

Emerging technology for quantifying minimal anisotropy Новый способ измерения минимальной анизотропии

До недавнего времени надежное измерение направления и выраженности анизотропии было возможным лишь в случае, когда анизотропия скорости превышала 5%. Carlos Barrientos, Erik Wielemaker, Thomas Plona, Jakob Haldorsen, Pablo Saldungaray (Schlumberger) и Jose Luis Arroyo Franco (Pemex) демонстрируют возможность измерения анизотропии менее 5% с помощью улучшенных передатчиков и дополнительных приемников (осевых и азимутальных).

Измерение малой, вплоть до 1%, анизотропии стало возможным через использование резонансных или сейсмических методов. Эта информация является критической при определении направления напряжения для расположения скважины, а также при применении направленной перфорации. Возможность определить слабую анизотропию может быть использована при разведке благоприятных для бурения участков на разработанных месторождениях и для усиления эффекта гидроразрыва.

Для демонстрации механизма определения анизотропии было выбрано месторождение Pemex Cuiclahuac в бассейне Tertiary Burgos в северо-восточном районе Мексики из-за особенностей строения пластов, где объектом исследований является плотный слоистый газоносный песок речных и дельтовых отложений. О наличии слабой акустической анизотропии свидетельствуют как данные, полученные с помощью нового прибора для акустического каротажа, так и сейсмические скважинные данные, полученные с помощью вибраторов поперечных волн. Описаны два различных механизма анизотропии, различающиеся по силе и направлению.

Местность

На месторождении Cuitlahuac, площадью 200 км², недавно была возобновлена добыча газа из олигоценых песков, проводившаяся с 1972 г.; начато бурение новых скважин. Месторождение состоит из 20 песчаных тел с нормальными сбросами в направлении NNE-SSW. Напластования глина-песок порождают слоистость, напрямую связанную с TIV-анизотропией. На изученном 800-метровом интервале слои отклоняются к востоку под малым углом.

от 5% до 10%; обратные величины. Направление основной оси эллипса скорости продольных волн – от 60 зависит от направления напряженности, до 100 ps/ft, а поперечных – от 120 которая может быть соотнесена с до 240 ps/ft. Песок обладает низкой направлением анизотропии. Таким проницаемостью, и для получения образом, знание этого направления газа в промышленных масштабах позволит использовать направленную требуется гидроразрыв. Как и у перфорацию для уменьшения большинства скважин с использованием преждевременного выпадения песка из нием гидроразрыва, дренажные жидкости гидроразрыва и схемы скважин Cuitlahuac – максимального увеличения длины овальной или эллиптической формы, разрыва – а с ней и продуктивности и оптимальное дренирование скважины. резервуара зависит от правильного Информация об анизотропии также расположения скважин: избегания, используется в обработке по возможности, как перекрытия поверхностных сейсмических данных областей дренирования между при определении миграции во скважинами, так и оставления временной (PSTM) и глубинной незатронутых участков. (PSDM) области до суммирования, что

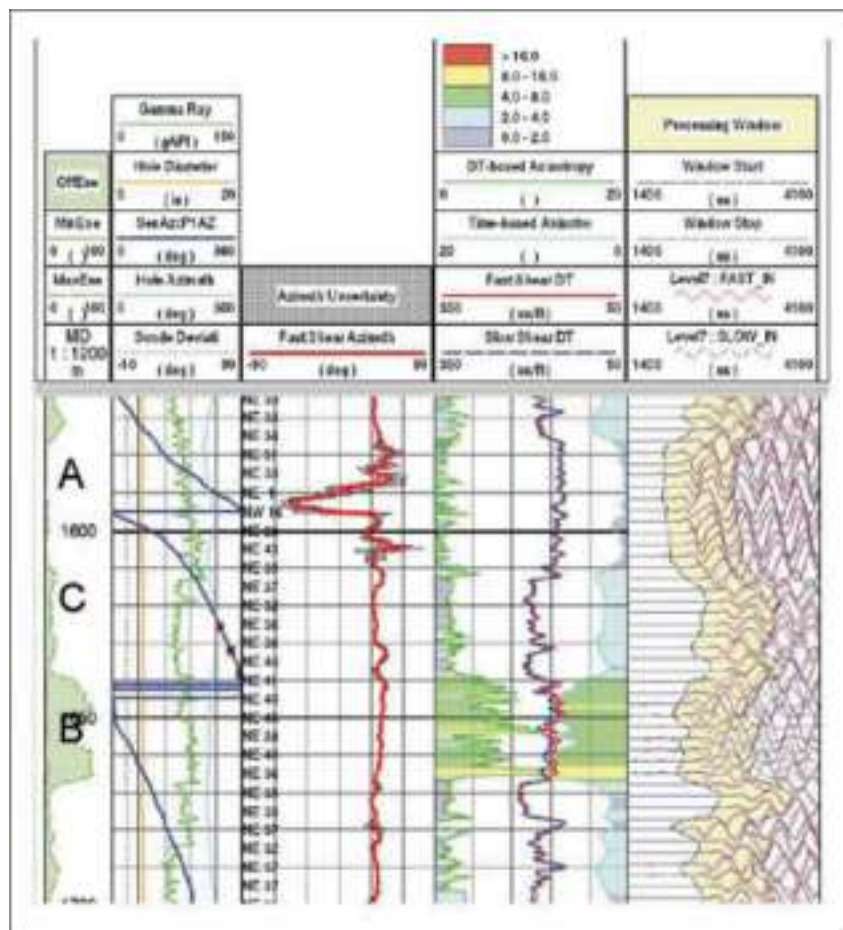


Рис. 1. Запись с месторождения Cuitalhuas, на которой видна зона изотропии (А), зона сильной анизотропии (В), и зона слабой анизотропии (С).

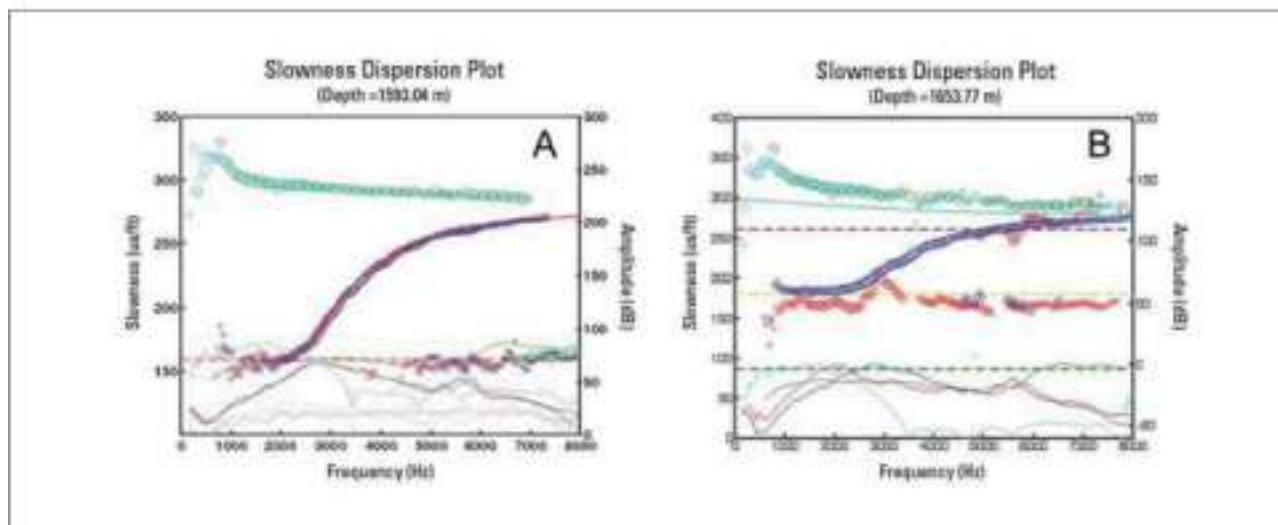


Рис. 2. а) Зона изотропии (Зона А в Рис. 1), с кривыми распределения искривления, наложенными на гомогенную изотропную модель. б) Зона анизотропии, обусловленной давлением – обозначена пересечением диполь-дисперсионных кривых (Зона В).

позволяет получать более точные сейсмические изображения и улучшать корреляцию со скважинными данными. Наконец, в некоторых областях бассейна Burgos может оказаться естественная трещиноватость, которая позволила бы конструировать скважины, не прибегая к гидроразрывам. Эти зоны могут обладать ТН-анизотропией, так что ее измерение поможет их обнаружению.

Из данных, полученных с помощью двух обсуждаемых здесь методов, следует, что зоны анизотропии в этом регионе – пласты толщиной 5-80 м; коэффициент анизотропии – от 1% до 8%.

Физика пород

Поперечные волны распространяются сквозь камни с различной скоростью в разных направлениях. Этот феномен, называемый акустической анизотропией, вызван анизотропной природой эластичных свойств пород. Все осадочные породы в той или иной мере демонстрируют акустическую анизотропию, вызванную упорядоченными трещинами, слоистостью, или неравномерным давлением. В слое с одним преимущественным направлением трещин, горизонтальные сечения трещин обычно совпадают с направлением наибольшего горизонтального напряжения, а направление,

перпендикулярное трещинам, часто данных, могут быть использованы совпадает с направлением наименьшего горизонтального напряжения. измерения поперечной анизотропии с Направление основного напряже-помощью возбуждения двух ния или обилие параллельных перпендикулярно поляризованных вертикальных трещин заставляет поперечных волн на поверхности, и вертикально распространяющиеся измерения их распространения вдоль поперечные волны разделяться на скважины с помощью быстрый компонент, движущийся многокомпонентных сейсмографов. вдоль вектора максимального Дипольные акустические измерения напряжения, или параллельно делаются через каждые 15 см на плоскостях трещин, и медленный частоте около 3 kHz, а сейсмографы компонент, направленный вдоль делаются на 15-метровых интервалах на вектора минимального напряжения частоте около 40 Hz. По сравнению с (Alford, 1986). сейсмоисследованиями, акустические

Приборы для акустического измерения более локализованы. С каротажа методом скрещенных другой стороны, из-за кумулятивного диполей измеряют анизотропию эффекта и того, что сейсмографические поперечных волн в слое. Кроме этих замеры делаются на всем интервале от

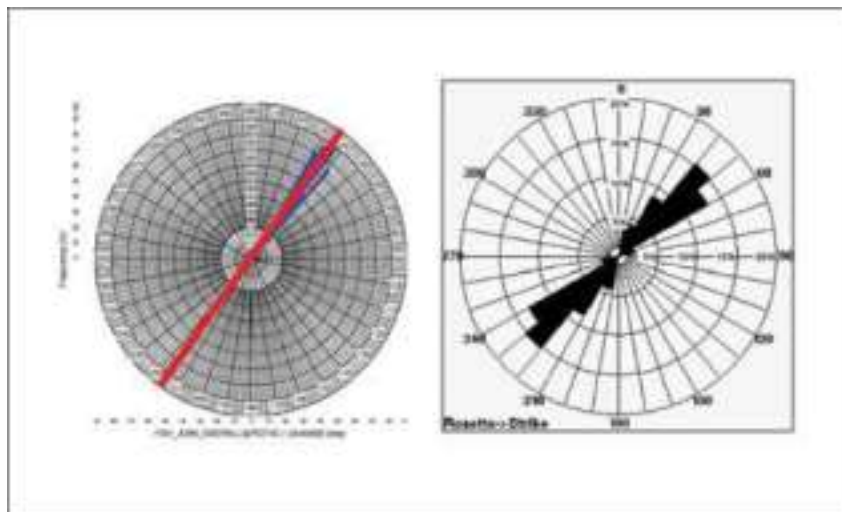


Рис.3. (Слева), азимут быстрых поперечных волн, полученный с помощью метода скрещенных диполей. (Справа), азимут скважинных трещин.

200 и до нескольких тысяч метров, они позволяют измерить очень слабую, но постоянную анизотропию.

Акустический и сейсмический методы измерения

Исследования скважины Pemex в Reynosa (Мексика) показали слабую акустическую анизотропию. Акустический каротаж позволил выявить два различных механизма этого явления, различающиеся по силе и направлению. Наличие анизотропии, обнаруженное акустическим способом, было подтверждено скважинными сейсмометрами.

Использование акустического каротажа позволяет получать данные с высоким разрешением (около 2 м, в зависимости от апертуры группы приемников), но вблизи от ствола скважины (не далее нескольких метров), а поперечный вертикальный сеймопрофиль (S-VSP) обладает худшим вертикальным разрешением (измерения усредняются на нескольких сотнях метров), но данные снимаются с гораздо большего объема. Этот метод лучше подходит для обнаружения слабой анизотропии. S-VSP является хорошим средством апскейлинга результатов акустического каротажа и экстраполяции скважинных измерений на весь резервуар, что делает возможным выводить на основе этих данных свойства всех областей дренирования, и позволяет использовать акустический анализ анизотропии для проведения направленного перфорирования.

При сочетании двух методов, акустический каротаж может быть проведен почти в каждой скважине, подтверждая результаты S-VSP в ключевых скважинах, а затем обозначая напряжения по всей области месторождения.

До недавнего времени кабельные приборы могли измерить силу и направление анизотропии, лишь если анизотропия скорости превышала 5%. Тем не менее, в данном исследовании использовался новый модульный каротажный прибор, соединяющий в себе улучшенную технологию монополярных передатчиков и скрещенных диполей, а также обширную группу приемников, включающую в себя 13 продольных уровней с восемью

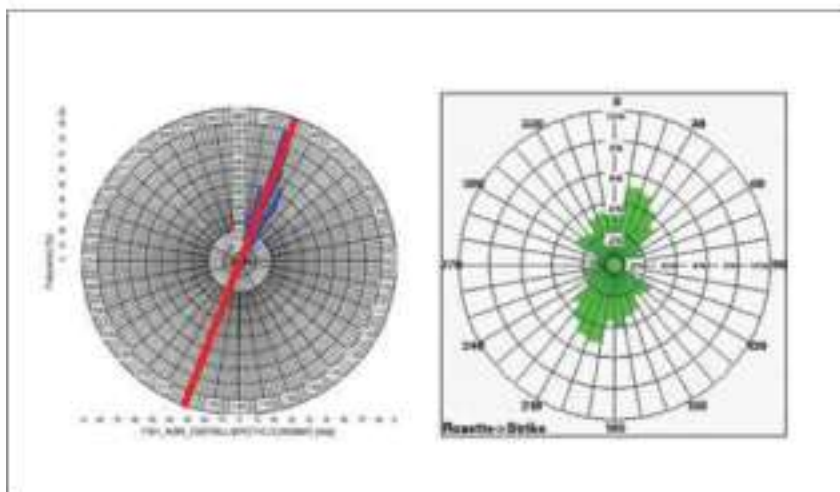


Рис. 4 (Слева), Азимут быстрой поперечной волны. (Справа) азимут простираения слоев. Оба указывают в направлении 20NE.

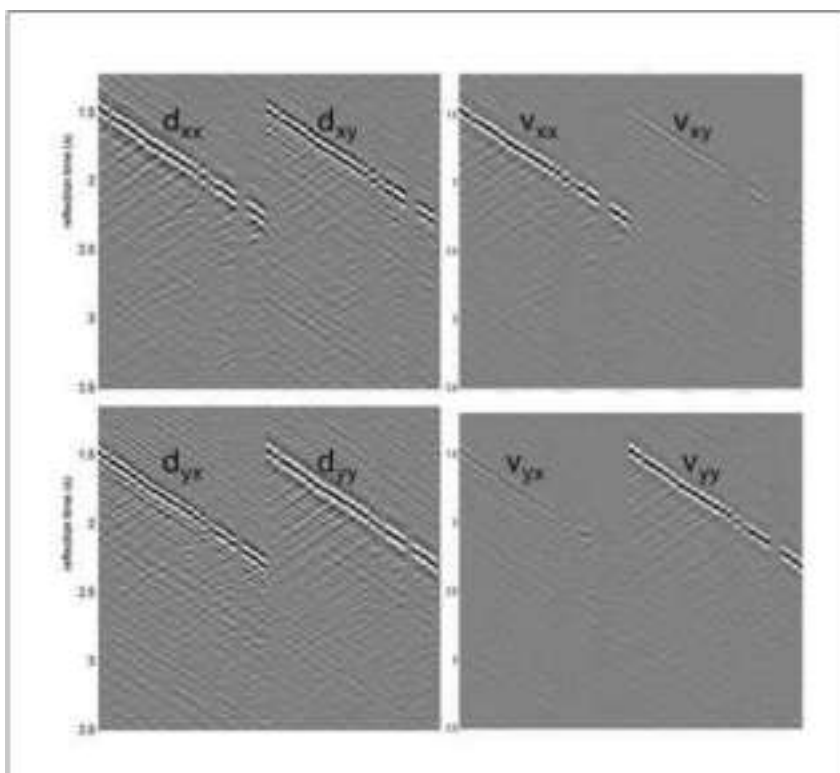


Рис. 5. Слева - необработанные поперечные компоненты полученного волнового поля (матрица D). Справа данные повернуты для выявления минимальных внедиагональных элементов (матрица V).

азимутальными датчиками на нового прибора, различие между каждым уровнем. Каждый приемник изотропными и анизотропными индивидуально оцифрован, что зонами становится чрезвычайно позволяет обрабатывать 104 волны на четким, легко определяемым по одно излучение передатчика, по минимальной и максимальной сравнению с предыдущими энергии поперечного профиля. технологиями значительно увеличивая Рис. 1 демонстрирует точность оценок анизотропии и результаты обработки анизотропии величины, обратной скорости. Это методом Альфорда (Alford, 1986). достигается через улучшенное В первой линии максимальная и разрешение волнового числа на всех минимальная энергия указывает на частотах. В связи с высоким качеством то, что процесс вращения прошел данных, полученных с помощью хорошо по всему интервалу, так как

минимальная энергия профиля близка к нулю. Максимальная энергия профиля указывает на наличие или отсутствие в данных доминирующего направления. Во второй линии видно, что прибор постоянно вращался в вертикальной скважине, а в третьей быстрый поперечный азимут остается постоянным из-за анизотропии пласта, что также подтверждается анизотропией времени и медленности, указанной в четвертой линии. Наблюдаются и различия в силе анизотропии (обратите внимание, что шкала силы - от 0 до 20%, в отличие от стандартного отображения 0-100%), для которых указан стабильный быстрый поперечный азимут в зонах, где анизотропия колеблется между 0 и 8%. Там, где азимут нестабилен (в зоне А), из максимальной поперечной энергии, а также из временной и медленностной анизотропии следует,

что это изотропный пласт. Это заключение подтверждается анализом частотной дисперсии медленности, где видно идеальное наложение быстрых и медленных диполь-дисперсионных кривых. Эти кривые также идеально совпадают при наложении на изотропную модель. (Рис. 2а).

Кривые распределения обладают малым диаметром, что частично вызвано свойствами мелкой породы (267 s/ft), создающей сильное рассеивание. Для нахождения механизма анизотропии был использован анализ частотной дисперсии медленности (Plona et al., 2000). На одном отрезке азимутальная анизотропия вызвана горизонтальными напряжениями, как видно из кривых дисперсии скрещенных диполей (Рис. 2b). Связанная с напряжением природа этой анизотропии была подтверждена анализом каротажной диаграммы, в которой видны разрывы породы, ориентированные в направлении быстрых колебаний, и оба указывают на направление наивысшего напряжения (Рис. 3).

Также были записаны интервалы, где основной причиной анизотропии с азимутом быстрых колебаний 20 NE является слоистость породы. Каротажные диаграммы подтверждают слоистую структуру пластов, где простирание слоев совпадает с азимутом быстрых волн (Рис. 4).

В обычной анизотропной среде уравнения, описывающие распространение эластичных волн, довольно сложны. Тем не менее, для поперечной волны, движущейся вдоль оси симметрии слабоанизотропной среды, Alford (1986) описывает движение матрицей 2×2 :

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{xx} & d_{xy} \\ d_{xy} & d_{yy} \end{bmatrix},$$

d_{xy} обозначает данные, полученные при источнике, поляризованном в направлении x , а приемнике — в направлении y , и т.д., а x и y относятся к двум картезианским координатам, перпендикулярным направлению распространения

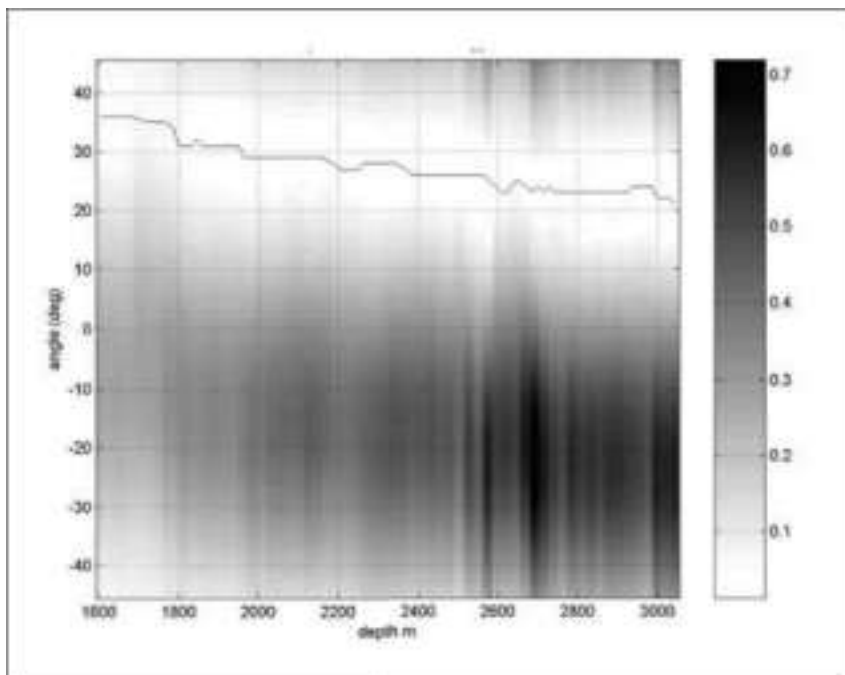


Рис. 6. Энергия E_R внедиагональных элементов как функция угла поворота. Угол равен 0° в направлении на север и увеличивается по часовой стрелке.

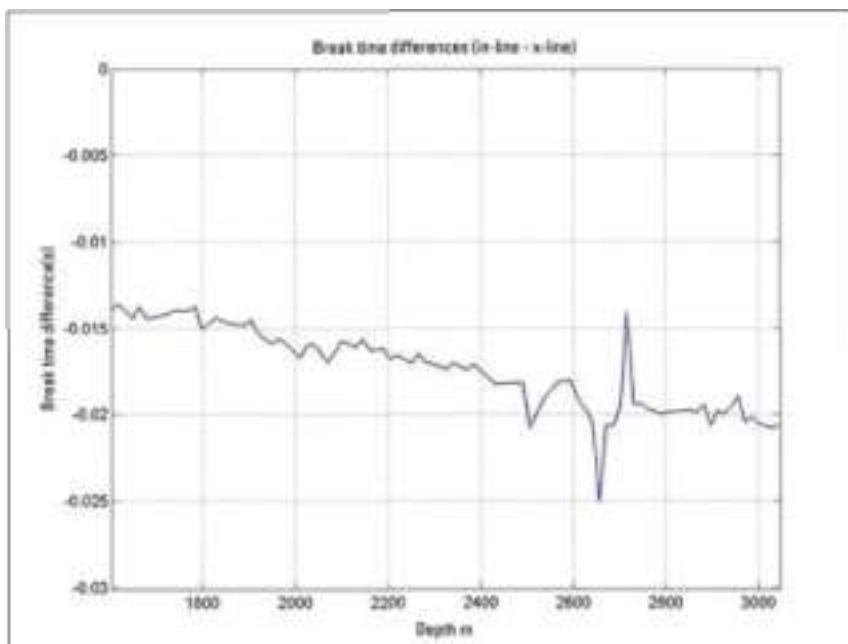


Рис. 7. Разница во времени прохождения повернутых компонентов v_{yy} и v_{xx} .

Если d_{xy} и d_{yx} не равны нулю (т.е., D не диагонально), это условие указывает на азимутальную анизотропию. Alford (1986) описывает, что эти данные могут быть переведены в 'естественную систему координат' с помощью нахождения оператора вращения, диагонализующего данные. Так как матрица данных не может быть полностью диагонализирована, оператор вращения R должен минимизировать внедиагональные элементы; т.о., R (и повернутые данные V)

$$V = R^T D R = \begin{bmatrix} v_{xx} & v_{xy} \\ v_{yx} & v_{yy} \end{bmatrix}$$

так, чтобы $E_R = |v_{xy}|^2 + |v_{yx}|^2$ было минимально.

Энергия E_R во внедиагональных элементах минимальна, когда одна из повернутых осей совпадает с направлением наибольшего или наименьшего напряжения. Это означает, что E_R должна быть отображена в угловом окне $\pm 45^\circ$. Совпадение найденных минимумов

с направлениями наибольшего или наименьшего напряжения должно быть проверено через разницу во времени прохождения двух повернутых волновых полей v_{xy} и v_{yx} .

Сейсмические данные были получены с помощью двух перпендикулярно расположенных рядом со скважиной вибраторов, вызывающих движение частиц в направлениях E-W и N-S, соответственно. В дополнение к источникам поперечных волн были использованы два вертикально поляризованных вибратора для генерации продольных волн; один расположенный рядом с источниками поперечных волн, а другой – около 1600 м к северу.

Рис. 5 показывает как необработанные поперечные компоненты данных (d), так и данные, полученные в результате поворота, с минимальной внедиагональной энергией (v_{ij}).

Отображение E_R энергии внедиагональных элементов повернутых данных, представлено в Рис. 6 как функция угла поворота θ .

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

На Рис. 7 разница во времени прохождения между повернутыми компонентами v_{xy} и v_{yx} указывает на то, что поворот в направлении u происходит быстрее и соответствует направлению наибольшей нагрузки. То, что разница во времени прохождения почти линейно увеличивается с глубиной, указывает на то, что на всем интервале глубины от 1600 до 3000 м присутствует постоянная анизотропия около 5 мс/км (или 1.7 ps/ft), с наибольшим напряжением в направлении NNE-SSW.

Литература

- Alford, R.M. [1986] Shear data in the presence of azimuthal anisotropy. *56th Ann. Internat. Mtg. Soc. of Expl. Geophys.*, Session S9.6.
- Plona, T.J., Sinha, B.K., Kane, M.R., and Vilorio, O. [2000] Using acoustic anisotropy, *41st SPWLA Symposium*, Paper H. Wielemaker, E., Saldungaray, P., San-guinetti, M., Plona, T., Yamamoto, H., Arroyo, J.L., and Mercado Ortiz, M.A. [2005] *SPWLA 2005*.