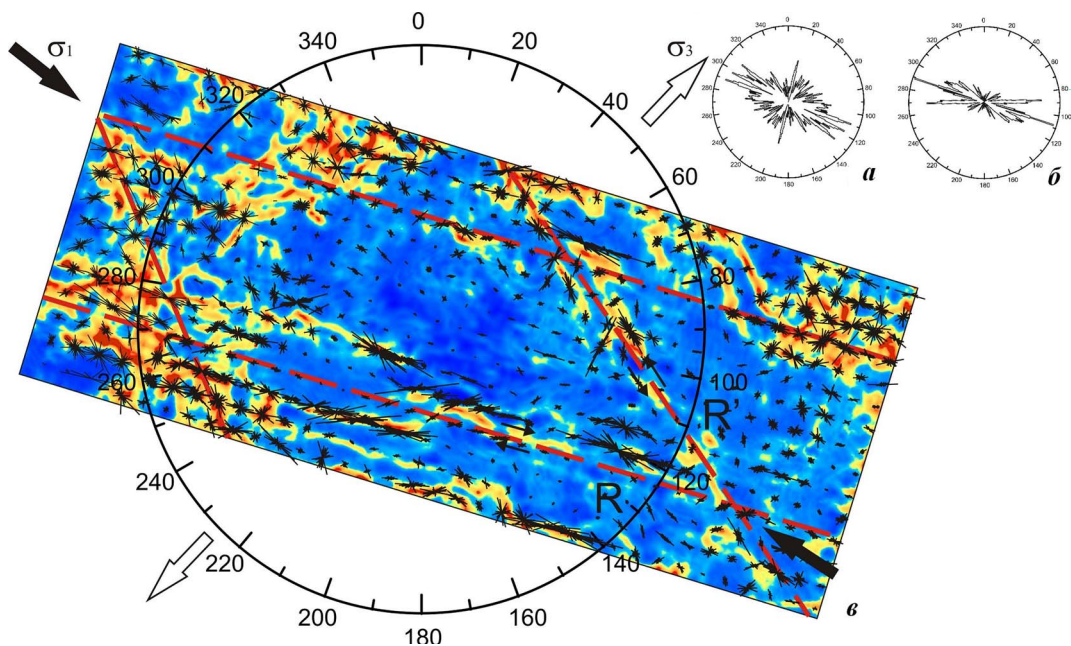


Рис. 3. Реконструкция направлений максимальных напряжений:

обобщенные розы-диаграммы по компонентам кривизны волнового поля (а), замерам в горных выработках (б), локальные розы-диаграммы распределения направлений трещиноватости, совмещенные со срезом когерентности (в)

отождествляемого с влиянием трещиноватости, необходим формализованный критерий оценки трещиноватости в скважинах.

В настоящее время можно выделить три основных источника получения информации о трещиноватости по скважинам: исследования керна, каротаж и гидродинамические исследования. По шлифам и столбикам керна описать искомым сейсмическими методами макротрещиноватость не удаётся в силу того, что керн либо вообще не выносится из этого интервала, либо выносится в виде груды обломков. Выявление трещинного типа коллектора требует последующего привлечения дорогостоящих специализированных скважинных исследований: извлечения ориентированного керна, широковолнового акустического каротажа, скважинных имиджеров, сканеров и т. д. В то же время интервалы интенсивной трещиноватости, вскрытые скважинами в точке пересечения с проводящими тре-

щинными коридорами, характеризуются экстремальным увеличением диаметра ствола за счёт выкрашивания раздробленной породы и показания прижимных приборов в таких интервалах либо вообще отсутствуют, либо не достоверны. Гидродинамические параметры, опирающиеся на дебиты и разницу устьевого и забойного давлений (коэффициент гидропроводности, коэффициент продуктивности, коэффициент пьезопроводности, коэффициент проницаемости) несмотря на высокий уровень неопределённости, дают наиболее прямую и достоверную информацию о поведении флюидов, определяемом неоднородностями резервуара и, по мнению авторов работы [13], могут быть наиболее подходящими параметрами для калибровки сейсмических атрибутов, отвечающих за трещиноватость.

Даже при наличии скважинной информации о направлении и интенсивности трещин задача калибровки сейсмических атрибутов характеризуется высоким

уровнем неоднозначности. Так, например, в работе [15] приведены кроссплоты когерентности с гидродинамическими параметрами, демонстрирующие довольно слабую корреляцию. В то же время есть ряд положительных примеров, где приведены статистически значимые корреляционные зависимости между атрибутами кривизны и плотностью трещин [9, 12].

Розы-диаграммы направлений трещин по скважинным данным не заменимы на этапе получения направлений трещиноватости по атрибутам кривизны. И если в предположении, что трещины представляют собой вытянутые элементы, индекс формы может быть задан в диапазонах $(-0,6 - -0,4)$ и $(0,4 - 0,6)$, которые соответствуют впадинам и гребням, пороговым значением индекса изгиба слоев, ниже которого деформации считаются незначительными, может быть выбрано только на основе дополнительной информации.

В контексте углеводородоперспективности интерес представляет то направление, которое связано с открытой трещиноватостью, обусловленной степенью раскрытия трещин отрыва или скола. Раскрытие эшелонированных трещин скола может быть весьма значительным и объясняется механизмами дилатансии и микропулл-апарта. При наличии информации о направлении современного максимального горизонтального напряжения анализ направлений трещин позволит оценить степень раскрытия трещин.

Выводы. Сейсмические атрибуты, такие как когерентность и кривизна, являются полезными прогностическими критериями локализации зон тектонической нарушенности. Оценить достоверность и перейти от качественных к количественным показателям трещиноватости можно при наличии скважинной информации о направлении и интенсивности трещин. На основе анализа поведения и распределения аномалий когерентности и кривизны в пространстве сделан вывод о генезисе зон тектонической нарушенности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бартеньев О. В.* Фортран для профессионалов. Математическая библиотека IMSL. Ч.1/Бартеньев О. В. М.: Диалог-МИФИ, 2000. 457 с.
2. *Клем-Мусатов К. Д.* Сейсмические аномалии, связанные с локальными нарушениями/К. Д. Клем-Мусатов, Г. Л. Ковалевский, В. Г. Черняков//Геология и геофизика. 1976. № 12. С. 129–153.
3. *Корчемагин В. А.* Поля напряжений и деформации и выбросоопасность углей и пород Донецко-Макеевского района Донбасса/В. А. Корчемагин, И. О. Павлов//Збірник наукових праць УкрНДМІ. 2009. № 5. Ч. II. С. 189–195.
4. *Мендрий Я. В.* Развитие технологии расчета когерентности на основе усовершенствованных моделей сейсмической записи/Я. В. Мендрий, Ю. К. Тяпкин//Геофиз. журнал. 2012. № 3. С. 102–115.
5. *Al-Dossary S.* Multispectral estimates of reflector curvature and rotation/S. Al-Dossary, K. Marfurt//Geophysics. 2006. 71, № 5. P. 41–51.
6. *Bahorich M.* 3D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features: The coherence cube/M. Bahorich, S. Farmer//The Leading Edge. 1995. 14, № 10. P. 1053–1058.
7. *Blumentritt C. H.* Volume-based curvature computations illuminate fracture orientations—Early to mid-Paleozoic, Central Basin Platform, west Texas/C. H. Blumentritt, K. J. Marfurt, E. C. Sullivan//Geophysics. 2006. 71, № 5. P. 159–166.
8. *Gersztenkorn A.* Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3D structural and stratigraphic mapping/A. Gersztenkorn, K. J. Marfurt//Geophysics. 1999. 64, № 5. P. 1468–1479.
9. *Chopra S.* Integration of coherence and volumetric curvature images/S. Chopra, K. J. Marfurt//The Leading Edge. 2010. 29, № 9. P. 1092–1107.
10. *Chopra S.* Using automatically generated 3D rose diagrams for correlation of seismic fracture lineaments with similar lineaments from attributes and well log data/S. Chopra, K. J. Marfurt, H. T. Mai//First Break. 2009. 27, № 10. P. 37–42.
11. *Chopra S.* Volumetric curvature attributes for fault/fracture characterization/S. Chopra, K. J. Marfurt//First Break. 2007. 25, № 7. P. 35–46.
12. *Hunt L.* On calibrating curvature data to fracture density: Causes/L. Hunt, S. Chopra, S. Reynolds, S. Hadley//CSEG Recorder. 2009. № 12. P. 27–32.
13. *Khromova I.* Comparison of seismic-based methods for fracture permeability prediction//I. Khromova, B. Link, N. Marmalevskiy//First Break. 2011. 29, № 1. P. 37–44.

14. Klein P. 3D curvature attributes: a new approach for seismic interpretation/P. Klein, L. Richard, H. James//First Break. 2008. 26, № 4. P. 105–111.

15. Kozlov E. Integrating seismic attributes to estimate transport properties of dual porosity reservoir rocks/E. Kozlov, N. Baransky, V. Motruk [et al.]//First Break. 2009. 27, № 5. P. 43–52.

16. Lisle R. J. Detection of zones of abnormal strains in structures using Gaussian curvature analysis/R. J. Lisle//AAPG Bulletin. 1994. 78. P. 1811–1819.

17. Mai H. T. Coherence and volumetric curvatures and their spatial relationship to faults

and folds, an example from Chicontepec basin, Mexico/H. T. Mai, K. J. Marfurt, S. Chavez-Perez//79th SEG Meeting: Expand. Abstr. 2009. P. 1063–1067.

18. Marfurt K. J. 3D seismic attributes using a semblance-based coherence algorithm/K. J. Marfurt, R. L. Kirlin, S. L. Farmer, M. S. Bahorich//Geophysics. 1998. 63, № 4. P. 1150–1165.

19. Roberts A. Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons/A. Roberts//First Break. 2001. 19, № 2. P. 85–100.

Р у к о п и с о т р и м а н о 05.11.2013.

Наведено історію розвитку і методику розрахунку таких сейсмічних атрибутів як когерентність і кривизна. На прикладі 3D сейсмічних даних у межах шахти “Краснолиманська” в українській частині Донецького басейну показано, що ці атрибути дають можливість не тільки виділити зони тріщинуватості, але й вивчати їх генезис. За атрибутами кривизни отримано рози-діаграми напрямків тріщинуватості для оцінки ступеня розкриття тріщин.

Ключові слова: сейсморозвідка, атрибути, тріщинуватість.

The development history and calculation methodology of such seismic attributes as coherence and curvature is given. With 3D seismic data from the Krasnolimanska coalfield in the Ukrainian part of the Donets basin, it is shown that these attributes open possibilities not only for identification of fracture zones, but also for investigation of their origin. Using curvature, rose-diagrams of fracture directions are obtained. The possibilities of utilizing fracture directions for evaluation of a degree of fracture disclosure are discussed.

Keywords: seismic prospecting, attributes, fracture zones.