



## Concepto de identificación de acumulaciones naturales de hidrógeno mediante tecnología de teledetección



2024



## 1. Principios de identificación de anomalías de hidrógeno

El hidrógeno es un gas que se encuentra en la atmósfera en niveles traza que no pueden sustentar la vida. Se sintetiza a partir de hidrocarburos y agua. El gas hidrógeno constituye la fracción más ligera de la molécula de  $H_2O$ . El hidrógeno es el más ligero y básico de todos los elementos. Es un gas bastante reactivo, que entra en combinación química con la mayoría de los elementos y es débilmente repelido por las fuerzas magnéticas.

El hidrógeno natural se puede encontrar en depósitos subterráneos y normalmente se extrae de manera similar al gas natural.

Una gran parte de la física se dedica al estudio de los efectos que produce la aplicación de un campo magnético en el interior de diversos materiales. En el átomo de hidrógeno, un núcleo con un único protón de carga positiva, que permanece estacionario, está orbitado por un único electrón de carga negativa. Esta configuración puede dar la impresión de que el hidrógeno tiene una fuerte atracción magnética, pero no es así. El gas hidrógeno es, en efecto, muy débilmente magnético. La razón es que los átomos de hidrógeno no se encuentran aislados, sino que están unidos entre sí para formar una molécula, que tiene una energía química menor que la de los átomos separados. Dentro de esta molécula, el momento de un electrón viaja en dirección opuesta al de su vecino. Debido a este fenómeno, la molécula es débilmente magnética y se considera que carece de un momento magnético permanente.

El hidrógeno es una sustancia diamagnética. El diamagnetismo se produce en materiales cuyos átomos tienen electrones apareados. Según la Ley de Faraday, cuando una molécula de hidrógeno se expone a un campo magnético, sus electrones que se encuentran en órbita modifican ligeramente su momento. A medida que el campo magnético aumenta, se crea un campo inducido, que los electrones de la molécula experimentan como una fuerza. Mediante este principio de la física, la molécula de hidrógeno adquiere un momento magnético inducido.

El efecto fotoeléctrico proporcionó evidencia irrefutable de la existencia del fotón y, por lo tanto, del comportamiento de la radiación electromagnética, similar al de una partícula. Sin embargo, el concepto de fotón surgió de la experimentación con radiación térmica, radiación electromagnética emitida como resultado de la temperatura de una fuente, que produce un espectro continuo de energías. Se necesitaban pruebas más directas para verificar la naturaleza cuantizada de la radiación electromagnética. En esta sección, describimos cómo la experimentación con luz visible proporcionó esta evidencia.

Aunque los objetos a alta temperatura emiten un espectro continuo de radiación electromagnética, se observa un tipo diferente de espectro cuando se calientan muestras puras de elementos individuales. Por ejemplo, cuando se hace pasar una descarga eléctrica de alto voltaje a través de una muestra de gas hidrógeno a baja presión, los átomos de hidrógeno individuales aislados resultantes causados por la disociación de  $H_2$  emiten una luz roja. A diferencia de la radiación de cuerpo negro, el color de la luz emitida por los átomos de hidrógeno no depende en gran medida de la temperatura del gas en el tubo. Cuando la luz emitida pasa a través de un prisma, solo se forman unas pocas líneas estrechas, llamadas espectro de líneas, que es un espectro en el que se emite o absorbe luz de solo una cierta longitud de onda, en lugar de un rango continuo de longitudes de onda, en lugar de un rango continuo de colores. La luz emitida por los átomos de hidrógeno es roja porque, de sus cuatro líneas características, la





La línea más intensa de su espectro está en la porción roja del espectro visible, a 656 nm.

Las propiedades del hidrógeno descritas anteriormente están detrás de los principios de las manifestaciones naturales del hidrógeno en la superficie de la Tierra y su posterior identificación y delimitación como anomalías.

## 2. Enfoque de teledetección para la identificación de anomalías del hidrógeno

Utilizamos la técnica patentada de procesamiento de estudios de teledetección para identificar y mapear con precisión las anomalías asociadas con diversos minerales y sustancias (petróleo, gas, oro, uranio, cobre, agua, hidrógeno, etc.).

La teledetección se ha utilizado durante muchos años para explorar minerales. Implica la recopilación de información sobre el mundo físico midiendo la radiación electromagnética, las partículas y las señales de campo que emanan de los objetos. Hasta la fecha, la obtención de imágenes por satélite se utiliza ampliamente como herramienta de exploración. La teledetección utiliza firmas espectrales. Para cualquier material dado, la cantidad de radiación solar que refleja, absorbe, transmite y emite varía con la longitud de onda. Cuando se traza la cantidad de radiación o energía electromagnética de un objeto en un rango de longitudes de onda, los puntos conectados producen una curva llamada firma espectral del material. Se pueden encontrar más de 4.000 minerales naturales en la Tierra, y cada uno tiene su propia composición química y frecuencia inherente. La cantidad de radiación solar que un mineral o sustancia refleja, transmite y emite debido a su composición química es como una huella dactilar, o lo que se llama firma espectral. Al medir las pequeñas variaciones de longitud de onda con teledetección, a menudo se puede identificar la firma espectral de un mineral o sustancia desde el espacio.

Todos los objetos tienen una firma espectral única y los objetos similares comparten una firma espectral. Una vez que hemos identificado la firma espectral de un objeto, la misma firma puede buscarse en otros conjuntos de datos para encontrar patrones y objetos similares. Los campos electromagnéticos inherentes (espectros) existen sobre cada tipo de acumulación (petróleo, gas, agua, hidrógeno) o depósitos (oro, uranio, cobre, etc.). Estos campos electromagnéticos (de una frecuencia específica) se forman sobre las acumulaciones o depósitos, y se manifiestan en la superficie del suelo debido a varios procesos químicos, térmicos y electroquímicos en rocas con migración prolongada de petróleo, gases (otros metales en minerales) desde grandes profundidades hasta la superficie del suelo. Las acumulaciones y depósitos de minerales y sus minerales/sustancias constituyentes tienen propiedades características que son visibles utilizando diferentes longitudes de onda de luz más allá del rango visible. Esas propiedades únicas pueden evaluarse para mapear la distribución de minerales específicos.

Analizamos las imágenes espectrales obtenidas de los satélites de observación de la Tierra para identificar y cartografiar las firmas minerales (campos electromagnéticos). Algunos satélites tienen una calidad espectral y radiométrica tan alta que podemos medir las fugas de gas en la atmósfera después de aplicar las correcciones atmosféricas adecuadas a los datos.

El procesamiento de imágenes satelitales es un procedimiento bien establecido que se ha utilizado en muchas empresas. Utilizamos imágenes satelitales tanto digitales como analógicas, siendo estas últimas un requisito previo ya que las longitudes de onda se conservan en ellas. Además de las imágenes satelitales estándar,





En el procesamiento de imágenes satelitales en el rango visible, espectros IR y UV, utilizamos un procesamiento de imágenes innovador patentado en el rango invisible de la radiación electromagnética. Los espectros invisibles de los campos electromagnéticos característicos se "visualizan" en forma de "zonas de alto brillo" en imágenes satelitales analógicas de alta resolución. El procesamiento incluye la aplicación de reactivos químicos especiales (nanogeles), fósforos, sensibilizadores, que se seleccionan para cada tipo de acumulación (depósito) y luego se procesan en un reactor nuclear de pequeño tamaño. Mejora las anomalías identificadas y las hace visibles e interpretables geológicamente. El reactor nuclear ayuda a mejorar la visualización de las anomalías identificadas al establecer la resonancia de las frecuencias de los elementos de referencia en nanogeles e imágenes satelitales.

### 3. Estimación de la profundidad de ocurrencia

El método de predicción de la profundidad se basa en un cambio en la posición de los límites de las anomalías (desplazamiento del límite de la energía máxima de la señal) con diferentes inclinaciones de las órbitas de los satélites y parámetros geométricos de la ubicación de los satélites en relación con la anomalía.

La profundidad de ocurrencia en el paso 1 se estima utilizando no menos de dos imágenes satelitales que se toman de 2 satélites, pero con diferentes inclinaciones orbitales. A partir del análisis de estas imágenes, se determina el "valor de desplazamiento" del límite de la anomalía. Conociendo los ángulos de inclinación de las órbitas (es decir, el ángulo bajo el cual se registra la anomalía) y un tramo ("valor de desplazamiento" de los límites de la anomalía), se estima el segundo tramo (es decir, la profundidad de ocurrencia). Ver a continuación

En el proceso de evaluación del sitio, el Grupo Poisk procesa una cierta cantidad de imágenes satelitales tomadas desde diferentes ángulos (Fig. 1).

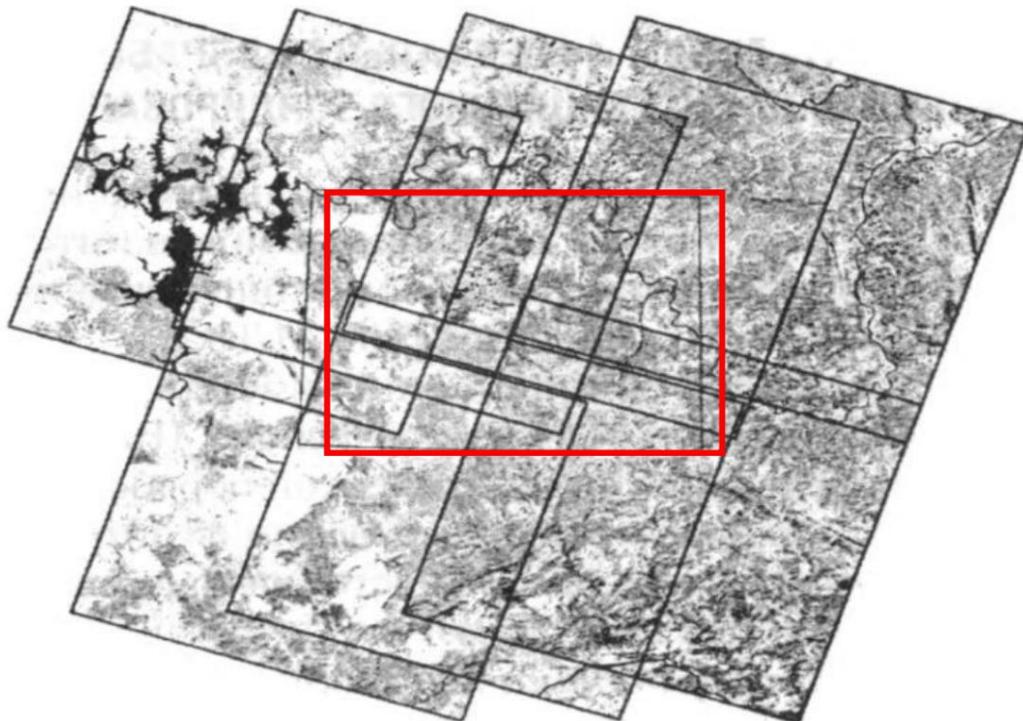


Imagen 1. Ejemplo de imágenes satelitales que cubren un área de investigación (mostradas con un contorno rojo en el centro)



Conociendo el ángulo en el que se tomó una imagen satelital (suministrada por una empresa de imágenes satelitales), la profundidad de ocurrencia se puede calcular (Fig. 2) de la siguiente manera.

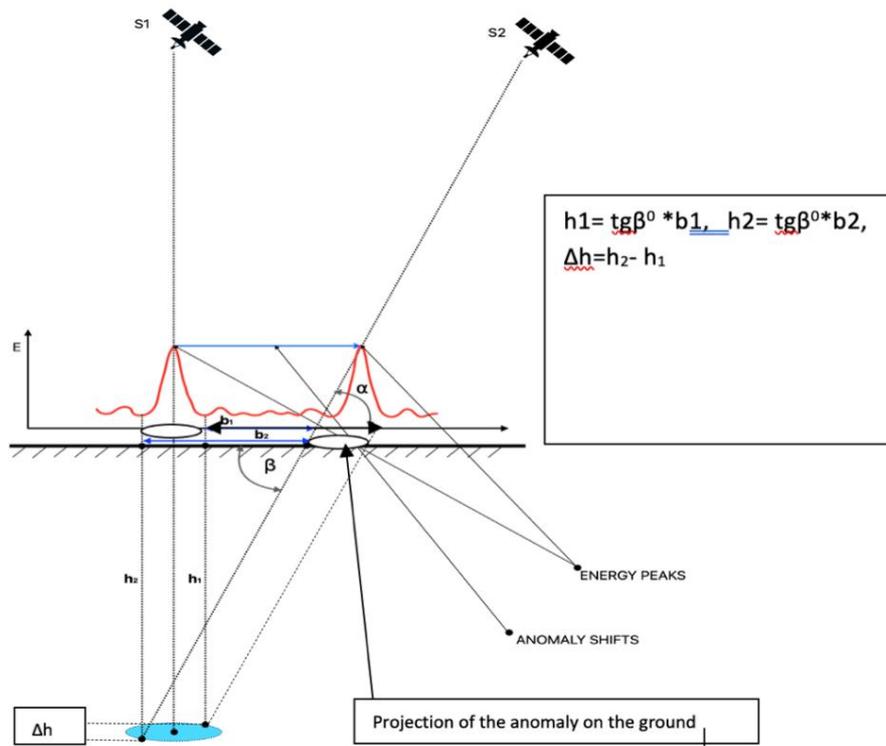


Fig. 2. Estimación de profundidad

Mediante el análisis de varias imágenes, se determina la magnitud del desplazamiento de los límites de la anomalía, se calcula la tangente del ángulo de inclinación del satélite para cada imagen, se tiene en cuenta la altura del satélite y luego se estima la profundidad de la parte superior e inferior del cuerpo geológico:

$$1) h_1 = \operatorname{tg} \beta^0 * b_1, 2) h_2 = \operatorname{tg} \beta^0 * b_2, 3) \Delta h = h_2 - h_1$$

Dónde

- $h_1$  – profundidad de la parte superior de la mineralización -  $h_2$ - parte inferior de la mineralización
- $\Delta h$  es el espesor de la mineralización -  $\beta^0$  - el ángulo de inclinación del eje de la órbita del satélite S2
- $b$  es la distancia desde el punto inicial de aumento ( $b_1$ ) y disminución ( $b_2$ ) del valor máximo de la amplitud de la señal hasta la intersección con la línea de observación del satélite del límite de anomalía registrado por el satélite S2.
- S1 es un satélite situado lo más cerca posible de la línea vertical de observación sobre el área anómala



#### 4. Prerrequisitos geológicos

Los entornos geológicos más prometedores donde es más probable encontrar depósitos de hidrógeno natural

1. Las rocas ígneas crean una amplia gama de entornos con gas rico en hidrógeno en forma de gas libre, gas disuelto e inclusiones de fluidos atrapados en ofiolitas, zonas de rift, fallas y desgasificación atmosférica en gases volcánicos, géiseres, fuentes termales y salidas de gas superficiales.
2. Las tuberías de kimberlita rara vez se asocian con gas rico en hidrógeno, pero es en ellas donde se encuentran hoy los caudales récord de hidrógeno natural: en la tubería de kimberlita de Rusia, el caudal fue de 100.000 m<sup>3</sup> al día.
3. Los yacimientos minerales son a menudo un lugar de acumulación, tanto en rocas ígneas como sedimentarias.
4. Las capas de carbón y/o carbonatos tienen un alto potencial de acumulación de hidrógeno.
5. Dentro de las inclusiones de fluidos gaseosos, cuanto más antigua es la roca, mayor es el contenido de H<sub>2</sub>, porque el tiempo es el factor principal.
6. Los sulfatos de evaporita pueden almacenar grandes cantidades de H<sub>2</sub> (hasta 20-30% en volumen), y la halita con un alto contenido de potasio (por ejemplo, depósitos de K-potasio) también proporciona una fuente hidrolítica radiogénica de H<sub>2</sub> a través de un compuesto intermedio de calcio metálico, que junto con la sal es un buen escudo para la acumulación de hidrógeno.
7. Los yacimientos de petróleo y gas normalmente no contienen grandes cantidades de H<sub>2</sub>, sin embargo, para yacimientos con un alto contenido de H<sub>2</sub>, la producción de H<sub>2</sub> puede ser rentable, especialmente cuando se produce gas licuado.

La alta reactividad del H<sub>2</sub> afecta la estructura y la composición química de la roca que atraviesa, por ejemplo, la resistencia mecánica de los carbonatos disminuye, acelerando potencialmente el desarrollo de fallas en condiciones de estrés con la creación de rutas de migración adicionales. El contenido de H<sub>2</sub> en los pozos suele aumentar con la profundidad.

Hasta el momento, sólo son posibles tres tipos de sellados para las acumulaciones de H<sub>2</sub>: los umbrales de rocas básicas (encontrados en Mali, donde la única generación natural de hidrógeno actual se encuentra bajo una roca de dolerita), la sal y las pizarras.

Los siguientes criterios podrían ser los más importantes en términos de acumulaciones de H<sub>2</sub>:

- La presencia de rocas ultramáficas y básicas ricas en hierro, especialmente el basamento Arcaico, que pueden ser fuentes potenciales de H<sub>2</sub> tanto radiolítico como hidrolítico.
- Fallas profundas que permiten la migración y concentración de fuentes difusas de H<sub>2</sub>. • Un potencial de yacimiento en profundidad en el límite entre el basamento y las rocas sedimentarias. Por ejemplo, el gas natural del pozo Mt Kitty 1 (cuenca Amadeus) contiene 11 moles % de H<sub>2</sub> en un basamento ígneo fracturado cubierto directamente por rocas sedimentarias.
- Áreas con depresiones isométricas cerradas, que por sí mismas no pueden ser concentradores de acumulaciones naturales de hidrógeno, pero indican que en esta área se produce una desgasificación natural de hidrógeno.

Conocer el entorno y la configuración geológica del área de interés sería útil para estimar de manera preliminar su potencial de hidrógeno y desarrollar un procedimiento de estudio RS más efectivo.

