

INCO-TERMS ET TECHNOLOGIE D'EXPLORATION GÉOPHYSIQUE

TECHNOLOGIE « POISK » ET AVANCÉES EN RÉSONANCE MAGNÉTIQUE NUCLÉAIRE

Recherche conjointe du groupe « Poisk » et de l'Université d'État de Sébastopol
Rapport scientifique — 2026

NOM PRÉNOM	DATE	ACTION
Michel L Friedman (DESTOM Chartered 67/11)	2021/07/21	CRÉATION Rév. 00

TABLE DES MATIÈRES

1. Principes physiques et formation des anomalies
2. Fondements théoriques de l'exploration et de la délimitation des accumulations minérales par RMN
 - 2.1 Modèle physico-chimique
 - 2.2 Modèle thermique
3. Formation des anomalies dans les champs physiques
4. Mécanisme de transfert d'énergie-information
 - 4.1 Spécificités du mécanisme
5. Propriétés spectrales des minéraux utilisées dans la technologie « Poisk »
6. Efficacité de la technologie pour divers types de minéraux
 - 6.1 Hydrocarbures
 - 6.2 Minéraux métalliques
 - 6.3 Minéraux non métalliques et dégazage des mines
7. Algorithme de la technologie « Poisk » appliquée à la localisation des hydrocarbures
 - 7.1 Cadre physique fondamental
 - 7.2 Étapes du flux de travail de la technologie
 - 7.3 Activités spécifiques de terrain et de laboratoire
8. Annexe : Sur le problème de l'écho de spin dans la théorie de la RMN

1. Principes physiques et formation des anomalies

Les principes physiques fondamentaux permettant la mise en œuvre pratique de la recherche de minéraux par résonance magnétique nucléaire (RMN) sont liés à l'effet Kirlian, ainsi qu'à l'effet de transfert

d'énergie-information du rayonnement d'une substance spécifique à l'aide d'une fréquence porteuse. Nous utilisons ces principes physiques et ces effets lors de la recherche à distance de minéraux à l'aide de la technologie « Poisk ».

En physique du noyau atomique, une attention particulière est accordée aux moments magnétique et électrique. Conformément aux travaux de l'académicien E. Zavoisky (1946), tous les noyaux ayant des spins non nuls possèdent un moment magnétique μI associé au spin de ce noyau J , au magnéton nucléaire μ_{nucl} , et proportionnel au rapport gyromagnétique γ :

$$\mu I = \gamma \cdot J \cdot \mu_{nucl}$$

Le rapport gyromagnétique est une grandeur constante égale au rapport du moment magnétique nucléaire sur le moment cinétique nucléaire. Si un noyau atomique de spin J et de moment μI est introduit dans un champ magnétique d'intensité H , nous pouvons observer une interaction magnétique, et l'énergie d'interaction du moment magnétique nucléaire avec le champ W_m sera proportionnelle à H :

$$W_m = \mu I \cdot H \cdot (m / J)$$

où m est la projection du vecteur J sur la direction de l'intensité du champ magnétique. Par conséquent, l'énergie d'interaction est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique. Selon la mécanique quantique, certains niveaux quantiques d'énergie nucléaire sont possibles, et la différence entre deux niveaux d'énergie adjacents sera égale à :

$$\Delta W_m = \gamma \cdot \mu_{nucl} \cdot H$$

Dès lors, la fréquence correspondant à cette énergie (appelée fréquence de Larmor) sera :

$$f_L = \Delta W_m / h$$

où h est la constante de Planck. Si un échantillon de substance est placé dans un champ magnétique constamment orienté H_0 (alignant les spins le long du champ) et qu'un champ magnétique variable tournant H_{var} est simultanément appliqué perpendiculairement à l'orientation des noyaux dans le champ H_0 , une absorption résonante et une diffusion résonante d'énergie par l'échantillon de substance peuvent être observées à une fréquence de champ alternatif égale à la fréquence de Larmor f_L . De manière générale, les fréquences de Larmor pour diverses substances dans le champ magnétique terrestre se situent dans le domaine térahertz (100 GHz – 100 THz). Si un noyau possédant un spin est situé au sein d'une molécule, les électrons en mouvement autour de lui créent un champ magnétique local supplémentaire.

Cela déplace la fréquence de Larmor, formant un déplacement chimique. Pour l'analyse de substances organiques et organoélémentaires, la méthode RMN mesure ces déplacements dans les noyaux à spins demi-entiers, fournissant des données vitales sur les structures chimiques moléculaires, l'architecture spatiale et la dynamique. Les fréquences de résonance enregistrées sous conditions RMN nous permettent de déterminer la présence de substances cibles au plus profond de la Terre.

La visualisation des limites de ces anomalies est effectuée à l'aide d'un traitement spécialisé d'images satellite dans les champs de rayonnement et d'une interprétation au sein d'un champ magnétique tournant (effet Kirlian).

2. Fondements théoriques de l'exploration et de la délimitation des accumulations minérales par RMN

Les gisements minéraux, les eaux souterraines, les complexes surjacents et les paysages terrestres sont étroitement interconnectés et exercent des influences mutuelles. L'impact des gisements minéraux sur les roches surjacentes et le paysage se reflète dans les images multispectrales de la surface de la Terre.

2.1 Modèle physico-chimique

Sous l'influence d'un complexe de champs génétiquement anomaux générés par les réservoirs d'hydrocarbures (HC), les roches surjacentes jusqu'à la surface du sol subissent des altérations de composition minéralogique qui peuvent être enregistrées à distance. Le flux diffusif-filtrationnel d'HC entraîne une transformation substantielle de la composition chimique du sol, créant un environnement géochimique spécifique dans la zone proche de la surface. Au-dessus des gisements de pétrole et de gaz, une minéralisation en sulfures et un enrichissement en bitume se produisent, accompagnés de champs de concentration anomaux d'Hélium, U, Th, Cu, Ni, V, Co, Fe et Si. Ces modifications se localisent dans des zones de contrainte anomalement faible et de décompression des roches se formant au-dessus des réservoirs.

L'environnement rédox — régi par les solutions acido-basiques (pH) et le potentiel d'oxydoréduction (Eh) — est crucial dans le façonnage de ces anomalies minéralogiques, altérant directement la couleur et les caractéristiques optiques des roches de surface. Des traces d'HC en migration s'accumulent à travers les milieux hôtes : sols, eaux souterraines, couverture neigeuse, atmosphère proche de la surface, microflore et végétation. La végétation agit comme un maillon sensible reliant la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère.

La migration des HC le long de zones subverticales provoque une redistribution et une accumulation intensives d'éléments chimiques spécifiques dans le couvert végétal. Les facteurs naphthogéniques contrôlent 12 % à 16 % de la variabilité de la composition chimique des espèces végétales dominantes, affectant les caractéristiques optiques en modifiant la concentration et la composition en chlorophylle. La végétation feuillue sous stress géochimique présente des spectres de réflexion infrarouge distincts et affiche une coloration automnale plus précoce.

Ces processus s'alignent sur le concept global de la « respiration liquide-gaz-minéral » de la Terre. Les gaz épigénétiques migrent dans l'atmosphère par filtration directe à travers les failles et les zones à haute perméabilité, ou par dégazage secondaire des dépôts de surface.

Par conséquent, des concentrations anomaux de gaz d'hydrocarbures, de micro-organismes oxydant les HC et d'aérosols organiques sont observées dans l'air proche de la surface au-dessus des gisements de pétrole et de gaz, modulant le rayonnement solaire diffusé enregistré dans les images de télédétection.

2.2 Modèle thermique

La surface de la Terre subit deux flux thermiques opposés : le rayonnement solaire et la chaleur endogène profonde. La signature thermique de surface est la somme de composantes à haute fréquence et à basse

fréquence. Les données expérimentales provenant de diverses régions pétrolières confirment un lien définitif entre les anomalies thermiques proches de la surface, les réservoirs d'HC sous-jacents et les perturbations tectoniques. Le flux de chaleur provenant des profondeurs le long des zones de failles et de fractures produit généralement des anomalies thermiques positives.

3. Formation des anomalies dans les champs physiques

Tous les éléments naturels existent au sein de la matrice énergétique des champs physiques de la Terre. Ces champs couvrent un vaste spectre — allant des champs gravitationnels globaux aux forces intra-atomiques — et comprennent six types principaux : magnétique, gravitationnel, thermique, électrique, sismique et radioactif. Aux côtés de ces champs naturels (passifs), des champs artificiels (actifs) sont générés pour des besoins techniques et d'exploration.

Les champs physiques servent de conduits primaires de données concernant les structures subsurfaciques profondes. L'information est transmise à distance depuis des sources profondes (par ex., gisements minéraux) vers la surface.

Des processus secondaires (épigénétiques) transforment un gisement minéral en une cible très distincte dont les paramètres (température, polarisabilité, résistivité, etc.) contrastent fortement avec les roches encaissantes environnantes. Par exemple, les accumulations d'hydrocarbures peuvent former des piles galvaniques naturelles, se manifestant à la surface sous forme d'anomalies du champ électrique naturel. Les zones de minéralisation en sulfures servent d'électrodes naturelles, et les limites des anomalies correspondent étroitement aux contours du réservoir.

Physiquement, un gisement minéral représente une zone d'énergie anormale dans un état d'équilibre. Des interventions externes — telles que l'interaction avec le champ magnétique terrestre — perturbent cet état. En créant une condition de déséquilibre au sein du système géologique, une réponse très spécifique (caractéristique uniquement de ce type particulier de minerai) peut être obtenue et identifiée via des méthodes d'exploration à distance spécialisées.

4. Mécanisme de transfert d'énergie-information

Le concept de transfert d'énergie-information implique la transmission des caractéristiques structurales et fonctionnelles d'une substance à travers des processus ondulatoires à l'aide d'une fréquence porteuse. Le phénomène forme un « portrait ondulatoire (spectral) » individuel dans le milieu environnant, reflétant sa capacité de rayonnement unique. Dans la technologie « Poisk », le champ magnétique terrestre sert de fréquence porteuse, garantissant une atténuation nulle et préservant les caractéristiques spectrales de la cible profonde.

4.1 Spécificités du mécanisme :

- **Équilibre dynamique** : À l'état stationnaire, la matière maintient un équilibre dynamique avec le champ de rayonnement, absorbant et réémettant continuellement de l'énergie. Tout élément

structural laisse son empreinte spécifique dans le champ en modifiant l'amplitude, la fréquence, la phase ou la polarisation de l'onde.

- **Caractère sélectif (adressé) :** Seuls les objets ou particules unifiés par la même onde résonante participent à l'interaction, limitant la boucle du système.
- **Action à longue portée :** Contrairement au rayonnement isotrope, dont la densité diminue avec le carré de la distance, le rayonnement transmis via une onde résonante ne s'atténue qu'en raison de la dissipation.

5. Propriétés spectrales des minéraux utilisées dans la technologie « Poisk »

Les données satellite dans la gamme de 0,4 à 2,5 μm — englobant le visible, le proche infrarouge (VNIR) et l'infrarouge à ondes courtes (SWIR) — sont diagnostiques pour la cartographie minéralogique et lithologique. En raison de profils d'absorption spectrale distinctifs, les altérations hydrothermales et les zones minéralisées peuvent être différenciées et cartographiées.

- **Oxydes et hydroxydes de fer :** Les minéraux tels que l'hématite, la jarosite, la limonite et la goethite présentent des caractéristiques d'absorption nettes dans la gamme VNIR (0,4–1,1 μm), marquant principalement les zones d'altération hydrothermale associées aux porphyres cuprifères et aux corps minéralisés apparentés.
- **Minéraux hydroxylés et carbonates :** Les biotites, les minéraux argileux, la muscovite, l'alunite, le gypse et les carbonates présentent des traits d'absorption diagnostiques dans la gamme SWIR.
- **Groupe du quartz/silice :** En raison de sa structure cristalline interne, le quartz présente une signature d'absorption proéminente entre 8,3 et 9,1 μm .

Pour obtenir une identification précise, les algorithmes de traitement se réfèrent aux bibliothèques spectrales de laboratoire mondiales, notamment la bibliothèque de l'US Geological Survey (USGS) (0,35–2,5 μm), la bibliothèque de l'Université Johns Hopkins (JHU) (2–25 μm) et la base de données du Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA (0,4–2,5 μm).

6. Efficacité de la technologie pour divers types de minéraux

6.1 Hydrocarbures

Le principal bénéfice économique de l'introduction de la méthode RMN réside dans la réduction massive de l'exploration sismique coûteuse et des forages d'exploration. Historiquement, la découverte de gisements majeurs nécessitait le forage de dizaines de puits « secs » (par ex., 200 puits en mer du Nord avant des découvertes majeures ; 46 puits pour le gisement de Prudhoe Bay en Amérique du Nord). Étant donné que les coûts d'exploration continentale standard s'élèvent à environ 7 millions de dollars pour 3 puits standards, l'application de la technologie RMN « Poisk » minimise la probabilité de trous secs, économisant au moins 4,5 millions de dollars par gisement découvert, avec des marges d'atténuation des coûts encore plus élevées enregistrées dans les opérations sur le plateau continental (offshore).

6.2 Minéraux métalliques

La technologie localise directement les accumulations industrielles de métaux non ferreux, ferreux, précieux et de terres rares. Sa résolution spatiale sans précédent offre un avantage concurrentiel majeur par rapport à la géophysique traditionnelle. La minéralisation métallique forme souvent de petites poches disséminées ou de fines veinules ; les méthodes traditionnelles meulent ces propriétés sur de grands volumes de roche, faisant chuter le signal sous les seuils de sensibilité. De plus, « Poisk » excelle dans la cartographie indirecte. Par exemple, les concentrations d'or sont souvent trop minimes pour une détection directe à distance. Cependant, l'or s'associe spatialement avec des sulfures guides (pathfinders), qui apparaissent en pourcentages élevés et sont facilement cartographiés par RMN. La délimitation de ces amas de sulfures optimise les marges d'investissement d'exploration en réduisant les volumes de forage requis d'ordres de grandeur.

6.3 Minéraux non métalliques et dégazage des mines

Le complexe RMN cartographie efficacement les bassins houillers, les kimberlites diamantifères et les réseaux d'eau géothermique. Une application vitale comprend la cartographie des réseaux de fractures structurales, de la densité des failles et des poches d'accumulation de méthane de houille. La délimitation préalable de ces zones de danger fournit un outil vital pour planifier des trajectoires de dégazage proactif dans les mines de charbon, assurant la sécurité opérationnelle.

7. Algorithme de la technologie « Poisk » appliquée à la localisation des hydrocarbures

7.1 Cadre physique fondamental

Le complexe géophysique « Poisk » intègre des données de télédétection avec un traitement d'images satellite propriétaire basé sur les principes de la RMN. Il cartographie les périmètres d'exploration, évalue les profondeurs des réservoirs, identifie les failles actives et fournit des évaluations préliminaires des ressources. L'architecture opérationnelle repose sur deux phénomènes subsurfaciques clés :

- **1. Migration gaz-substance** : Les HC volatils diffusent vers le haut, générant un halo de dispersion localisé et des anomalies de concentration en métaux traces dans le sol proche de la surface.
- **2. Transformation minérale souterraine** : Les accumulations souterraines d'HC entraînent des réactions chimiques qui forment des oxydes métalliques spécifiques et des minéraux métallifères dans les strates hôtes. Ceux-ci altèrent les propriétés magnétiques locales et génèrent des spectres de champ électromagnétique distincts au sol.

À l'aide d'appareils spectraux spécialisés à haute sensibilité comprenant des radiomètres de modulation de mesure avec modulation profonde automatique, ces champs sont enregistrés sur des images cosmiques analogiques sous forme de zones de « luminosité accrue ».

7.2 Étapes du flux de travail de la technologie

- **Reconnaissance spatiale prédictive** : Des balayages initiaux de télédétection sont effectués pour détecter et délimiter les anomalies régionales et calculer les profondeurs des réservoirs cibles en 2 à 3 points de contrôle.
- **Classification multispectrale des anomalies** : Des imageries satellite haute résolution numériques et analogiques dans les spectres visible, IR, UV et non visible sont interprétées pour catégoriser les anomalies (pétrole, gaz, condensat de gaz). Les spectres visibles réfléchis délimitent les halos de dispersion primaires, tandis que les signatures de champ électromagnétique non visibles sont visualisées sous forme de zones de haute luminosité.
- **Visualisation des limites** : Les données satellite subissent un traitement ciblé pour exposer les périmètres précis des gisements.
- **Modélisation de coupes géologiques** : Des coupes transversales schématiques sont construites à travers les points de mesure, identifiant le nombre d'horizons et les épaisseurs utiles.
- **Évaluation des ressources** : Les réserves préliminaires des réservoirs sont calculées via des méthodes d'estimation probabilistes dérivées des limites géométriques calculées.
- **Sélection du site de forage** : Des coordonnées précises sont fixées pour les puits de production commerciale.
- **Rapports** : Des jeux cartographiques et des synthèses finales d'exploration sont générés.

7.3 Activités spécifiques de terrain et de laboratoire

- **Étalonnage des équipements** : Les équipements géophysiques stationnaires sont étalonnés, et des jeux de données de fréquences satellite numériques régionaux sont compilés.
- **Profilage géochimique de référence** : Des échantillons de pétrole fournis par le client à partir de puits de référence voisins sont analysés pour indexer la composition organométallique de référence et enregistrer les spectres RMN de référence.
- **Activation de la matrice** : Des matrices organométalliques « de test » et « de travail » sont fabriquées et activées via des étapes radiochimiques spécialisées pour stocker le pétrole cible et les spectres métalliques de référence.
- **Chimie d'image brevetée** : Les images analogiques sur papier photographique sont traitées avec des réactifs chimiques personnalisés, des phosphores, des sensibilisateurs et des poudres ultra-fines de métaux rares et de niobate de lithium. Cela amplifie la luminescence (intensité d'éclat) directement au-dessus de l'anomalie d'hydrocarbures.
- **Irradiation gamma** : Les images satellite analogiques traitées sont stabilisées au sein de champs de rayonnement gamma contrôlés avant le décodage final.
- **Calculs de profondeur par parallaxe** : Pour résoudre les profondeurs entièrement depuis l'espace, les opérateurs mesurent le « déplacement » physique (décalage) de la limite entre deux images satellite analogiques capturées simultanément depuis deux satellites distincts opérant à des angles d'inclinaison orbitale différents. Cela nécessite un jeu de six images analogiques haute résolution par zone d'anomalie pour cartographier 2 à 3 points d'étalonnage.

Note sur la fiabilité statistique : L'intervalle de confiance statistique vérifié pour les métriques de cartographie structurale (délimitation des anomalies prospectives, détermination du nombre de réservoirs, des profondeurs et des épaisseurs de couche) se situe entre 60 % et 70 %.

8. Annexe : Sur le problème de l'écho de spin dans la théorie de la RMN

Prof. V. A. Puhly, Dr. Sc. & N. I. Kovalev, Ph. D.
Université d'État de Sébastopol (SevSU)

Résumé

Cet article examine la technique d'écho de spin de Hahn. Pour résoudre le problème de Cauchy initial constitué des équations de Bloch, nous proposons une approche analytique basée sur une méthode modifiée d'approximations successives. Les résultats obtenus sont comparés aux valeurs théoriques et expérimentales connues, démontrant une bonne concordance.

Solution mathématique fondamentale

La dynamique transitoire de la aimantation nucléaire est modélisée via les équations différentielles classiques de Bloch, suivant le mouvement des moments magnétiques (I) à travers trois composantes spatiales :

$$\begin{aligned}dM_x/dt - \gamma(M_y H_z - M_z H_y) + (1/T_2^*)M_x &= 0 \\dM_y/dt - \gamma(M_z H_x - M_x H_z) + (1/T_2^*)M_y &= 0 \\dM_z/dt - \gamma(M_x H_y - M_y H_x) + (1/T_1)(M_z - M) &= 0\end{aligned}$$

Pour évaluer ces équations sans les erreurs d'idéalisation traditionnelles, le système est converti dans un cadre coordonné adimensionnel :

$$\tau = |\gamma|H_1 t, \quad \beta^* = 1/(|\gamma|H_1 T_2^*), \quad \alpha = 1/(|\gamma|H_1 T_1), \quad \delta = \Delta\omega/(|\gamma|H_1)$$

Donnant le système matriciel linéaire normalisé :

$$\begin{aligned}du/d\tau + \beta^* u + \delta v &= 0 \\dv/d\tau + \beta^* v - \delta u + M_z &= 0 \\dM_z/d\tau + \alpha M_z - v &= \alpha M\end{aligned}$$

Où la composante u représente le signal de dispersion en phase (χ'), et la composante v représente le signal de puissance d'absorption en quadrature (χ''). La composante χ'' module le facteur de qualité (Q) du circuit de la bobine RF réceptrice, tandis que χ' induit un désaccord de fréquence. Le système est résolu analytiquement en utilisant une méthode modifiée d'approximations successives dans des polynômes de Tchebychev décalés. Contrairement aux schémas d'itération standard de Picard, ce cadre évite d'avoir à satisfaire aux conditions aux limites à chaque étape intermédiaire, atteignant une convergence rapide. Ce cadre mathématique prouve que lors de la mesure de champs magnétiques faibles (comme le champ magnétique terrestre), la technique de l'écho de spin augmente artificiellement la aimantation nucléaire à l'aide d'un champ auxiliaire, permettant un suivi précis de l'induction nucléaire sous 0,5 Gauss. Cela

sous-tend le développement de magnétomètres embarqués qui fournissent des cartes absolues du champ magnétique, quelle que soit l'orientation précise du capteur.

Voir présentation avec calcul, en langue russe uniquement. [Группа Поиск и Севастопольский университет. Технология поиска полезных ископаемых. Основные научные положения.](#)