



## Conceito de identificação de acumulações naturais de hidrogênio por tecnologia de sensoriamento remoto



2024



## 1. Princípios de identificação de anomalias de hidrogênio

O hidrogênio é um gás encontrado na atmosfera em níveis de traços que não podem sustentar a vida. Ele é sintetizado a partir de hidrocarbonetos e água. O gás hidrogênio compõe a fração mais leve da molécula de H<sub>2</sub>O. O hidrogênio é o mais leve e o mais básico de todos os elementos. É um gás bastante reativo, que entra em combinação química com a maioria dos elementos e é fracamente repelido por forças magnéticas.

O hidrogênio natural pode ser encontrado em depósitos subterrâneos e normalmente extraído de maneira semelhante ao gás natural.

Uma grande parte da física é dedicada ao estudo dos efeitos produzidos em vários materiais pela aplicação de um campo magnético. No átomo de hidrogênio, um núcleo com um único próton carregado positivamente, que permanece estacionário, é orbitado por um único elétron carregado negativamente. Tal configuração pode dar a impressão de que o hidrogênio tem uma atração magnética poderosa, mas não é o caso. O gás hidrogênio é, na verdade, apenas muito fracamente magnético. A razão para isso é que os átomos de hidrogênio não são encontrados isolados. Eles são ligados para formar uma molécula, que tem uma energia química menor do que átomos separados. Dentro desta molécula, o momento de um elétron viaja na direção oposta à de seu vizinho. Devido a este fenômeno, a molécula é apenas fracamente magnética e é considerada como carente de um momento magnético permanente.

O hidrogênio é uma substância diamagnética. O diamagnetismo ocorre em materiais cujos átomos têm elétrons pareados. De acordo com a Lei de Faraday, quando uma molécula de hidrogênio é exposta a um campo magnético, seus elétrons que estão em órbita alteram seu momento ligeiramente. À medida que o campo magnético aumenta, um campo induzido é criado, que os elétrons da molécula experimentam como uma força. Por meio desse princípio da física, a molécula de hidrogênio adquire um momento magnético induzido.

O efeito fotoelétrico forneceu evidências indiscutíveis para a existência do fóton e, portanto, o comportamento de partícula da radiação eletromagnética. O conceito de fóton, no entanto, surgiu da experimentação com *radiação térmica*, radiação eletromagnética emitida como resultado da temperatura de uma fonte, que produz um espectro contínuo de energias. Evidências mais diretas eram necessárias para verificar a natureza quantizada da radiação eletromagnética. Nesta seção, descrevemos como a experimentação com luz visível forneceu essas evidências.

Embora objetos em alta temperatura emitam um espectro contínuo de radiação eletromagnética, um tipo diferente de espectro é observado quando amostras puras de elementos individuais são aquecidas. Por exemplo, quando uma descarga elétrica de alta voltagem é passada através de uma amostra de gás hidrogênio em baixa pressão, os átomos de hidrogênio individuais isolados resultantes causados pela dissociação de H<sub>2</sub> emitem uma luz vermelha. Ao contrário da radiação do corpo negro, a cor da luz emitida pelos átomos de hidrogênio não depende muito da temperatura do gás no tubo. Quando a luz emitida é passada através de um prisma, apenas algumas linhas estreitas, chamadas de espectro de linha, que é um espectro no qual a luz de apenas um certo comprimento de onda é emitida ou absorvida, em vez de uma faixa contínua de comprimentos de onda, em vez de uma faixa contínua de cores. A luz emitida pelos átomos de hidrogênio é vermelha porque, de suas quatro linhas características, a





a linha mais intensa em seu espectro está na porção vermelha do espectro visível, em 656 nm.

As propriedades do hidrogênio descritas acima estão por trás dos princípios das manifestações naturais do hidrogênio na superfície da Terra e sua subsequente identificação e delimitação como anomalias.

## 2. Abordagem de sensoriamento remoto para identificação de anomalias de hidrogênio

Utilizamos a técnica patenteada de processamento de sensoriamento remoto para identificar e mapear com precisão anomalias associadas a vários minerais e substâncias (petróleo, gás, ouro, urânio, cobre, água, hidrogênio etc.).

O sensoriamento remoto tem sido usado por muitos anos para explorar minerais. Ele envolve a coleta de informações sobre o mundo físico medindo a radiação eletromagnética, partículas e sinais de campo que emanam de objetos. Até o momento, a imagem de satélite é amplamente usada como uma ferramenta de exploração. O sensoriamento remoto faz uso de assinaturas espectrais. Para qualquer material dado, a quantidade de radiação solar que ele reflete, absorve, transmite e emite varia com o comprimento de onda. Quando a quantidade de radiação ou energia eletromagnética de um objeto é plotada em uma faixa de comprimentos de onda, os pontos conectados produzem uma curva chamada assinatura espectral do material. Mais de 4.000 minerais naturais podem ser encontrados na Terra, e cada um tem sua própria composição química única e frequência inerente. A quantidade de radiação solar que um mineral ou substância reflete, transmite e emite devido à sua composição química é como uma impressão digital, ou o que é chamado de assinatura espectral. Ao medir as pequenas variações de comprimento de onda com sensoriamento remoto, a assinatura espectral de um mineral ou substância pode frequentemente ser identificada do espaço.

Todos os objetos têm uma assinatura espectral única, e objetos semelhantes compartilham uma assinatura espectral. Uma vez identificada a assinatura espectral de um objeto, a mesma assinatura pode ser pesquisada em outros conjuntos de dados para encontrar padrões e objetos semelhantes. Os campos eletromagnéticos inerentes (espectros) existem sobre cada tipo de acumulação (petróleo, gás, água, hidrogênio) ou depósitos (ouro, urânio, cobre etc.). Esses campos eletromagnéticos (de uma frequência específica) são formados sobre as acumulações ou depósitos e se manifestam na superfície do solo devido a vários processos químicos, térmicos e eletroquímicos em rochas com migração prolongada de petróleo, gases (outros metais em minérios) de grandes profundidades para a superfície do solo. As acumulações e depósitos de minério e seus minerais/substâncias constituintes têm propriedades características que são visíveis usando diferentes comprimentos de onda de luz além da faixa visível. Essas propriedades únicas podem ser avaliadas para mapear a distribuição de minerais específicos.

Analizamos as imagens espectrais obtidas de satélites de observação da Terra para identificar e mapear assinaturas minerais (campos eletromagnéticos). Certos satélites têm qualidade espectral e radiométrica tão alta que podemos medir vazamentos de gás na atmosfera após as correções atmosféricas adequadas terem sido aplicadas aos dados.

O processamento de imagens de satélite é um procedimento bem estabelecido que tem sido usado por muitas empresas. Usamos tipos de imagens de satélite digitais e analógicas, sendo estas últimas um pré-requisito, pois os comprimentos de onda são preservados nelas. *Além do padrão*





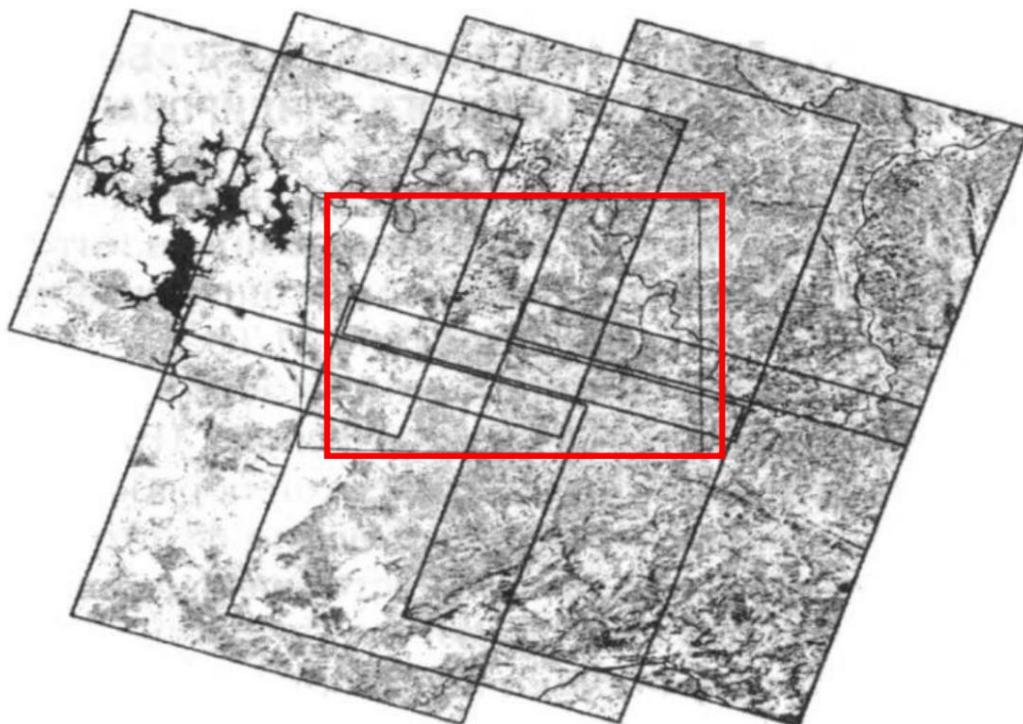
procedimento de processamento de imagens de satélite na faixa visível, espectros de IR e UV, usamos o processamento de imagem inovador patenteado na faixa invisível da radiação eletromagnética. Os espectros invisíveis de campos eletromagnéticos característicos são "visualizados" na forma de "zonas de alto brilho" em imagens de satélite analógicas de alta resolução. O processamento inclui a aplicação de reagentes químicos especiais (nanogéis), fósforos, sensibilizadores, que são selecionados para cada tipo de acumulação (depósito) seguido de tratamento no reator nuclear de pequeno porte. Ele aprimora as anomalias identificadas e as torna visíveis e geologicamente interpretáveis. O reator nuclear ajuda a aprimorar a visualização das anomalias identificadas ao definir a ressonância das frequências dos elementos de referência em nanogéis e imagens de satélite.

### 3. Estimativa da profundidade de ocorrência

O método de previsão da profundidade é baseado em uma mudança na posição dos limites das anomalias (deslocamento do limite da energia máxima do sinal) com diferentes inclinações das órbitas dos satélites e parâmetros geométricos da localização dos satélites em relação à anomalia.

A profundidade de ocorrência na etapa 1 é estimada usando não menos que duas imagens de satélite que são tiradas de 2 satélites, mas com inclinações orbitais diferentes. A partir da análise dessas imagens, o "valor de deslocamento" do limite da anomalia é determinado. Conhecendo os ângulos de inclinação das órbitas (ou seja, o ângulo sob o qual a anomalia é registrada) e uma perna ("valor de deslocamento" dos limites da anomalia), então a segunda perna (ou seja, a profundidade de ocorrência) é estimada. Veja abaixo

No processo de avaliação do local, o Poisk Group processa um certo número de imagens de satélite tiradas de diferentes ângulos (Fig.1).



Pic.1. Exemplo de imagens de satélite cobrindo uma área de pesquisa (mostrada com um contorno vermelho no centro)



Sabendo o ângulo em que uma imagem de satélite foi tirada (fornecida por uma empresa de imagens de satélite), a profundidade de ocorrência pode ser calculada (Fig.2) da seguinte forma.

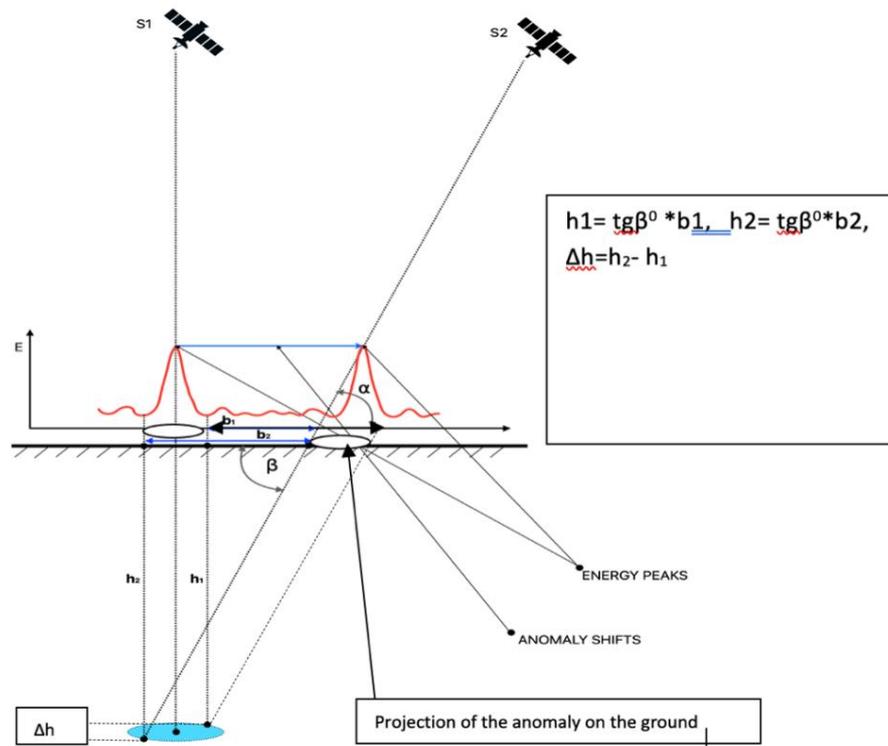


Fig. 2. Estimativa de profundidade

Analisando diversas imagens, determina-se a magnitude do deslocamento dos limites da anomalia, calcula-se a tangente do ângulo de inclinação do satélite para cada imagem, leva-se em consideração a altura do satélite e, então, estima-se a profundidade do topo e da base do corpo geológico:

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

Onde

- $h_1$  – profundidade do topo da mineralização -  $h_2$  – fundo da mineralização
- $\Delta h$  é a espessura da mineralização -  $\beta^0$  - o ângulo de inclinação do eixo da órbita do satélite S2
- $b$  é a distância do ponto inicial de aumento ( $b_1$ ) e de diminuição ( $b_2$ ) do valor máximo da amplitude do sinal até a intersecção com a linha de observação do satélite do limite da anomalia registrada pelo satélite S2.
- S1 é um satélite localizado o mais próximo possível da linha vertical de observação sobre o área anômala





#### 4. Pré-requisitos geológicos

Os ambientes geológicos mais promissores onde é mais provável encontrar depósitos de hidrogênio natural

1. Rochas ígneas criam uma ampla gama de ambientes com gás rico em hidrogênio na forma de gás livre, gás dissolvido e inclusões fluidas aprisionadas em ofiolitos, zonas de fenda, falhas e desgaseificação atmosférica em gases vulcânicos, gêiseres, fontes termais e saídas de gás de superfície.
2. Os tubos de kimberlito raramente são associados a gás rico em hidrogênio, mas é neles que as taxas de fluxo recorde de hidrogênio natural são encontradas hoje no tubo de kimberlito na Rússia, onde a taxa de fluxo era de 100.000 m<sup>3</sup> por dia.
3. Corpos de minério são frequentemente um local de acumulação, tanto em rochas ígneas quanto sedimentares.
4. Jazidas de carvão e/ou carbonatos têm alto potencial de acumulação de hidrogênio.
5. Dentro de inclusões de fluidos gasosos; quanto mais antiga a rocha, maior o teor de H<sub>2</sub>, porque o tempo é o fator principal.
6. Os sulfatos de evaporito podem armazenar grandes quantidades de H<sub>2</sub> (até 20-30% em volume), e a halita com alto teor de potássio (por exemplo, depósitos de K-potássio) também fornece uma fonte hidrolítica radiogênica de H<sub>2</sub> por meio de um composto intermediário de cálcio metálico, que junto com o sal é um bom escudo para o acúmulo de hidrogênio.
7. Os campos de petróleo e gás geralmente não contêm grandes quantidades de H<sub>2</sub>, no entanto, para campos com alto teor de H<sub>2</sub>, a produção de H<sub>2</sub> pode ser lucrativa, especialmente ao produzir gás liquefeito.

A alta reatividade do H<sub>2</sub> afeta a estrutura e a composição química da rocha que atravessa, por exemplo, a resistência mecânica dos carbonatos diminui, potencialmente acelera o desenvolvimento de falhas sob condições de estresse com a criação de rotas de migração adicionais. O conteúdo de H<sub>2</sub> em poços geralmente aumenta com a profundidade.

Até agora, apenas três tipos de selos para as acumulações de H<sub>2</sub> são possíveis: soleiras de rochas básicas (encontradas no Mali, onde a única geração natural de hidrogênio para hoje é encontrada sob uma rocha de dolerito), sal e xistos.

Os seguintes critérios podem ser os mais importantes em termos de acumulações de H<sub>2</sub>:

- A presença de rochas ultramáficas e básicas ricas em ferro, especialmente o embasamento arqueano, que podem ser fontes potenciais de H<sub>2</sub> radiolítico e hidrolítico.
- Falhas profundas que fornecem migração e concentração de fontes difusas de H<sub>2</sub>.
- Um potencial de reservatório em profundidade no limite entre o embasamento e as rochas sedimentares. Por exemplo, o gás natural do poço Mt Kitty 1 (bacia Amadeus) contém 11 mols % H<sub>2</sub> em um embasamento ígneo fraturado diretamente coberto por rochas sedimentares.
- Áreas com depressões isométricas fechadas, que por si só não podem ser concentradores de acumulações naturais de hidrogênio, mas indicam que ocorre desgaseificação natural de hidrogênio nesta área

*Conhecer o ambiente e o cenário geológico da área de interesse seria útil para estimar preliminarmente seu potencial de hidrogênio e elaborar um procedimento de pesquisa de RS mais eficaz.*

