

УДК 550.83

## НАКЛОННО-УПРАВЛЯЕМЫЕ АЛГОРИТМЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОГЕРЕНТНОСТИ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ: ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Мендрий Я. В.

(Национальный горный университет,  
г. Днепрпетровск, Украина)

*Наведено алгоритм оцінки когерентності хвильового поля, який враховує нахил відбиваючих горизонтів. Показана його ефективність при рішенні задач нафтогазової та вугільної геології. Обговорюються методичні питання оцінки когерентності пов'язані в підвищеннях розподільної здатності.*

*The dip-steering coherence measure of wave field method is presented. Its efficiency by solving the problem of oil-and-gas and coal geology is shown. Methodological questions coherence measure connected with increasing the resolution is discussed.*

Атрибутивный анализ, как элемент интерпретации сейсмических данных, в последние десятилетия широко используется для решения ряда геологических задач. В настоящее время число атрибутов (количественных характеристик волнового поля) превышает полсотни, и их количество постоянно возрастает, как благодаря введению новых, так и комбинации уже предложенных в т.н. гибридные или мультиатрибуты [1].

Столь широкому внедрению атрибутов способствовал, прежде всего, переход к 3D системам. Повышение кратности и плотности наблюдений, совершенствование процедур обработки позволили получать сейсмические изображения с высоким соотношением сигнал-помеха.

Определяющим критерием при выборе набора атрибутов выступает объект поиска. Атрибуты, чувствительные к изменению амплитуд, такие как инверсия и AVO анализ широко используются для прогноза литологических и петрофизических свойств нефтегазовых резервуаров. Для изучения латеральных изменений геологической среды, таких как зоны выклинивания, разрывные нарушения, зоны повышенной трещиноватости, погребенные русла и т.д. эффективными являются, атрибуты чувствительные к геометрии отражений (углы падения, азимут падения, кривизна) и форме сейсмического импульса (спектральная декомпозиция, когерентность).

Оценка сейсмической когерентности по 3-D данным представляет собой радикально иной способ отображения сейсмической информации для картирования тонких структурных и литологических особенностей геологического разреза. На разрезах и срезях когерентности подчеркиваются области, связанные с ухудшением степени прослеживаемости отражающих горизонтов [2, 3]. Данный атрибут широко используется при картировании малоамплитудных разрывных нарушений и зон трещиноватости при решении задач нефтегазовой [2, 3], и угольной геологии [4].

В большинстве современных интерпретационных пакетах когерентность вычисляется в пределах горизонтальной скользящей базы. Это приводит к так называемым структурным утечкам – понижению когерентности вследствие негоризонтального залегания геологических границ [5]. Таким образом, первым шагом при оценке когерентности должно быть определение поверхности, вдоль которой данная оценка будет выполняться.

Цель данной работы показать эффективность и целесообразность применения наклонно-управляемых схем вычисления когерентности.

В настоящее время существует большое количество разнообразных методов определения когерентности многоканальной сейсмической записи. Подавляющее большинство из них, так или иначе, связывает это понятие с отношением сигнал-помеха или, что более удобно, с отношением энергии сигнальной компоненты к общей энергии записи в некоторой локальной области волнового поля. При таком определении отсутствие сигнала характеризу-

ется 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, как правило, носящих оптимизированный характер, всегда лежит наше представление о предполагаемой структуре сейсмической записи.

Количество трасс и длина временного окна регулируется размерами поисковых объектов и определяет помехоустойчивость метода. Алгоритмы оценки когерентности были изначально разработаны и активно применяются в скоростном анализе [6, 7]. Оценка когерентности использовалась для выделения из поля сейсмограмм ОГТ корреляционной составляющей [8, 9].

Впервые сейсмический куб данных был пересчитан в куб когерентности в 1995 году (Bahorich and Farmer). Здесь в качестве меры когерентности было предложено использовать нормированную кросс-корреляционную функцию [10]. Хотя в анализе принимало участие пять трасс (центральная и ближайшие к ней в  $x$  и  $y$  направлениях), непосредственно, функция взаимной корреляции вычислялась между двумя трассами. Отсюда основной недостаток алгоритма – низкая помехоустойчивость.

Впоследствии, было предложено значительное количество способов оценки когерентности, основанных на: многоканальном коэффициенте подобия [11], собственных значениях ковариационной матрицы [12], локальной структурной энтропии [13], применении статистик более высоких порядков [14]. Каждая из приведенных оценок характеризуется рядом преимуществ и недостатков. В частности, многоканальный коэффициент подобия характеризуется большей устойчивостью в присутствии шума, но достаточно низкой разрешающей способностью. Оптимизированные алгоритмы [12, 13], обеспечивающие достаточно высокое разрешение оценки когерентности, не содержат непосредственно учет наклона рефрактора.

В данной работе в качестве меры когерентности принято отношение первого собственного значения ковариационной матрицы к общей энергии записи. Этот подход впервые предложен в

работе [12] и сейчас широко использующийся на практике. Он относится к оптимизированным, и допускает произвольное варьирование амплитуд сигнала между каналами при постоянной дисперсии помех.

Рассмотрим скользящее в пространстве и во времени окно, в пределах которого выполняется расчет когерентности. Пусть оно состоит из  $M$  трасс и  $L$  отчетов на каждой трассе.

Представим информацию в окне в следующей матричной форме:

$$X = S + N, \quad (1)$$

где  $S = \{s_{ik}\}$  и  $N = \{n_{ik}\}$  – соответственно сигнальная и шумовая компоненты записи  $X = \{x_{ik}\}; i=1,2,\dots,L; k=1,2,\dots,M$ . С учетом временных сдвигов, выравнивающих сигнал во времени, он предполагается имеющим одинаковую форму,  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_L\}^T$ , но произвольную амплитуду,  $a = \{a_1, a_2, \dots, a_M\}^T$ , на разных трассах. Поэтому он может быть представлен как:

$$S = sa^T, \quad (2)$$

где  $T$  – операция транспонирования,  $s_{ik} = s_i a_k$ . Отметим, что амплитуда  $a_k = 0$  свидетельствует об отсутствии сигнала, а  $a_k < 0$  – об условно отрицательной полярности сигнала.

В свою очередь, шум будем считать независимым от сигнала и между каналами стационарным нормальным случайным процессом с нулевым средним и зависящей от номера канала дисперсией  $\sigma_k^2$ . Это предполагает, что в наборе данных, подвергаемых расчету когерентности, регулярные помехи предварительно устранены.

Выполним сингулярное разложение матрицы  $X$ , сделав предварительно вполне естественное предположение, что  $L \geq M$ .

Тогда

$$X = \sum_{l=1}^M \gamma_l v_l u_l^T, \quad (3)$$

где  $\gamma_l$ ,  $v_l$  и  $u_l$  – сингулярные числа, левосторонние сингулярные векторы и правосторонние сингулярные векторы матрицы

$X$ , соответственно. При этом сингулярные числа  $\gamma_l$  равны положительным квадратным корням из  $\lambda_l$ , соответствующих собственным значениям корреляционной матрицы  $F = X^T X$ , а векторы  $v_l$  и  $u_l$  – ортонормированные:  $v_l^T v_m = \delta_{lm}$ ,  $u_l^T u_m = \delta_{lm}$ , где  $\delta_{lm}$  – символ Кронекера. Сингулярные числа предполагаются упорядоченными по убыванию:  $\gamma_1 \geq \gamma_2 \geq \dots \geq \gamma_m$ .

В соответствии с теоремой Экарти-Янга, оптимальной оценкой сигнала в этом случае является первый член разложения (3), равный  $\gamma_1 v_1 u_1^T$ . Поскольку его энергия равна  $\gamma_1^2 = \lambda_1$ , а полная энергия записи может быть представлена как  $Tr(F) = \sum_{l=1}^M F_l = \sum_{l=1}^M \lambda_l$ , когерентность можно рассчитать по формуле

$$C = \frac{\lambda_1}{\sum_{l=1}^M \lambda_l}. \quad (4)$$

Для изучения аномалий волнового поля, возникающих при распространении упругих волн в трещиноватых средах, и оценки возможности их отображения в поле когерентности, выполнено математическое моделирование сейсмограмм в пакете программ *Tesseral-2D* канадской компанией *Tesseral Technology Inc*. Модель представляет собой горизонтальную тонкослоистую среду (рис. 1а). Скорость в как функция глубины в этом случае была выбрана как реализация случайного процесса, равномерно распределенного в интервале [3900, 4100] м/с. Модель содержит три вертикальные зоны протяженностью 1 км и мощностью 50 м. Они отстоят друг от друга на расстояние полкилометра, характеризуются одинаковой скоростью 3,7 км/с и имитируют вертикальные трещиноватые зоны.

Для получения набора синтетических сейсмограмм использовался алгоритм конечно-разностного расчета на основе решения акустического волнового уравнения. Затем, эти сейсмограммы были подвергнуты глубинной миграции Кирхгофа до суммирования с постоянной скоростью 4 км/с, и в результате был получен глубинный разрез, изображенный на рис. 1б.

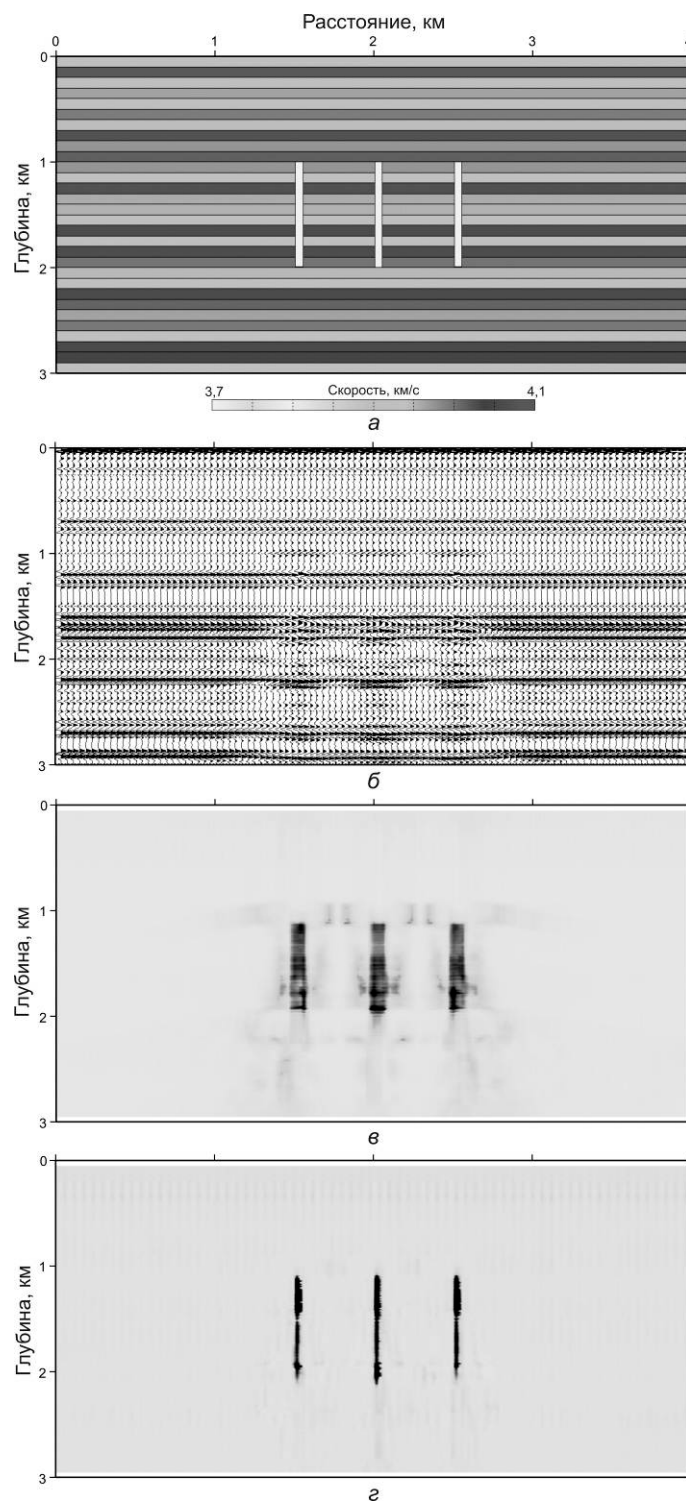


Рис. 1. Тонкослоистая глубинно-скоростная модель с тремя вертикальными неоднородностями (а), соответствующий глубинный сейсмический разрез после миграции (б) и результаты расчета когерентности  $C$  (в) и  $C_{(1)}$  (г)

Следует отметить, что для зон разрывных нарушений и трещиноватости характерно наличие интенсивных дифрагированных волн, которые в ряде методик являются диагностическим критерием [15, 16], а при оценке когерентности выступают помехами. Их подавление лишь частично возможно в процессе миграции после суммирования. Поэтому, как показано в работе [17], для повышения надежности определения и локализации ограниченных по латерали объектов, данные должны быть подвергнуты престоковой миграции во временной либо глубинной областях. Оценка когерентности, выполненная вдоль этого разреза (рис. 1 в), показывает, что вертикальные зоны порождают участки резкого падения когерентности, положения которых хорошо совпадает с положением зон трещиноватости.

Обращает на себя внимание тот факт, что ширина аномалии определяется реальным размером плюс окно анализа. Причем падение когерентности в области аномалии обратно пропорционально количеству трасс участвующих в расчете. Ширина окна определяет устойчивость и разрешающую способность алгоритма. Чем больше трасс участвует в расчете, тем точнее определяется форма сигнала и, как следствие, меньше случайный разброс значений. Но, с другой стороны, использование большого количества трасс приводит к тому, что узкие зоны аномальных значений растягиваются и сглаживаются. При достаточно высоком соотношении сигнал-шум, часто свойственном сейсмическим изображениям после современной обработки, можно повысить горизонтальную разрешающую способность методов оценки когерентности. Для этого определим когерентность как отношение энергии сигнальной компоненты к общей энергии центральной трассы в скользящей вдоль сейсмического изображения базе.

В этом случае мера когерентности может быть выражена как

$$C_{(1)} = \frac{\lambda_1 u_{1y}}{E_y}, \quad (5)$$

где  $E_y$  – энергия на центральной трассе скользящей базы,  $u_{1y}$  – центральный отсчет первого левостороннего вектора сингулярного разложения из формулы (3).

Такая оценка (рис. 1 г) обладает явно более высокой разрешающей способностью.

Что касается длины базы по вертикали (времени), то помимо нахождения компромисса между разрешением и устойчивостью алгоритмов оценки когерентности, следует помнить о том, что выдержанные по латерали и вертикали относительно крупные объекты будут лучше видны на изображениях когерентности с большими окнами (50 - 100 мс), в то время как малоамплитудные невыдержанные разрывные нарушения находят отражения при малых временных базах (10 - 40 мс) [18].

Когерентность вдоль сейсмического изображения вычисляется в двух вариантах: вдоль отражающего горизонта или по всему объему данных.

Оценка когерентности вдоль горизонта в ряде случаев дает более устойчивые результаты, но не лишена субъективизма, обусловленного корреляцией отражающих горизонтов [19]. Хотя, пожалуй, основным ее недостатком является то, что такая оценка может быть выполнена только вдоль пропикированных горизонтов, что вносит ряд неоднозначностей в получение целостного изображения геологической среды. Объемная оценка когерентности лишена данного недостатка, но при ее вычислении и анализе следует помнить о некоторых особенностях. Во-первых, мы получаем различные оценки в пределах интенсивных отражений и межреперной толщи. Это приводит к появлению на разрезах когерентности протяженных зон пониженной интенсивности, которые повторяют поведение отражающих горизонтов и обусловлены отсутствием интенсивных отражений в пределах скользящей базы. Если при интерпретации разрезов такие зоны могут быть легко отбракованы, то на срезях, в случае наклонного залегания границ это может приводить к некоторой двусмысленности. В том случае, когда когерентность вычисляется с целью картирования субвертикальных разрывных нарушений и зон трещиноватости, в литературе рекомендуется применять к кубу когерентности специальные фильтры направленного действия [20].

Вторая особенность связана непосредственно с наклонным поведением отражающих границ, которое, в случае горизонтальной скользящей базы, обуславливает появление на срезях и раз-



резах когерентности структурных утечек – областей понижения когерентности не имеющих под собой геологической основы. Таким образом, первым шагом при оценке когерентности должно быть определения поверхности, вдоль которой данная оценка будет производиться.

В литературе предложено значительное количество т.н. наклонно-управляемых алгоритмов расчета когерентности. В ряде случаев определение поверхности и оценка когерентности производятся раздельно [21, 22], в то время как в других алгоритмах положение поверхности непосредственно не определяется. Здесь когерентность вычисляется вдоль некоторого набора поверхностей, и ее максимальное значение принимается как истинное [23]. Вторая группа методов, хотя и обладает, в некоторых случаях, большей устойчивостью, требует значительных вычислительных затрат. По сравнению с обычными алгоритмами расчета когерентности такие наклонно-управляемые схемы увеличивают скорость счета в 100-200 раз.

В данной работе для учета наклона рефрактора предложено вычислять когерентность вдоль поверхности второго порядка, аппроксимируемой полиномом второго порядка. [24]:

$$z(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \quad (6)$$

Уравнение поверхности  $z(x, y)$  может быть найдено решением системы уравнений относительно коэффициентов  $a, b, c, d, e, f$ . Для этого определяются временные сдвиги между центральной и соседними трассами, посредством функции взаимной корреляции. Безусловно, функция взаимной корреляции по двум трассам не является достаточно надежной оценкой, но избыточность данных позволяет получить переопределенную систему линейных уравнений. Ее решение методом наименьших квадратов с итерационным уточнением корней обеспечивает устойчивость данной наклонно-управляемой схемы.

Наличие аппроксимирующей поверхности позволяет рассчитывать дополнительную характеристику – кривизну. Данный геометрический атрибут чувствителен к локальным изгибам отражающих горизонтов и его, наряду с когерентностью, можно

рассматривать как признак проявления областей тектонических нарушений в волновом поле [25].

Среди многообразия атрибутов объемной кривизны наибольший интерес при картировании зон разрывных нарушений и трещиноватости представляют максимальные положительные и отрицательные кривизны, оценка которых осуществляется на основе коэффициентов уравнения (6) по следующим формулам:

$$k_{pos} = (a+b) + \left[ (a-b)^2 + c^2 \right]^{1/2}, \quad (7)$$

$$k_{neg} = (a+b) - \left[ (a-b)^2 + c^2 \right]^{1/2}. \quad (8)$$

В качестве примера настоящих исследований рассмотрим результаты, полученные на одной из площадей в Днепроовско-Донецкой впадине и в пределах шахты «Краснолиманская» Донецкого угольного бассейна.

На рисунках 2 а и 2 б приведены разрезы, перпендикулярные оси антиклинали в пределах одного из газовых месторождений ДДВ, через кубы когерентности, рассчитанные по формуле (5) без и с привлечением алгоритма учета наклона отражающих горизонтов соответственно. Очевидно, что столь значительное отличие от горизонтального строения геологической среды, обуславливает малую эффективность и надежность стандартной схемы вычисления когерентности с горизонтальной скользящей базой анализа. В то же время на разрезе, полученном по наклонно-управляемой схеме, достаточно уверенно прослеживаются непосредственно антиклиналь, разрывные нарушения в крыльях структуры, обусловленные, скорее всего, вертикальными подвижками в фундаменте и ограничивающие антиклинальное поднятие, безкорневые субвертикальные трещины отрыва в своде складки. Поведение вытянутой в меридиональном направлении антиклинальной структуры отображено на временных срезах на уровне 1,5 с через те же кубы когерентности (рис. 2 в и рис. 2 г соответственно). Здесь видно, что учет наклона позволил более уверенно проследить разрывное нарушение, ограничивающее антиклиналь с востока.

Геологическое строение участка шахтного поля «Краснолиманская» характеризуется более пологим залеганием осадочной толщи (рис. 3а). Поэтому различие между горизонтальным и наклонно-управляемым кубами когерентности не столь значительно, как в предыдущем примере. Однако, анализируя временные срезы на уровне 0,4 с, следует обратить внимание на аномалию юго-западного простирания, показанную стрелками. Эта аномалия практически не находит отображения на наклонно-управляемом срезе и на срезе максимальной отрицательной кривизны, что позволяет отнести ее к структурным утечкам, связанным с увеличением углов падения отражающего горизонта  $l_3$  вблизи Центрального надвига.

Помимо временных срезов и разрезов когерентность может быть представлена вдоль поверхности отражающего горизонта, т.н. стратиграфический срез. Такие срезы очень удобны в интерпретации. Для уменьшения субъективного фактора, связанного с корреляцией отражающих горизонтов, автором предлагается использовать тот же наклонно-управляемый подход, что и при вычислении объемной когерентности или, другими словами, выбирать из куба когерентности значения вдоль пропикированной поверхности. На примере таких стратиграфических срезов, еще раз, но уже на реальных данных, покажем возможность повышения разрешающей способности, благодаря оценке когерентности как отношение энергии сигнальной компоненты к общей энергии центральной трассы в скользящей вдоль сейсмического изображения базе. На рисунках 4а и 4б показаны стратиграфические срезы когерентности вдоль отражающего горизонта  $l_3$ , рассчитанные по формуле (5) и (6) соответственно в пределах скользящей базы  $5 \times 5$  трасс.

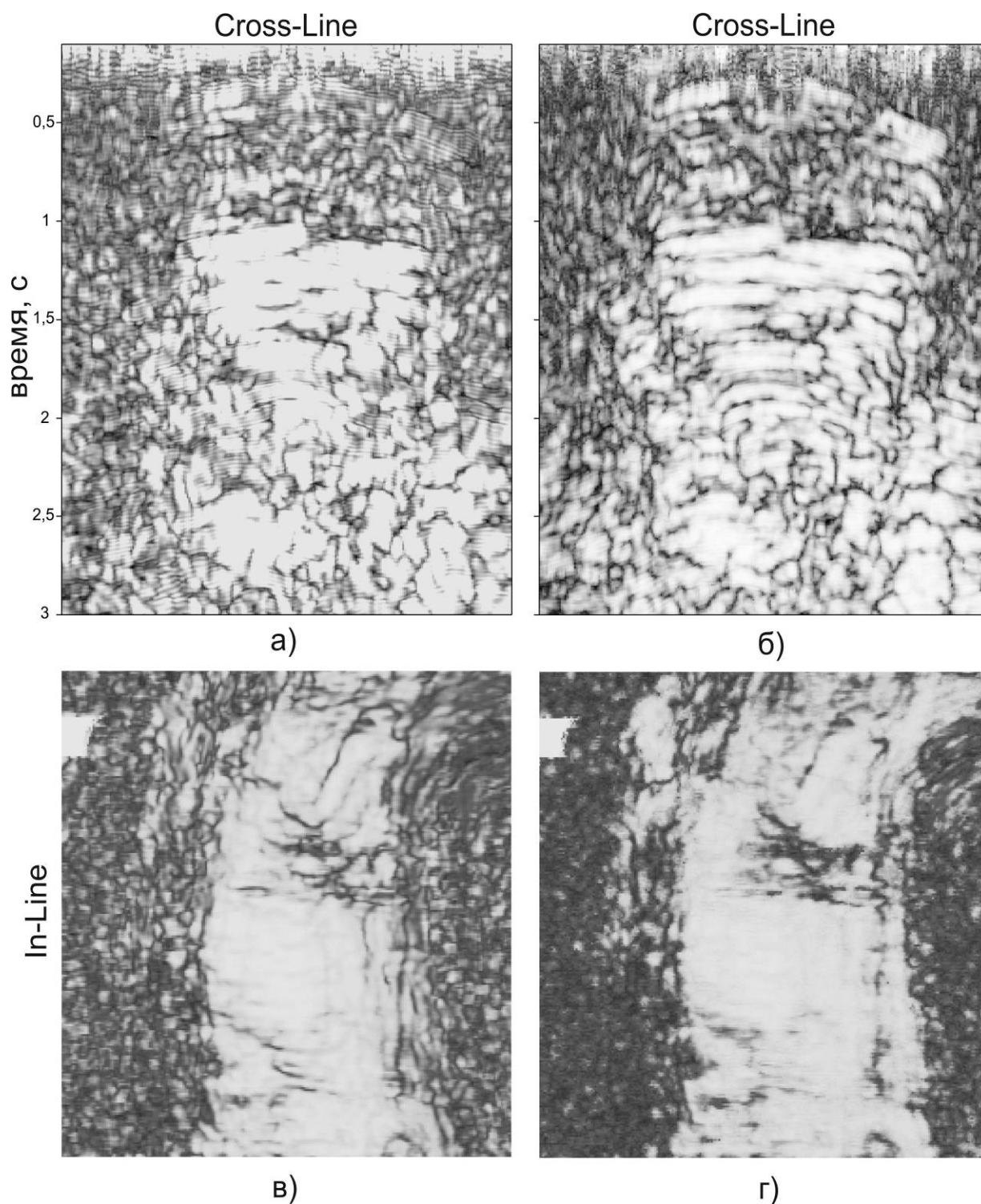


Рис. 2. Разрезы, перпендикулярные оси антиклинали (а, б) и временные срезы на уровне 1,5 с (в, г) (Днепровско-Донецкая впадина)

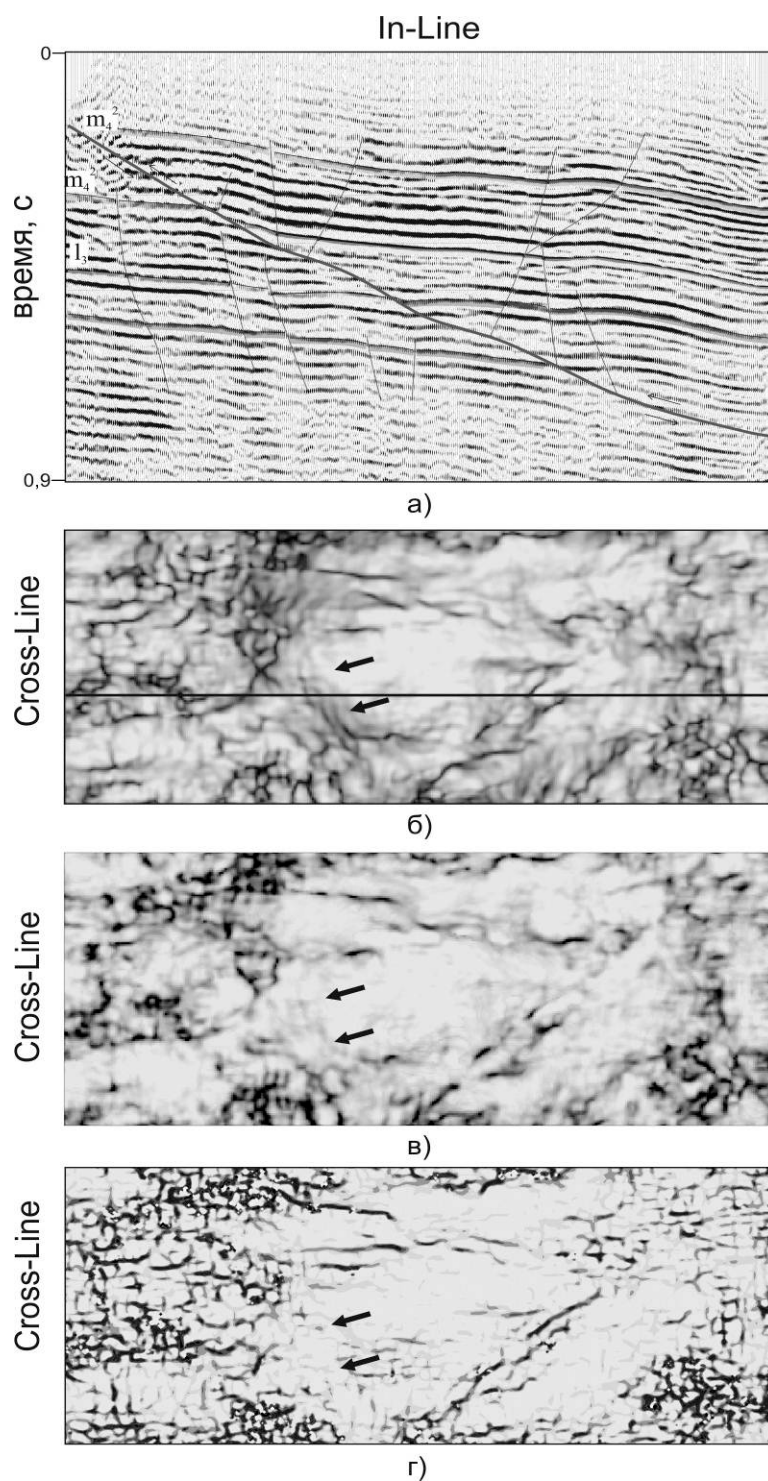


Рис. 3. Временные срезы когерентности  $C$  вдоль горизонтальной скользящей базы (а) с привлечением наклонно-управляемой схемы (б) через куб когерентности  $C$  и максимальная положительная кривизна (в) на уровне 0,4 с (участок шахты «Краснолиманская»)

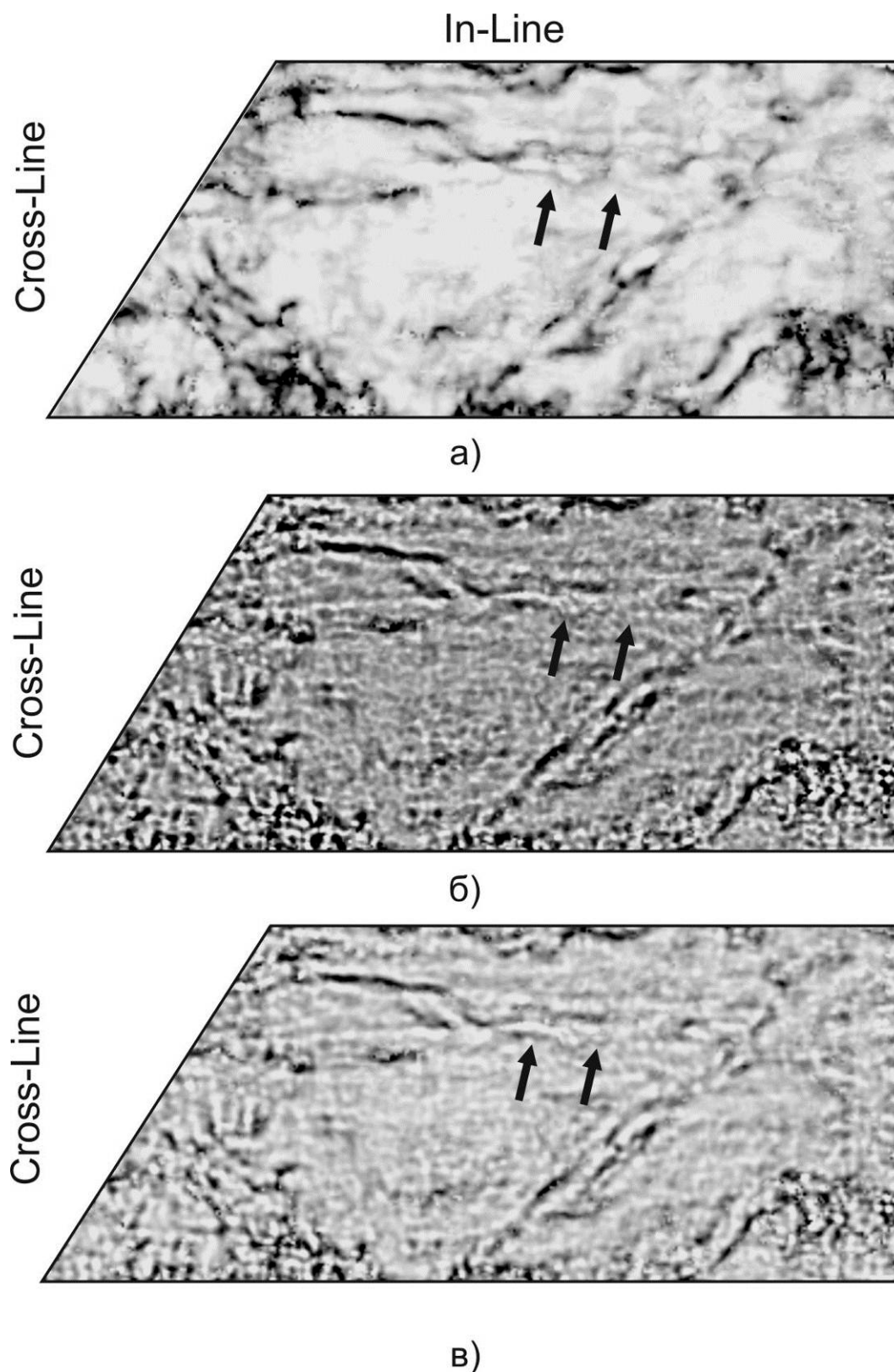


Рис. 4. Стратиграфические срезы вдоль поверхности отражающего горизонта  $I_3$  через куб когерентности  $C$  (а),  $C_{(1)}$  (б),  $C_{(3)}$  (в)

Естественно, использование более локальных оценок приводит не только к повышению разрешающей способности (более четко прослеживаются разрывные нарушения в северной части западно-восточного простирания), но и к увеличению уровня шума. Альтернативой может служить оценка когерентности, как отношение энергии сигнальной компоненты к общей энергии только части трасс, участвующих в анализе. На рис. 4 в показан срез когерентности, мерой которой выступает отношение энергии сигнальной компоненты к общей энергии девяти центральных трасс (по аналогии назовем такую оценку  $C_{(3)}$ ), а. Здесь также, более однозначно прослеживается аномалия западно-восточного простирания (показана стрелками), но уровень шума уменьшен.

Приведенный выше наклонно-управляемый алгоритм оценки когерентности реализованных в авторском пакете программ.

Не вызывает сомнения актуальность проблемы выделения разрывных нарушений и зон трещиноватости при решении задач нефтегазовой и угольной геологии. Разрывные нарушения могут служить, как экранами, контролирующими залежь так и каналами миграции углеводородов. В настоящее время перспективы многих традиционных пористых коллекторов практически исчерпаны, и отрасль переключилась на нефтегазоносные комплексы пород, коллекторские свойства которых обусловлены естественной трещиноватостью [26].

В угольной геологии достоверная информация о тектоническом строении углепородного массива способствует обеспечению безопасности ведения горных работ. Кроме того, природные процессы дезинтеграции углепородного массива можно считать одним из ведущих факторов формирования областей скопления свободного метана [4]. Локальные нарушения сплошности углепородного массива, приуроченные к метановой зоне и не имеющие выхода на поверхность, являются благоприятными для скопления свободного метана в трещинах.

В свете вышеперечисленных задач включение в интерпретационный процесс анализа когерентности и кривизны волнового поля будет способствовать повышению достоверности и надежности в картировании разрывных нарушений и зон трещиноватости.

*Автор искренне благодарит специалистов УкрНИИМИ НАН Украины и УкрГГРИ за предоставленные геолого-геофизические материалы, пожелания и замечания. Особую благодарность автор выражает д. ф.-м. н., профессору Тяпкину Юрию Константиновичу за ценные советы и консультации при подготовке работы.*

## СПИСОК ССЫЛОК

1. Chopra S., Marfurt K.J. Seismic attributes – A historical perspective // *Geophysics*. – 2005. – 70, № 5. – P. 3 – 28.
2. Gersztenkorn A., Sharp J., Marfurt K.J. Delineation of tectonic features offshore trinidad using 3-D seismic coherence // *The Leading Edge*. – 1999 – 18, № 4 – P. 1000–1008.
3. Довбнич М.М., Мачула М.С., Мендрий Я.В. Опыт прогноза трещиноватых зон при изучении нефтегазоперспективности юрских отложений Северо-Западной Сибири // *Геоинформатика*. – 2010. – № 1. – С. 50 – 57.
4. Jingbin C., Zhensheng Z., Zhongping Z., Jian Z. Using multivariate seismic attributions analysis technique to interpret minor faults in coal seismic survey // *SEG International Exposition and Annual Meeting, Houston*. – 2009. – P. 1078 – 1081.
5. Chopra S., Marfurt K.J. Gleaning meaning information from seismic attributes // *First Break*. – 2008. – 26, № 9 – P. 43 – 53.
6. Neidell N.S., Taner M.T. Semblance and other coherent measures for multichannel data // *Geophysics*. – 1971. – 36, № 3. – P. 482 – 497.
7. Kirlin R.L. The relationship between semblance and eigenstructure velocity estimators // *Geophysics*. – 1992. – 57, № 8. – P. 1027 – 1033.
8. Карпенко И.В., Будкевич В.Б., Грищенко В.И., Познанский С.М. О возможности использования метода разделения поля суммы общей глубинной точки на коррелируемую и некоррелируемую составляющие // *Геофиз. журн.* – 1982. – № 2. – С. 62 – 67.



9. Тяпкин Ю.К., Грищенко В.И., Познанский С.М. Мгновенная когерентность сейсмического волнового поля // Прикладная геофизика. – 1989. – Вып. 120. – С. 86 – 93.
10. Bahorich M.S., Farmer S.L. The coherence cube // The Leading Edge. – 1995. – 14, № 10 – P. 1053 – 1058.
11. Marfurt K.J., Kirlin R.J., Farmer S.L., Bahorich M.S. 3-D seismic attributes using a semblance-based coherence algorithm // Geophysics. – 1998. – 63, № 4 – P. 1150 – 1165.
12. Gersztenkorn A., Marfurt K.J. Eigenstructure based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping // Geophysics. – 1999. – 64, № 5 – P. 1468 – 1479.
13. Cohen I., Coifman R.R. Local discontinuity measures for 3-D seismic data // Geophysics. – 2002. – 67, № 4 – P. 1933 – 1945.
14. Lu W., Li Y., Zhang S., Xiao H., Li Y. Higher-order-statistics and supertrace-based coherence-estimation algorithm // Geophysics. – 2005. – 70, № 3, – P. 13 – 18.
15. Гарин В. П., Черняков В. Г., Яшков Г. Н. Изучение тектонических нарушений дифрагированными волнами // Материалы междунар. геофиз. конф. «Геологической службе России 300 лет». Секция 1. 2000. – С. 63 – 64.
16. Гольдин С.В., Смирнов М.Ю., Поздняков В.А., Чеверда В.В. Построение сейсмических изображений в рассеянных волнах как средство детализации сейсмического разреза // Геофизика. Спец. вып., 2004. – С. 23 – 29.
17. Yuan Y., Gao Y., Bai L., Liu Z. Prestack Kirchhoff time migration of 3D coal seismic data from mining zones // Geophys. Prosp. – 2011. – 59, № 3 – P. 455 – 463.
18. Kozlov E., Baransky N., Motruk V., Rusalin A., Persidskaya L., Kirseleva O., Vovykin A. Integrating seismic attributes to estimate transport properties of dual porosity reservoir rocks // First Break. – 2009. – 27, № 5 – P. 43–52.
19. Al-Dossary S., Marfurt K.J. 3D volumetric multispectral estimates of reflector curvature and rotation // Geophysics. – 2006. – 71, № 5 – P. 41–51.
20. Admasu F., Back S., Toennies K. Autotracking of faults on 3D seismic data // Geophysics – 2006. – 71, № 6 – P. 49–53.

21. Marfurt K.J., Kirilin R.L. 3-D broad-band estimates of reflector dip and amplitude // *Geophysics*. – 2000. – 65, № 1 – P. 304 – 320.
22. Marfurt K.J., Sudhaker V., Gersztenkorn A., Crawford K.D., Nissen S.E. Coherence calculations in the presence of structural dip // *Geophysics*. – 1999 – 64, № 1 – P. 104–111.
23. Marfurt K.J. Robust estimates of 3D reflector dip and azimuth // *Geophysics*. – 2006. – 71, № 4 – P. 29 – 40.
24. Roberts A. Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons // *First Break*. – 2001. – 19, № 2 – P. 85 – 99.
25. Sigismondi M., and Soldo J.C., Curvature attributes and seismic interpretation: Case studies from Argentina basins// *The Leading Edge*. – 2003. – 22, № 11 – P. 1122 – 1126.
26. Khromova I., Link B., Marmelevskiy N. Comparison of seismic-based methods for fracture permeability prediction // *First Break*. – 2011. – 29, № 1 – P. 37 – 44.
27. Газоносность угольных месторождений Донбасса / А.В. Анциферов, М.Г. Тиркель, М.Т. Хохлов [и др.] – Киев: Наукова думка, 2004. – 232 с.