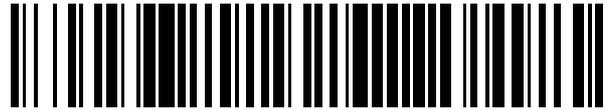


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 451 007**

51 Int. Cl.:

G01V 1/30

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.04.2010 E 10290231 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.01.2014 EP 2253970**

54 Título: **Método para adquirir imágenes de una zona diana del subsuelo a partir de datos de tipo walkaway**

30 Prioridad:

20.05.2009 FR 0902531

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

26.03.2014

73 Titular/es:

**IFP ENERGIES NOUVELLES (100.0%)
1 & 4, Avenue de Bois-Préau
92852 Rueil-Malmaison Cedex, FR**

72 Inventor/es:

**DELPRAT-JANNAUD, FLORENCE;
LAILLY, PATRICK y
METIVIER, LUDOVIC**

74 Agente/Representante:

UNGRÍA LÓPEZ, Javier

ES 2 451 007 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método para adquirir imágenes de una zona diana del subsuelo a partir de datos de tipo walkaway

5 La presente invención se refiere al ámbito de la exploración del subsuelo a partir de datos sísmicos.

La invención se refiere, particularmente, un procesamiento de datos sísmicos, que permite suministrar una imagen de alta resolución del subsuelo. Dicha imagen se utiliza en el ámbito de la exploración y la producción de petróleo, o el ámbito de la vigilancia de sitios geológicos de almacenamiento de CO₂.

10

Estado de la técnica

En la industria petrolífera y para la vigilancia de los sitios de almacenamiento de CO₂, es muy importante disponer de imágenes precisas del subsuelo. La precisión se define en términos de resolución. Cuanto mayor es la resolución, más información contiene la imagen sobre la estructura, e incluso la composición, del subsuelo. Se busca por lo tanto, en estos ámbitos, construir imágenes de «alta resolución» del subsuelo, ya esté considerada como estática (caso de la exploración petrolífera) o dinámica (caso de la monitorización o de la vigilancia de los depósitos subterráneos).

15

20

Para establecer una imagen del subsuelo, se realizan mediciones en éste. Convencionalmente, se utilizan dos grandes tipos de mediciones: mediciones dentro de pozos perforados a través de la formación, y campañas sísmicas. Las primeras permiten definir perfectamente las propiedades del subsuelo, ya sea mediante extracciones de testigos, ya sea mediante diagráfias (mediciones de diferentes propiedades del subsuelo de forma continua a lo largo del pozo) y a continuación interpretaciones de estas diagráfias. La información es precisa, pero muy localizada

25

alrededor del pozo. Por el contrario, los datos sísmicos desempeñan un papel privilegiado al adquirir imágenes de un gran volumen del subsuelo. Pero la información es menos precisa, la resolución es peor.

Sin embargo, se han desarrollado numerosas técnicas para mejorar la precisión de la información obtenida de los datos sísmicos. En particular, los métodos sísmicos de imaginología cuantitativa, que pretenden estimar la distribución de ciertos parámetros en el subsuelo, tales como la impedancia acústica o parámetros vinculados a la impedancia, representan un avance significativo con respecto a la obtención de una imagen sísmica convencional. Por supuesto, la calidad del resultado suministrado por estos métodos es tanto mayor, cuanto mayor sea la resolución de la imagen obtenida directamente de los datos sísmicos.

30

35

Entre estos dos grandes tipos de mediciones, existen métodos de adquisición de datos sísmicos de pozos. Se trata de emitir ondas sísmicas en el subsuelo, y de registrar la respuesta (reflexiones particularmente) del subsuelo por medio de receptores colocados en un pozo.

40

Entre estas técnicas de sísmica de pozos, se conoce el método de adquisición de tipo «balada sísmica» más conocido con el nombre de "walkaway". Esta técnica se describe, por ejemplo, en los documentos:

Mari, J.L., Glangeaud F., Coppens F., 1997, "Traitement du signal pour géologues et géophysiciens", ediciones Technip y

45

DELPRAT-JANNAUD, F, LALLY, P., 2005, "A fundamental limitation for the reconstruction of of impedance profiles from seismic data".

Tal como ilustra la figura 1, un «walkaway» consiste en realizar una adquisición de datos sísmicos disponiendo fuentes sísmicas (S_1, S_2, \dots, S_P) en superficie, generalmente de forma rectilínea pasando por el pozo, y disponer receptores sísmicos (R_1, R_2, \dots, R_n) en el pozo, a diferentes profundidades. En esta figura, x representa una dirección geográfica, y z representa la profundidad.

50

La figura 4 representa datos típicos obtenidos de este tipo de adquisición. Estos datos hacen aparecer un tren de ondas descendentes constituido por numerosas entradas: la primera entrada no domina realmente el conjunto de las siguientes (llamadas «entradas secundarias»). Esta observación suministra la línea directriz del tratamiento estándar de datos sísmicos de pozos: se basa en una separación de los datos en ondas ascendentes y ondas descendentes, seguida de una deconvolución de la primera por la segunda.

55

Sin embargo, este enfoque se basa en una visión en 1D de la propagación de las ondas, lo que no es verdaderamente realista, sobre todo para datos donde la fuente no está en vertical con respecto al pozo.

60

En cuanto se realiza la propagación de las ondas siguiendo direcciones diferentes de la vertical, una estimación de la distribución de velocidad es esencial para realizar el procesamiento. En la hipótesis en la que la tierra se considera como un medio en 1D, se ha propuesto extensiones al procesamiento presentado anteriormente: estas extensiones se basan en la aplicación de correcciones dinámicas (correcciones de desvío, alias NMO).

65

Pero este concepto no permite tener en cuenta los acontecimientos sísmicos generados por las entradas secundarias. En efecto, la corrección a aplicar a estos acontecimientos no tiene nada de intrínseca y depende del acontecimiento. Si no hay entradas secundarias y, de forma más general no hay reflexiones múltiples, hipótesis poco realista, la imaginología de los datos sísmicos de pozos podría realizarse mediante una simple migración de los registros, habiéndose estimado previamente la distribución de velocidad. De este modo se obtendría, a poco que se hayan tomado ciertas precauciones, una estimación de la reflectividad (cantidad vinculada a la impedancia) del subsuelo. Sin embargo, la iluminación particular del medio (vinculada a un dispositivo de adquisición localizado en un pozo) hace que el resultado esté contaminado con distorsiones, tal como ilustra la figura 11, mientras que el modelo del subsuelo buscado, ilustrado en la figura 3, es casi en 1D.

El siguiente documento presenta las técnicas conocidas de procesamiento de datos de sísmicos de pozos: Bob A. Hardage, Collection Handbook of geophysical exploration, Geophysical Press, 1985.

De este modo, las técnicas anteriores tienen difícil conciliar que se tengan en cuenta las reflexiones múltiples y la propagación multidimensional, y *a fortiori*, en medios diferentes de los medios en 1D. Por otro lado, estas técnicas de imaginología utilizan procesos lineales (deconvolución o migración), que tienen la consecuencia de limitar la resolución de las imágenes sísmicas a la banda de frecuencia de la sísmica (del orden de $\lambda/2$ si λ es la longitud de onda sísmica).

El objeto de la presente invención es un método para construir una imagen del subsuelo teniendo en cuenta, tanto las reflexiones múltiples como el carácter multidimensional de la propagación. Además, mediante la utilización de una técnica de imaginología no lineal, la invención permite mejorar sensiblemente la resolución vertical, y particularmente ir mucho más allá de la banda de frecuencia de la sísmica (de $\lambda/2$ a $\lambda/10$ en función de la heterogeneidad de los sedimentos).

Método de acuerdo con la invención

El objeto de la invención se refiere a un método para construir una imagen representativa de una distribución de impedancias acústicas en una zona del subsuelo, por medio de mediciones sísmicas adquiridas de acuerdo con una configuración de tipo «walkaway» que comprende una emisión de ondas sísmicas desde la superficie al subsuelo y la recepción por receptores situados a diferentes profundidades en al menos un pozo. El método requiere también una estimación del campo de velocidad de propagación de ondas sísmicas en el subsuelo. El método comprende las siguientes etapas:

- se seleccionan p ángulos de iluminación, correspondiendo cada ángulo de iluminación a una dirección de propagación de un frente de onda a nivel de un límite superior de dicha zona;
- se organizan dichas mediciones sísmicas, en datos D_p organizados por ángulo de iluminación p ;
- se determina, en el interior de dicha zona, dicha distribución de impedancias acústicas por medio de una inversión, durante la cual se minimiza una diferencia entre dichos datos organizados D_p obtenidos de dichas mediciones sísmicas, y de datos obtenidos de una estimación por resolución de una ecuación de propagación de las ondas a partir de dicho campo de velocidades, de una distribución de impedancia acústica, y de una distribución de presión a nivel de dicho límite superior de la zona para cada ángulo de iluminación.

Para minimizar la diferencia, puede tenerse en cuenta una información a priori definida por una dirección de buzamiento concerniente a una estructuración de la distribución de impedancia acústica, y una dirección de buzamiento concerniente a una estructuración de la distribución de presión. Para hacer esto, puede minimizarse una funcional de mínimos cuadrados que comprende: un primer término que mide dicha diferencia, un segundo término correspondiente a una derivada direccional concerniente a la estructuración de la distribución de impedancia acústica y ponderado por un peso ε_i , y un tercer término correspondiente a una derivada direccional concerniente a la estructuración de la distribución de presión y ponderado por un peso $\varepsilon_{B,p}$. Los pesos pueden determinarse mediante una técnica de ensayos-errores. También pueden aplicarse las siguientes reglas:

- un resultado que presenta residuos correlacionados demasiado fuertes, expresa un valor demasiado fuerte de al menos uno de los dos tipos de peso;
- un resultado que presenta una distribución de impedancia acústica con variaciones laterales anormalmente débiles, expresa un valor demasiado fuerte asignado al peso ε_i .

De acuerdo con la invención, puede añadirse un término a la funcional, para tener en cuenta una información a priori determinada a nivel de al menos un pozo perforado a través de la zona.

Para organizar los datos sísmicos en datos por ángulo de iluminación, puede utilizarse una transformada de Radon.

De acuerdo con la invención, puede interpretarse la imagen en términos litológicos y/o petrofísicos, para vigilar un sitio de almacenamiento geológico de gases ácidos, o para localizar y evaluar depósitos de petróleo. También puede utilizarse la imagen como complemento de otras diagráfias para caracterizar la zona.

- 5 Otras características y ventajas del método de acuerdo con la invención, aparecerán con la lectura de la siguiente descripción de ejemplos no limitantes de realizaciones, haciendo referencia a las figuras adjuntas y descritas a continuación.

Presentación de las figuras

- 10 - La figura 1 ilustra la configuración de adquisición de tipo “walkaway”.
- La figura 2 representa una distribución de velocidad de las ondas en el subsuelo, de acuerdo con una dirección X y la profundidad Z.
- 15 - La figura 3 representa una distribución de impedancia acústica en el subsuelo, de acuerdo con una dirección X y la profundidad Z.
- La figura 4 representa tres colecciones de punto de tiro (asociadas a fuentes localizadas en $x = -315$, $x = 0$ y $x = +315$ m) extraídas de los datos “walkaway”.
- 20 - La figura 5 representa, para ángulos de iluminación de -10° , 0° y 10° , el resultado de la transformada de Radon (“slant stack”) de las colecciones de puntos de tiro que componen los datos “walkaway” de la figura 4.
- 25 - La figura 6 muestra la distribución de impedancia reconstruida.
- La figura 7 compara tres perfiles de impedancia (I) extraídos de las figuras 3 y 6 para $x = 0$, $x = 40$ y $x = 200$ m.
- La figura 8 muestra los residuos asociados a ángulos de iluminación de -10° , 0° y 10° .
- 30 - La figura 9 muestra las condiciones en los límites reconstruidas para ángulos de iluminación de -10° , 0° y 10° .
- La figura 10 compara los módulos de las transformadas de Fourier de las partes profundas (es decir para z que varía entre 2000 m y 3400 m) de los perfiles de impedancia representados en la figura 7 y huellas correspondientes de la sección migrada.
- 35 - La figura 11 muestra el resultado obtenido por migración en profundidad antes de la suma de los datos.

Descripción detallada del método

40 Por razones de calidad, el método se describe en un contexto en 2D, siendo la generalización a tres dimensiones inmediata.

45 Se llama «diana», a la parte del subsuelo que se desea caracterizar mediante una imagen de alta resolución, por medio de una adquisición de datos sísmicos de tipo «walkaway» (figura 1).

50 Sea una diana bidimensional caracterizada por las distribuciones de impedancia y de velocidad representadas respectivamente en las figuras 2 y 3. El método pretende reconstruir la distribución de impedancia acústica mediante una imagen de alta resolución, a partir de datos de tipo “walkaway”, y de una estimación de la distribución de velocidad de propagación de las ondas P en el subsuelo.

55 La figura 1 muestra una configuración de adquisición de tipo “walkaway”. De acuerdo con un ejemplo de realización, se utilizan cien receptores (R_1, \dots) dispuestos en el pozo (supuesto vertical de acuerdo con el ejemplo y representado por una línea vertical discontinua en la figura 1) cada ocho metros, entre las profundidades 1000 m y 1800 m. La profundidad se indica como z , ésta se expresa en metros. El método se presenta en el caso de un pozo vertical pero puede adaptarse sin dificultad al caso de pozos desviados, o al caso de múltiples pozos. Se utilizan quince fuentes (S_1, \dots), dispuestas en las inmediaciones de la superficie, y separadas 45 m. Estas fuentes cubren, de forma simétrica con respecto al pozo, un intervalo de 630 m de ancho. El límite superior de la diana, se denomina el «techo». El techo de la diana, representado en línea discontinua en la figura 1, está definido por el usuario del método, pero debe pasar por, o en las inmediaciones de, el receptor menos profundo (receptor R_1 en la figura 1). De este modo, la profundidad del receptor menos profundo, R_1 , define la superficie por debajo de la cual el método construye una imagen del subsuelo, que representa la distribución de las impedancias acústicas. Por el contrario, el techo no es necesariamente horizontal, ni si quiera plano. La diana se detiene a una profundidad que depende, entre otras cosas, de la duración de las huellas sísmicas registradas. De este modo, el subsuelo engloba no solamente la

60

65 diana, sino también los terrenos situados por encima.

La figura 4 representa tres colecciones de punto de tiro (asociadas a fuentes localizadas en $x = -315$, $x = 0$ y $x = +315$ m) extraídas de los datos “walkaway”. La medición es, en este caso, la componente vertical de la velocidad de desplazamiento medida en cada sensor. Estos datos se han calculado mediante resolución numérica de la ecuación de las ondas acústicas en 2D. Para ilustrar el método, la distribución de velocidad utilizada es la de la diana, es decir la ilustrada en la figura 2. La ondícula sísmica utilizada para esta modelización es una señal de Ricker (segunda derivada de una gaussiana centrada en 25 Hz).

De este modo, a partir de la distribución de velocidad de propagación de las ondas P en el subsuelo estimada previamente, y de los datos de tipo “walkaway” adquiridos, el método pretende reconstruir una distribución de impedancia acústica.

Problema directo

Para determinar esta imagen de alta resolución, el método comprende una búsqueda simultánea de la distribución de impedancia en el interior de la diana y de las excitaciones sísmicas por ángulo de iluminación. Esta búsqueda se realiza mediante resolución de un problema inverso. Antes de describir el problema inverso, se describe el problema directo que le está asociado.

Se considera la ecuación de las ondas acústicas que describe, a partir de condiciones iniciales nulas, la evolución, partiendo de un estado inicial donde el medio está en reposo, del campo de presión en función del tiempo en el interior de la diana. Siendo el campo de velocidad conocido, este campo de presión $P(x,z,t)$ se describe completamente una vez especificadas:

- la distribución de impedancia acústica $I(x,z)$;
- la condición en los límites en el techo de la diana. De acuerdo con un ejemplo de realización, se utiliza una condición en los límites de tipo Dirichlet, el valor de la presión en el techo de la diana en función de la coordenada lateral x y del tiempo t . Se indica esta condición en los límites $B(x,t)$. Esta condición en los límites caracteriza la iluminación de la diana.

De forma precisa, P es la solución de la ecuación de las ondas que se escribe ($c(x,z)$ designa la distribución de velocidad de propagación):

$$\frac{1}{Ic} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \nabla \left(\frac{c}{I} \bar{\nabla} P \right) = 0 \text{ en la diana y para } t \geq 0$$

con la condición en los límites: $P = B(x, t)$ en el techo de la diana
y las condiciones iniciales: $P = 0$ para $t \leq 0$

Esta ecuación de las ondas acústicas corresponde a la ecuación de evolución en el tiempo (en oposición a la escritura en el ámbito de las frecuencias temporales que conducen a la ecuación de Helmholtz) y, además, en su forma más sencilla, particularmente sin tener en cuenta la atenuación. Las modificaciones en la escritura de la ecuación de las ondas solamente requieren la adaptación del método numérico utilizado para su resolución (y para el cálculo del gradiente de la funcional de los mínimos cuadrados si se utiliza un método de optimización basado en este cálculo).

El hecho de que el campo de presión en el interior de la diana esté completamente determinado, una vez especificadas la distribución de impedancia y la condición en los límites en el techo de la diana, permite considerar el campo de presión en el interior de la diana como una función de $I(x, z)$ y de $B(x,t)$, y lleva a introducir el siguiente operador de modelización F :

$$F : (I(x, z), B(x, t)) \rightarrow P(x, z, t)$$

Se observa que el operador F es no lineal en la distribución de impedancia. Por consiguiente, para una condición en los límites dada, la respuesta sísmica a la suma de dos distribuciones de impedancia no es la suma de las respuestas sísmicas asociadas a cada distribución de impedancia. En la práctica, se necesita evaluar, para pares $(I(x,z), B(x,t))$ de datos, la imagen mediante F de estos pares: esta operación se realiza mediante resolución numérica de la ecuación de las ondas, mediante el método de las diferencias finitas (por ejemplo K. R. Kelly, et al., 1976, “Synthetic seismograms: a finite - difference approach”, Geophysics, 41, 2), o el método de los elementos finitos (por ejemplo Kurt J. Marfurt, 1984, “Accuracy of finite - difference and finite - element modeling of the scalar and elastic wave equations”, Geophysics, 49, 533).

Problema inverso

Considerando en adelante el problema inverso asociado:

5 Gracias a los datos de tipo “walkaway”, se dispone de mediciones vinculadas al campo de presión en la diana. De acuerdo con un ejemplo, se utilizan los componentes $u^x(t)$ y $u^z(t)$ de la velocidad de desplazamiento generada por el campo de presión. Estas velocidades se miden directamente si se utilizan geófonos como receptores. También podría utilizarse una medición que se refiere a una derivada o una integral en tiempo de estas cantidades (por ejemplo aceleración o bien el propio desplazamiento). También podría utilizarse directamente la presión medida en el sensor, si este último es un hidrófono.

Se indica mediante D_p el vector de datos para cada ángulo de iluminación p . Sea O el operador de observación, es decir el operador que, en el campo de presión en el interior de la diana $P(x,z,t)$, asocia las mediciones D_p . Pueden utilizarse, por ejemplo, las ecuaciones de Euler para este operador O :

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} - \frac{c}{I} \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

15

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} - \frac{c}{I} \frac{\partial p}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} - \frac{c}{I} \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{c}{I} \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$

20 El problema inverso consiste en determinar la distribución de impedancia acústica $I(x,z)$ y las diferentes condiciones en los límites $B_p(x,t)$, a partir de la colección de los diferentes D_p .

El método comprende principalmente las siguientes etapas:

- 25 1. Construcción de colección de datos D_p para cada ángulo de iluminación
 - a. selección de una serie de ángulos de iluminación de la diana;
 - 30 b. transformación de las colecciones de punto de tiro en datos por ángulo de iluminación;
2. Determinación de una información a priori concerniente al buzamiento de los depósitos en el interior de la diana;
- 35 3. Búsqueda simultánea de $I(x,z)$ en el interior de la diana y de las diferentes condiciones en los límites $B_p(x,t)$ por ángulo de iluminación;

Etapas 1: Construcción de colección de datos D_p para cada ángulo de iluminación

a. Selección de una serie de ángulos de iluminación de la diana

40

Se denomina «ángulo de iluminación», a la dirección de propagación de un frente de onda en el techo de la diana. En dos dimensiones, esta dirección está definida por el ángulo establecido con la vertical. En tres dimensiones, “el ángulo de iluminación” está definido por una pendiente (el ángulo establecido con la vertical) y un azimut.

45 Para conservar la misma cantidad de información durante la siguiente etapa de transformación de las colecciones de punto de tiro en colecciones por clase de ángulo de iluminación, se seleccionan tantos ángulos como puntos de tiro (pero esta elección no es esencial). De acuerdo con un ejemplo, los ángulos seleccionados cubren el intervalo -10° , $+10^\circ$. Revelando la interpretación de la sísmica de superficie una estructura casi 1 D, es natural seleccionar ángulos de iluminación centrados en 0° .

50

b. Transformación de las colecciones de punto de tiro en datos por ángulo de iluminación

Para cada uno de los ángulos de iluminación seleccionados, se transforman las colecciones de punto de tiro en datos por ángulo de iluminación.

55

Las colecciones de punto de tiro son los datos brutos obtenidos de la adquisición de tipo «walkaway». Se trata de una organización de los datos bien conocida por los especialistas.

Estos datos por ángulo de iluminación, denominados D_p , se definen como la respuesta sísmica de la diana a una excitación sísmica por ángulo de iluminación, correspondiente a un campo de onda que, visto a nivel del (de los) receptor(es) menos profundo(s), estaría constituido por una sucesión de frentes de ondas correspondientes aproximadamente al ángulo de iluminación especificado.

5 La idea de base es realizar una transformada de Radon en las colecciones de punto de tiro (técnica denominada "slant stack"). Dicha técnica se describe, por ejemplo, en los siguientes documentos:

10 L. Lu y G. F. Gardner, 1991, "Slant-Stack Processing", SEG Books, 1

J.F. Claibout, 1985, "Imaging the earth's interior", Blackwell scientific publications

15 Esta técnica pretende transformar la respuesta sísmica medida en un sensor para diferentes posiciones de la fuente sísmica, en la respuesta a una excitación de onda plana que se propaga desde la superficie siguiendo una dirección dada. Esta técnica se ha empleado para obtener las colecciones por ángulo representadas en la figura 5. La figura 5 representa, para ángulos de iluminación de -10° , 0° y 10° , el resultado de la transformada de Radon ("slant stack") de las colecciones de puntos de tiro que componen los datos "walkaway".

20 En este caso, el ángulo de iluminación es en general diferente del ángulo definido para la realización del "slant stack", pero la relación entre uno y otro puede calcularse por ejemplo mediante un trazado de rayos por onda plana. En el caso de importantes variaciones laterales de velocidad de propagación en el medio por encima de la diana, la onda plana enviada en superficie puede estar notablemente deformada durante su llegada al techo de la diana. En este caso, es preferible utilizar un enfoque más refinado, tal como la técnica de iluminación controlada descrita en el siguiente documento:

25 W. E. A. Rietveld y A. J. Berkhout, 1994, "Prestack depth migration by means of controlled illumination", Geophysics, 59, 801

30 **Etapa 2: Determinación de una información a priori concerniente al buzamiento de los depósitos en el interior de la diana**

35 Esta información es suministrada mediante una interpretación (picado sísmico) en la sísmica de superficie, de los acontecimientos sísmicos correspondientes a las capas sedimentarias que constituyen la diana. De acuerdo con un ejemplo, se considera como modelo a priori un modelo estratificado horizontalmente. Se recuerda, para la extensión al caso en 3D, que en 3D un buzamiento está definido por una pendiente y un azimut. Estas informaciones sobre los buzamientos caracterizan:

- la estructuración litológica de la distribución de impedancia acústica; y
- 40 - la estructuración de las diferentes condiciones en los límites.

Se considera que estas funciones (impedancia o condiciones en los límites) varían suavemente siguiendo direcciones que pueden predecirse por adelantado (y que, para las condiciones en los límites, dependen del ángulo de iluminación p).

45 De este modo, se define una dirección de buzamiento concerniente a la estructuración de la distribución de impedancia (nótese que esta dirección puede depender del punto es decir del par (x,z) considerado), y se define una dirección de buzamiento concerniente a la estructuración de la condición en los límites (nótese que la dirección puede depender del punto es decir del par (x,t) considerado).

50 **Etapa 3: Búsqueda simultánea de la distribución de impedancia $I(x,z)$ en el interior de la diana y de las condiciones en los límites $B_p(x,t)$ por ángulo de iluminación;**

55 Se busca simultáneamente la distribución de impedancia $I(x,z)$ (o cualquier otro parámetro vinculado a la impedancia) en el interior de la diana, y las diferentes condiciones en los límites $B_p(x,t)$ por ángulo de iluminación (excitaciones sísmicas).

60 Esta búsqueda se realiza minimizando, en el conjunto de los ángulos de iluminación considerados, la diferencia entre los datos por ángulo de iluminación D_p , y la respuesta sísmica de la diana. Esta respuesta sísmica está considerada como función de esta distribución de impedancia $I(x,z)$ y de la condición en los límites $B_p(x,t)$ para el ángulo de iluminación p considerado:

$$O \circ F(I(x, z), B_p(x, t))$$

De este modo, D_p corresponde a los datos sísmicos medidos, y $O^{\circ}F(I(x,z),B_p(x,t))$ corresponde a estos datos calculados en función de las incógnitas $I(x,z)$ y $B_p(x,t)$.

5 Esta minimización se realiza teniendo en cuenta la información a priori disponible (etapa 2), concerniente a $I(x,z)$ y $B_p(x,t)$. Puede cuantificarse la diferencia con respecto a estas informaciones a priori, siguiendo una técnica de evaluación de la norma L^2 de derivadas direccionales que se refieren a las funciones concernidas: $I(x,z)$ o $B_p(x,t)$.

10 Se busca, por lo tanto, la distribución de impedancia acústica $I(x,z)$ y las condiciones en los límites $B_p(x,t)$ asociadas a los diferentes ángulos de iluminación que explican mejor los datos D_p al tiempo que cumplen las informaciones a priori.

Para hacer esto, pueden buscarse esas cantidades que consiguen el mínimo de la funcional de los mínimos cuadrados:

$$J(I, \{B_p\}) = \sum_p \|D_p - O \circ F(I, B_p)\|_{D,p}^2 + \varepsilon_I \|\partial_I I\|^2 + \sum_p \varepsilon_{B,p} \|\partial_p B_p\|_{B,p}^2$$

15 donde:

- $\{B_p\}$ designa el conjunto de las condiciones en los límites que se pretende encontrar para cada ángulo de iluminación p ;
- 20 - $\| \cdot \|_{D,p}$ designa la norma en el espacio de los datos para el ángulo de iluminación p ;
- $\| \cdot \|$ designa la norma de tipo L^2 eventualmente ponderada (o euclidiana si interesan cantidades discretas) en el espacio de las funciones definidas en la zona diana
- 25 - el símbolo ∂_I designa la derivada direccional seleccionada durante la especificación de la información a priori concerniente a la estructuración de la distribución de impedancia (nótese que la dirección puede depender del punto es decir del par (x,z) considerado);
- $\| \cdot \|_{B,p}$ designa la norma de tipo L^2 eventualmente ponderada (o euclidiana si interesan cantidades discretas) en el espacio de las funciones de x y de t donde están definidas las condiciones en los límites para el ángulo de iluminación p ;
- 30 - el símbolo ∂_p designa la derivada direccional seleccionada durante la especificación de la información a priori concerniente a la estructuración de la condición en los límites (nótese que la dirección puede depender del punto es decir del par (x,t) considerado);
- 35 - ε_I designa un peso de regularización que expresa la confianza que se asigna a la información a priori concerniente a la estructuración de la distribución de impedancia
- 40 - $\varepsilon_{B,p}$ designa un peso de regularización que expresa la confianza que se asigna a la información a priori concerniente a la estructuración de la condición en los límites.

La búsqueda de este mínimo puede realizarse utilizando las técnicas clásicas de la optimización, tal como se describen, por ejemplo, en el siguiente documento:

45

J. Nocedal y S. J. Wright, 1999, "Numerical Optimization", Springer

A modo de ejemplo, puede determinarse el mínimo de la funcional de mínimos cuadrados mediante los métodos de optimización llamados métodos de descenso: estos métodos iterativos construyen una serie de "pares" $(I, \{B_p\})$ haciendo decrecer el valor de la funcional, realizándose la construcción de la iteración siguiente aprovechando el gradiente de la funcional con la iteración considerada.

50

Concerniendo a la elección de los pesos de regularización ε_I y $\varepsilon_{B,p}$, ésta puede realizarse mediante ensayo-error, guiado por la siguiente regla: el objetivo es obtener *in fine* una distribución de impedancia conforme a las expectativas del sedimentólogo, y residuos (es decir la diferencia $D_p - O^{\circ}F(I, B_p)$) razonables desde el punto de vista del geofísico.

55

En el ejemplo presentado, aplicando el método de acuerdo con la invención con valores idénticos de $\varepsilon_{B,p}$ para los diferentes p , puede obtenerse la distribución de impedancia representada en la figura 6. Ésta muestra una estructura conforme a las especificaciones, al tiempo que se muestran variaciones laterales realistas.

60

La figura 8 muestra los residuos asociados a ángulos de iluminación de -10° , 0° y 10° . La ganancia aplicada para la representación gráfica es la misma que la utilizada para la figura 5.

5 La figura 9 muestra las condiciones en los límites reconstruidas para ángulos de iluminación de -10° , 0° y 10° . Estas condiciones en los límites cumplen bien la condición de regularidad dependiente del ángulo de iluminación. Los numerosos desacuerdos entre el resultado y la condición de regularidad integrada en la funcional de mínimos cuadrados ilustran la robustez del método a poco que los pesos de regularización hayan sido seleccionados correctamente.

10 Los residuos ilustrados en la figura 8 parecen despreciables, a pesar de las divergencias no despreciables con respecto a la información a priori especificada concerniente a las condiciones en los límites reconstruidas (figura 9): los valores seleccionados para los dos tipos de peso gestionaron convenientemente los conflictos entre las diferentes informaciones manipuladas (datos sísmicos por ángulo de iluminación, información a priori sobre la estructuración de la distribución de impedancia, información a priori sobre la estructuración de las condiciones en los límites).

Para llegar al objetivo previsto, y corregir una mala estimación de los valores a asignar a los pesos, pueden aplicarse las siguientes reglas:

- 20 - un resultado que presenta residuos correlacionados demasiado fuertes, expresa un valor demasiado fuerte de al menos uno de los dos tipos de peso;
- un resultado que presenta una distribución de impedancia con variaciones laterales anormalmente reducidas, expresa un valor demasiado fuerte asignado al peso ε_i .

25 Otras informaciones, tales como diagráfias y el conocimiento sedimentológico, pueden tenerse en cuenta como información a priori. Estos datos pueden ser utilizados por términos adicionales integrados en la funcional de mínimos cuadrados, mediante un parametrizaje apropiado, de las limitaciones que permiten limitar el espacio de las distribuciones de impedancia,...

30 Pueden preverse otras técnicas para integrar la información a priori. Por ejemplo, pueden limitarse las cantidades buscadas (distribución de impedancias y condiciones en los límites) a cumplir la información a priori, por medio de un parametrizaje que solamente permite distribuciones conformes a la información a priori.

35 Variantes

De acuerdo con una realización, se utilizan otras condiciones en los límites diferentes de las de Dirichlet en el techo del depósito.

40 Puede especificarse por ejemplo el tren de ondas descendentes mediante condiciones en los límites "absorbentes" no homogéneas del tipo $\frac{1}{c} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial z} = B_0(x, t)$, o, más exactamente, la versión extendida en el caso de una impedancia que se hizo heterogénea debido a la heterogeneidad de la densidad tal como se explica en el siguiente documento:

45 B. Chalindar, 1988, «Conditions aux limites absorbantes appliquées à des problèmes hyperboliques intervenant en sismique», Tesis, Universidad de Saint Etienne.

Una condición de este tipo debe, de hecho, adaptarse en función del ángulo de iluminación y de la pendiente local del techo de la diana.

50 También pueden utilizarse condiciones en los límites absorbentes de orden superior, tal como se describe en

Robert W. Clayton y Björn Engquist, 1980, «Absorbing boundary conditions for wave - equation migration», Geophysics, 45, 895

55 La utilización de otras condiciones en los límites solamente requiere la adaptación del método numérico utilizado para resolver la ecuación de las ondas (y para el cálculo del gradiente de la funcional de mínimos cuadrados si se utiliza un método de optimización basado en este cálculo).

60 De acuerdo con otra realización, se utilizan iluminaciones mediante campos de ondas constituidos por frentes de onda no planos. La presentación se ha basado en suponer una iluminación por frentes de ondas aproximadamente planos (etapa b de la etapa 1: datos por ángulo de iluminación). Esta estrategia tiene la ventaja de la sencillez tanto en la presentación como en la ejecución. Pero esta elección no es, de ninguna manera, limitante: el punto importante

es poder predecir la forma de los frentes de ondas que iluminan la diana y poder tener en cuenta esta información a priori.

5 Finalmente, de acuerdo con otra realización, el método se utiliza para la estimación de la distribución de impedancias S (y ya no de impedancia P), la distribución de velocidad de propagación de las ondas S que haya sido estimada previamente. La transposición del método con esta finalidad es inmediata en cuando se dispone de una fuente sísmica que excita el modo SH (lo que requiere colocar la fuente en un medio sólido, en oposición a las fuentes utilizadas en sísmica marina). En efecto el campo de desplazamiento (o de velocidad de desplazamiento) transversal es también solución de la ecuación de las ondas en la que aparece la velocidad de propagación de las ondas S y la impedancia S.

Ventajas

15 El método de acuerdo con la invención suministra una imagen de la zona diana del subsuelo, que representa la distribución de impedancia estimada (figura 6). Este resultado es, a la vez, de alta resolución y cuantitativo. La resolución vertical de la distribución de impedancia obtenida suministra en efecto informaciones muy detalladas sobre la distribución buscada (figura 7). Esta resolución vertical es ampliamente superior a la de los métodos clásicos, tales como la migración de los datos presentada en la figura 11. La figura 11 muestra el resultado obtenido por migración de profundidad antes de la suma de los datos. La imagen está contaminada por distorsiones (curvatura de las capas, acontecimientos procedentes de la imaginología de las reflexiones múltiples) y muestra una resolución vertical muy ampliamente inferior al resultado de la figura 6.

La resolución vertical suministrada por el método depende de la gama de profundidades consideradas:

- 25 - en las inmediaciones del intervalo de profundidad cubierto por los receptores, la resolución está esencialmente gobernada por la distancia que separa dos receptores consecutivos;
- por debajo, se pierden, como es habitual en sísmica de reflexión, los componentes de muy baja frecuencia de la distribución de impedancia pero la resolución vertical, incluso aunque sea peor que más arriba, sigue siendo excepcionalmente buena y ampliamente mejor que la suministrada por los métodos tradicionales. En esta parte profunda, la ganancia de resolución se explica por el carácter no lineal de la inversión realizada (mientras que las técnicas de imaginología clásicas son lineales). El operador de modelización F es, en efecto, no lineal, y esta particularidad le hace apto para modelizar las difracciones / reflexiones múltiples. En el caso de depósitos de fuerte heterogeneidad vertical, como es generalmente el caso para los terrenos sedimentarios, los efectos de difracciones / reflexiones múltiples son importantes y tenerlos en cuenta permite ganar en resolución vertical y particularmente salir de la limitación a la banda de las frecuencias sísmicas inherente a los métodos convencionales. La ganancia de resolución vertical se ilustra en la figura 10 (la resolución es caracterizada por el ancho de banda del espectro de amplitud). La figura 10 compara los módulos de las transformadas de Fourier de las partes profundas (es decir para z variando entre 2000 m y 3400 m) de los perfiles de impedancia representados en la figura 7, y de las huellas correspondientes de la sección migrada (después de la conversión de estos resultados de una profundidad expresada en metros en una profundidad expresada en tiempo de propagación vertical ida-vuelta). Estas transformadas de Fourier se han normalizado para hacer comparables las amplitudes del pico más importante situado por encima de 5 Hz. Se constata un aumento muy significativo del ancho de banda, revelador de la ganancia de resolución vertical accesible por aplicación del método de los inventores.

Utilización

Interpretaciones litológicas o petrofísicas

50 La interpretación en términos litológicos o petrofísicos del resultado de la invención suministra informaciones muy valiosas, tanto en un contexto de exploración como en un contexto de monitorización o de vigilancia de los depósitos. En efecto, dicha interpretación permite vigilar un sitio de almacenamiento geológico de gases ácidos, o localizar y evaluar depósitos de petróleo.

Utilización como complementos a las diagráfías

60 Para conocer mejor el subsuelo, los geofísicos utilizan mediciones realizadas en los pozos (diagráfías, extracciones de testigos). Estas diagráfías ofrecen en general mediciones precisas, particularmente en términos de resolución, pero cuya pertinencia está limitada a las inmediaciones adyacentes del pozo (típicamente un metro). Estas mediciones son esenciales para conocer la litología y las propiedades petrofísicas de las capas transversales.

65 La invención puede considerarse como un nuevo tipo de diagráfía con, en efecto, una resolución vertical peor que las diagráfías tradicionales, pero con la ventaja de ampliar considerablemente las inmediaciones del pozo investigado e incluso, suministrar una estimación de las variaciones laterales en el interior de estas inmediaciones.

Como las diagrfas, el resultado de la invención puede utilizarse tal cual, o servir de punto de entrada en programas informáticos de procesamiento y de interpretación de datos sísmicos (deconvolución estratigráfica, inversión de datos sísmicos).

5 Utilización en el contexto de la monitorización o de la vigilancia de los depósitos

10 En el contexto donde los datos “walkaway” son adquiridos en función del tiempo transcurrido, pueden aprovecharse variaciones temporales de la distribución de impedancia estimada por el método para detectar cambios en las propiedades petrofísicas del depósito para, por ejemplo, optimizar su producción, o de su cobertura, para prever riesgos de accidentes.

15 Finalmente, la obtención a la vez de una distribución de impedancia P y de impedancia S informa sobre el contenido de fluido. Esta información es muy valiosa para la gestión de los depósitos subterráneos y de los acuíferos. Se subraya en particular la aplicación a la inversión conjunta de datos sísmicos en un contexto de sismica repetida y de datos de producción.

REIVINDICACIONES

1. Método para construir una imagen representativa de una distribución de impedancias acústicas en una zona del subsuelo, por medio de mediciones sísmicas adquiridas de acuerdo con una configuración de tipo «walkaway» que comprende emisiones de ondas sísmicas desde la superficie en el subsuelo y recepciones por receptores situados a diferentes profundidades en al menos un pozo, y a partir de una estimación del campo de velocidad de propagación de ondas sísmicas en el subsuelo, **caracterizado por que** comprende las siguientes etapas:
- se seleccionan p ángulos de iluminación, correspondiendo cada ángulo de iluminación a una dirección de propagación de un frente de onda a nivel de un límite superior de dicha zona;
 - se organizan dichas mediciones sísmicas, en datos D_p organizados por ángulo de iluminación p ;
 - se determina, en el interior de dicha zona, dicha distribución de impedancias acústicas por medio de una inversión, durante la cual se minimiza una diferencia entre dichos datos organizados D_p obtenidos de dichas mediciones sísmicas, y de datos obtenidos de una estimación, por resolución de una ecuación de propagación de las ondas a partir de dicho campo de velocidades, de una distribución de impedancia acústica, y de una distribución de presión a nivel de dicho límite superior de la zona para cada ángulo de iluminación.
2. Método de acuerdo con la reivindicación 1, donde se minimiza la diferencia, teniendo en cuenta una información a priori definida por una dirección de buzamiento concerniente a una estructuración de la distribución de impedancia acústica, y una dirección de buzamiento concerniente a una estructuración de la distribución de presión.
3. Método de acuerdo con la reivindicación 2, donde se minimiza la diferencia, minimizando una funcional de mínimos cuadrados que comprende un primer término que mide dicha diferencia, un segundo término correspondiente a una derivada direccional concerniente a la estructuración de la distribución de impedancia acústica y ponderado por un peso ε_l , y un tercer término correspondiente a una derivada direccional concerniente a la estructuración de la distribución de presión y ponderado por un peso $\varepsilon_{B,p}$.
4. Método de acuerdo con la reivindicación 3, donde dichos pesos se determinan mediante una técnica de ensayos-errores.
5. Método de acuerdo con la reivindicación 4, donde los pesos se determinan aplicando las siguientes reglas:
- un resultado que presenta residuos correlacionados demasiado fuertes, expresa un valor demasiado fuerte de al menos uno de los dos tipos de peso;
 - un resultado que presenta una distribución de impedancia acústica con variaciones laterales anormalmente débiles, expresa un valor demasiado fuerte asignado al peso ε_l .
6. Método de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, donde se minimiza la diferencia, añadiendo un término a la funcional para tener en cuenta una información a priori determinada a nivel de al menos un pozo perforado a través de dicha zona, definiendo una dirección de buzamiento concerniente a una estructuración de la distribución de impedancia, y definiendo una dirección de buzamiento concerniente a una estructuración de una condición en los límites.
7. Método de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, donde se transforman los datos sísmicos para organizarlos por ángulo de iluminación por medio de una transformada de Radon.
8. Método de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, donde se interpreta dicha imagen en términos litológicos y/o petrofísicos, para vigilar un sitio de almacenamiento geológico de gases ácidos, o para localizar y evaluar depósitos de petróleo.
9. Método de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, donde se utiliza dicha imagen como complemento de otras diagrfías para caracterizar la zona.

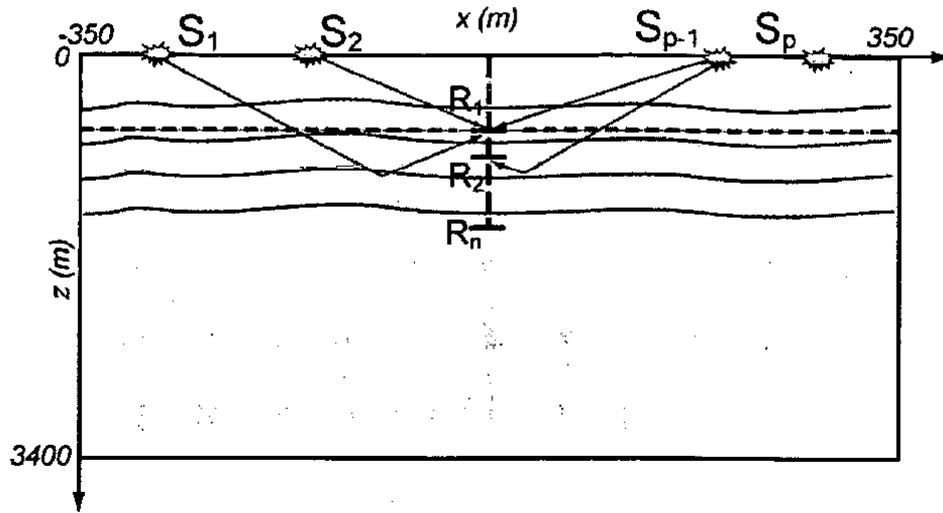


Fig. 1

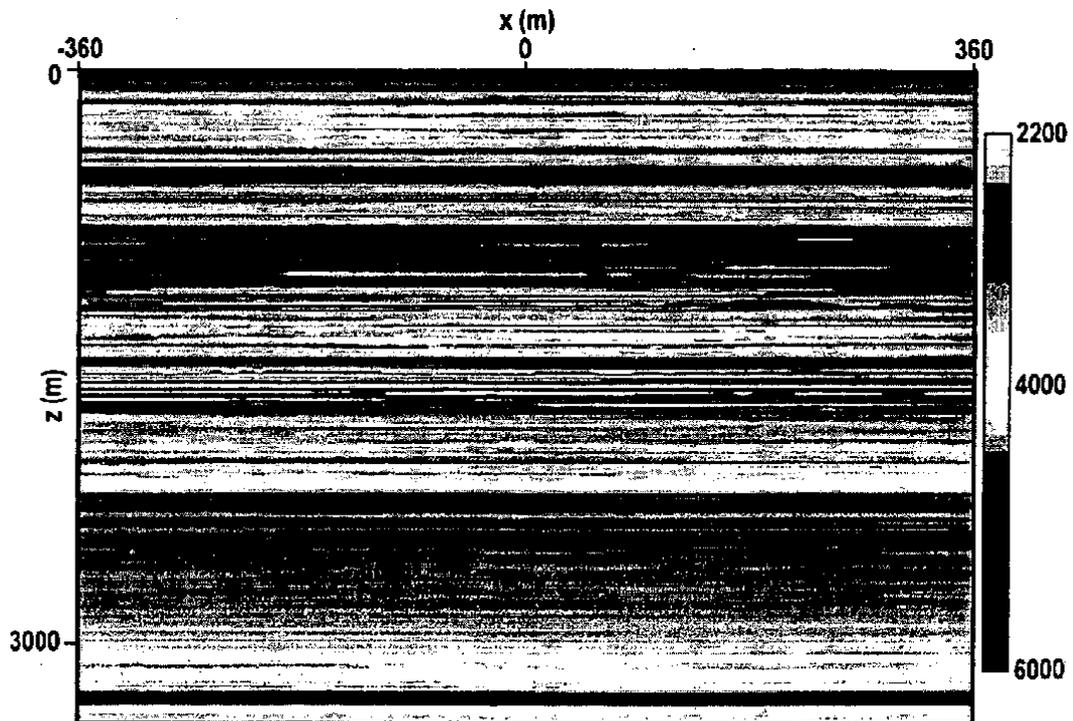


Fig. 2

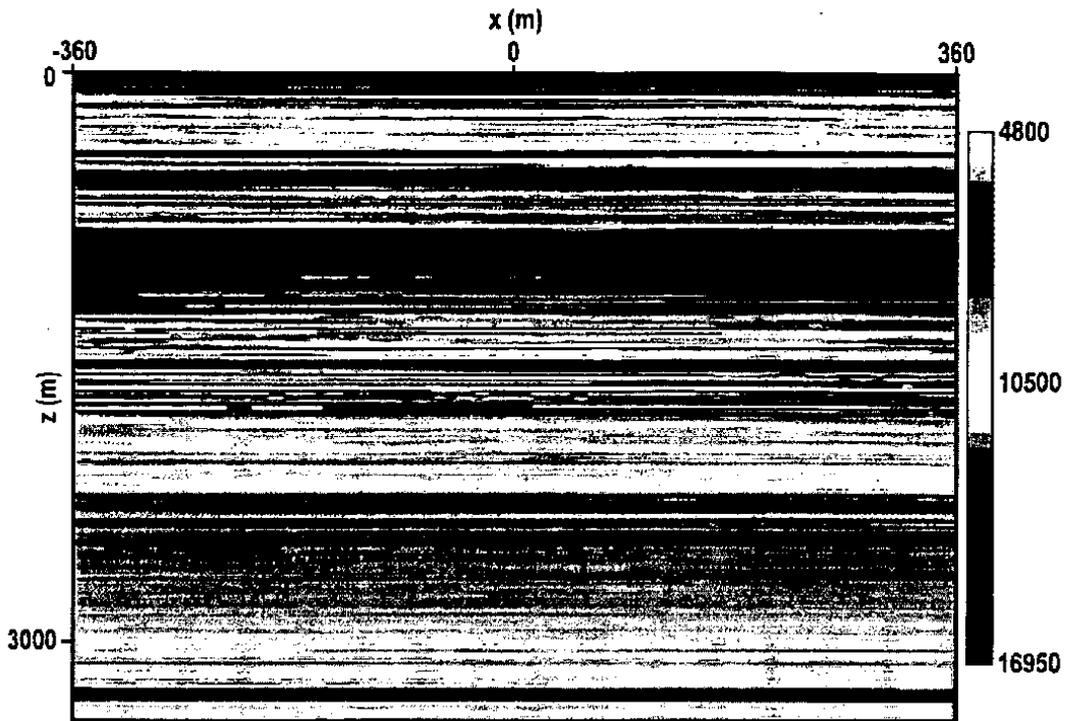


Fig. 3

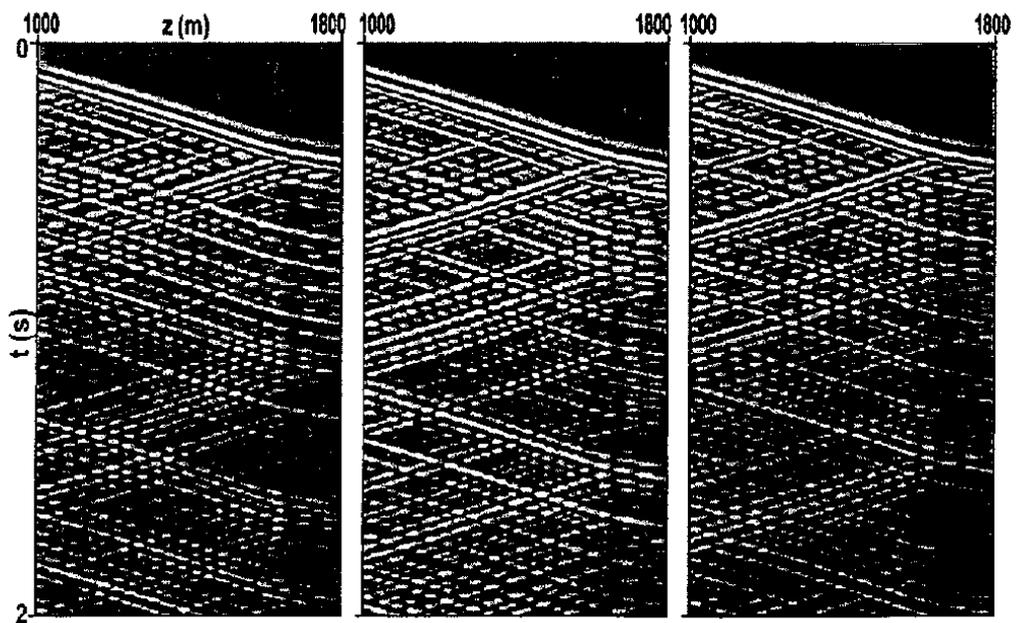


Fig. 4

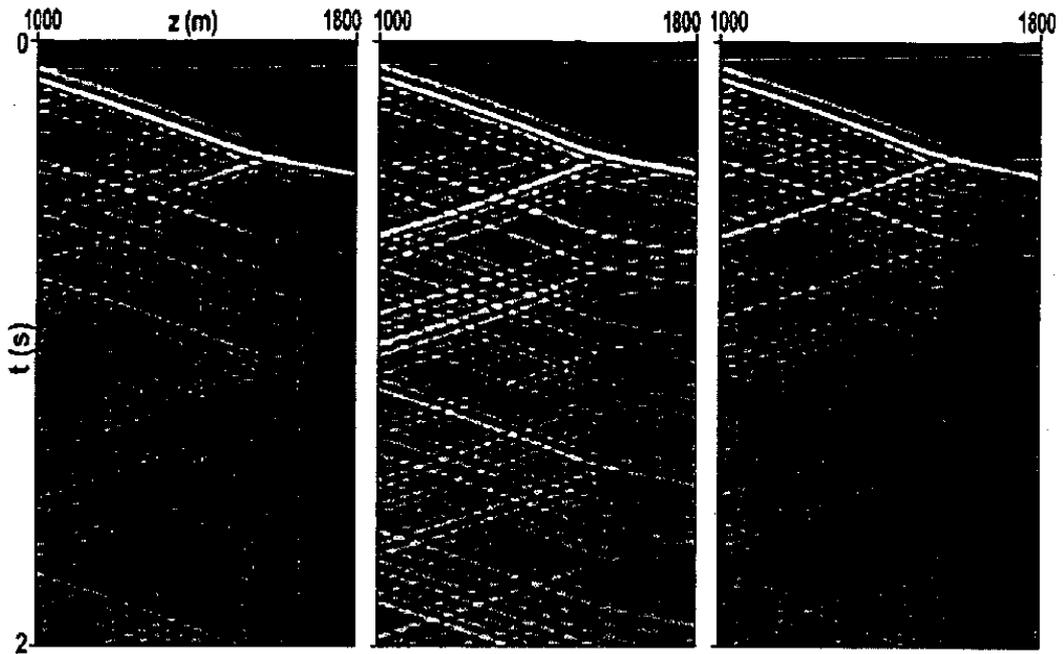


Fig. 5

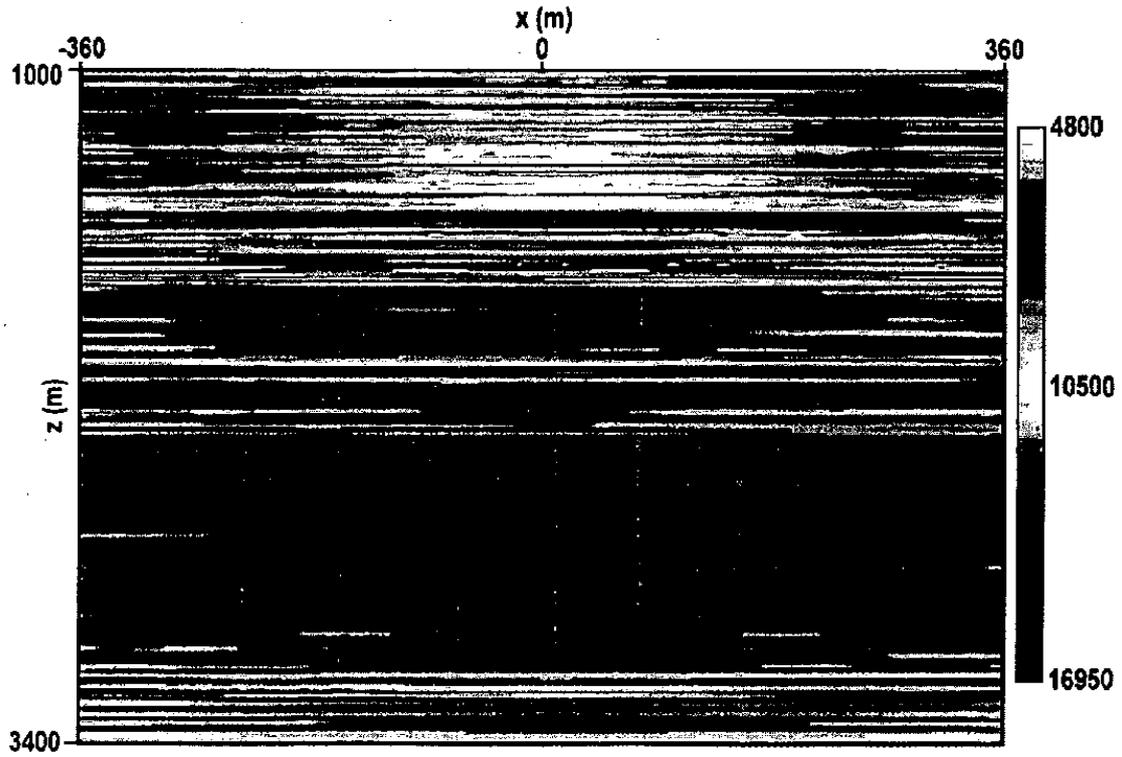


Fig. 6

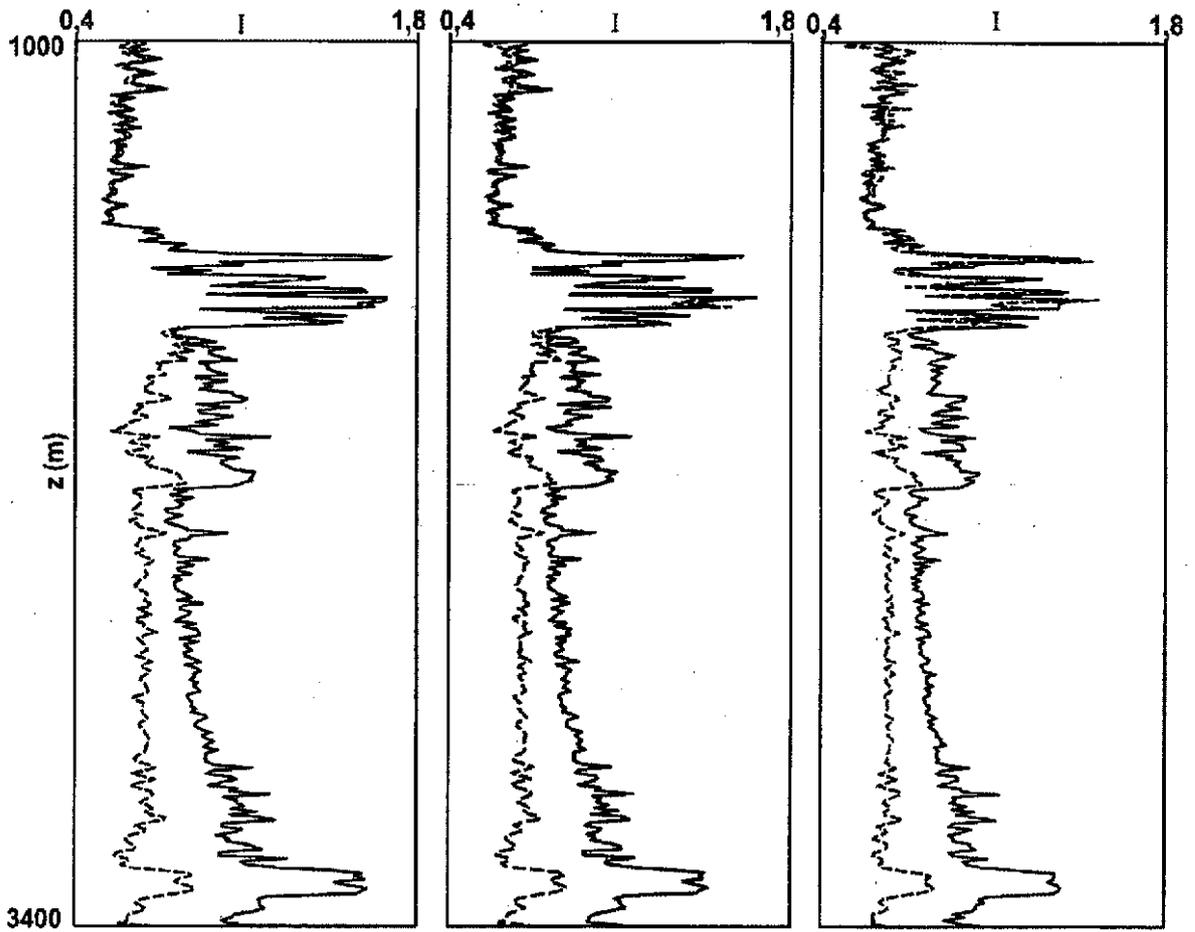


Fig. 7

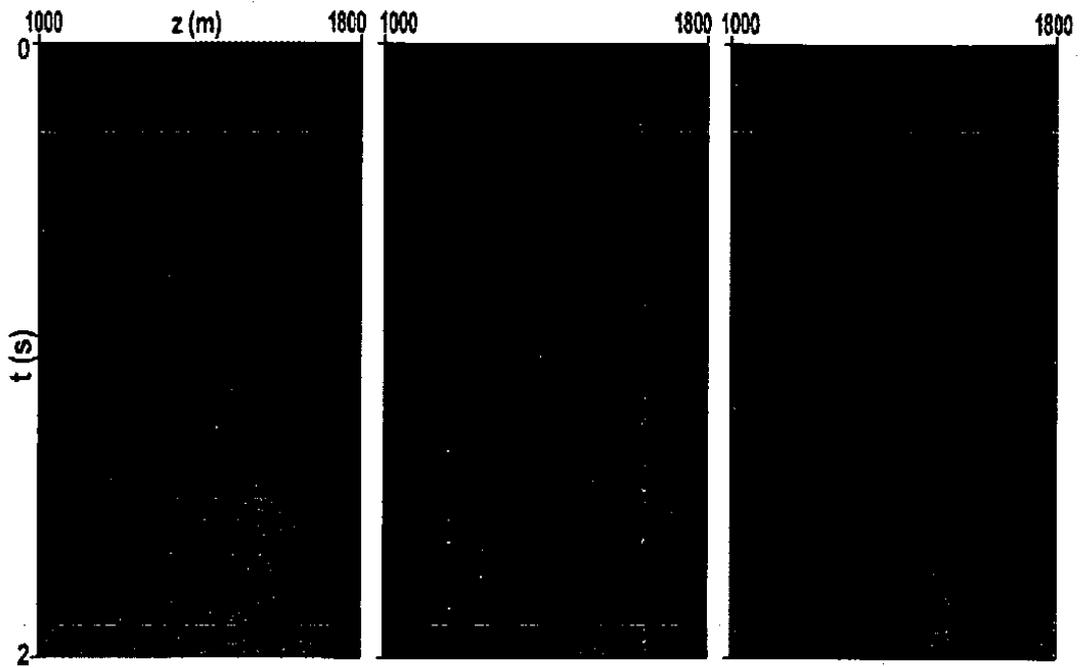


Fig. 8

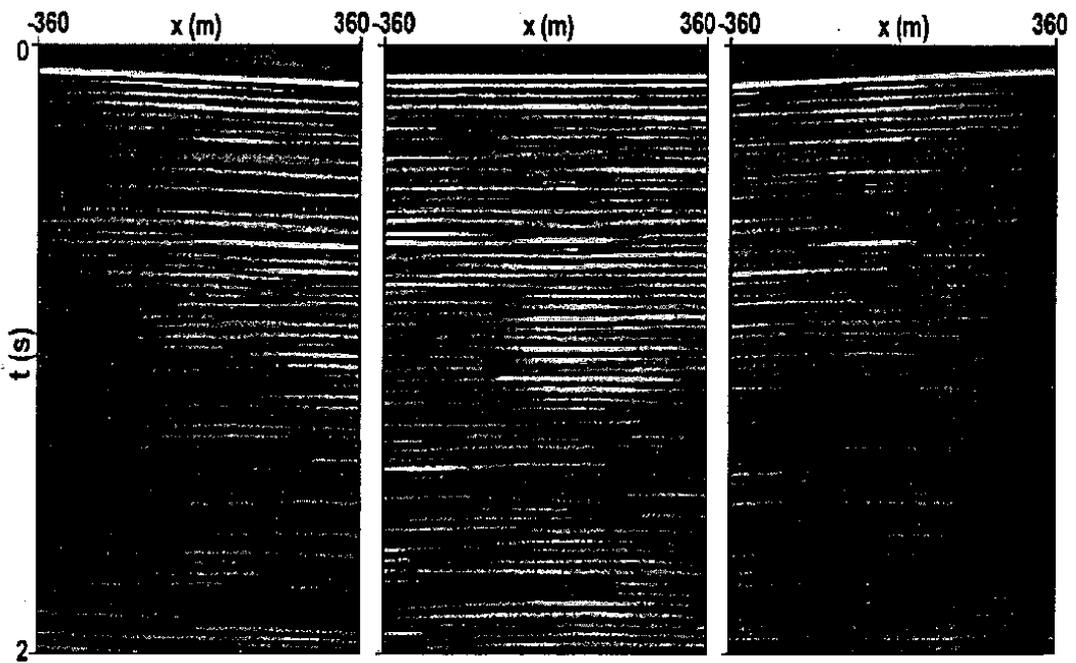


Fig. 9

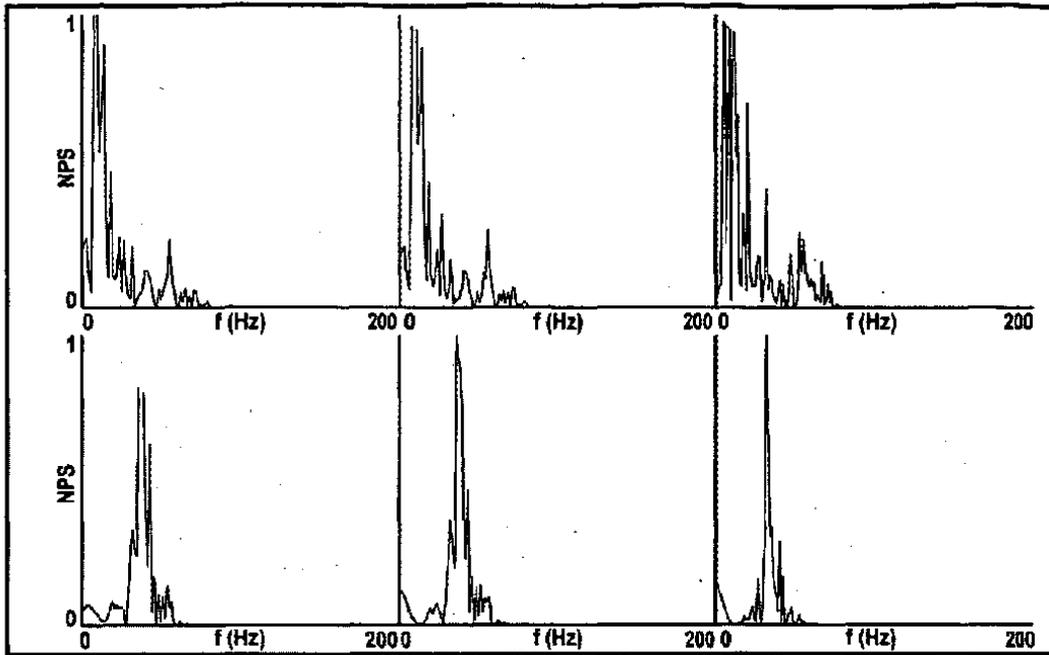


Fig. 10

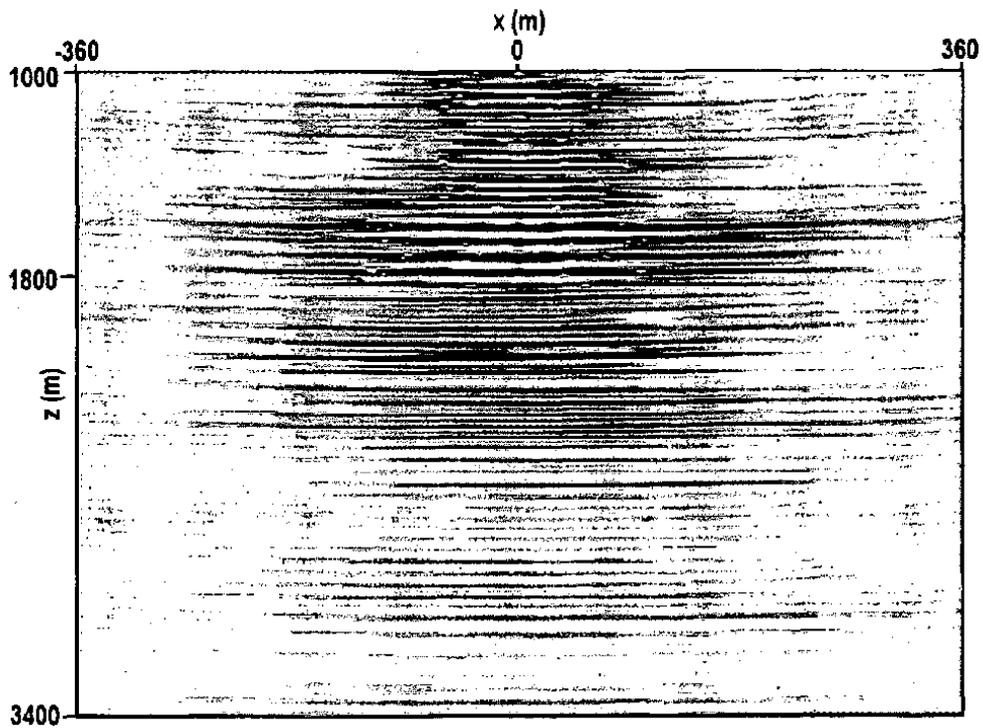


Fig. 11