

М.А. ПРИМІН

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна,
e-mail: priminna@meta.ua.

О.В. БУРЧАК

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна,
e-mail: ovburchak57@gmail.com.

І.В. НЕДАЙВОДА

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна,
e-mail: igorvlad63@meta.ua.

О.К. БАЛАЛАЄВ

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна,
e-mail: ftirigtm@gmail.com.

**ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ БЕЗКОНТАКТНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
ЗРАЗКІВ ТВЕРДИХ ПРИРОДНИХ ВУГЛЕВОДНІВ:
ПОПЕРЕДНІ ЕКСПЕРИМЕНТИ**

Анотація. Створено надчутливий магнітометричний комплекс на основі низькотемпературних СКВІД для безконтактних досліджень магнітних властивостей твердих вуглеводнів. Розроблено технологію реєстрації, оброблення та аналізу даних магнітометричних вимірювань. Наведено результати експериментальних досліджень магнітних властивостей зразків вугільної речовини.

Ключові слова: СКВІД-сенсор, магнітометрична система, інформаційна технологія, вугільна речовина, природні вуглеводні.

ВСТУП

Відмова від вугілля як енергоносія є світовою тенденцією стосовно вуглефікованої органіки. Це спричинило появу нової наукової проблеми — керування властивостями речовини та процесами, які відбуваються у ній. Кам'яне вугілля — полікомпонентна, гетерогенна, високомолекулярна речовина, що має метастабільний стан. Перехід із квазістійкої рівноваги до більш стійкого стану відбувається під впливом зовнішніх факторів та зумовлений різноманітністю енергетично вигідних структурних трансформацій речовини зі зміною її стану, складу та властивостей.

Під час дослідження метастабільних матеріалів перевагу надають безконтактним методам, які дають змогу оцінювати стан речовини та умови перетворень у ньому без впливу на об'єкт. Надчутлива СКВІД-магнітометрія — це один з таких перспективних методів неруйнівного контролю (СКВІД; SQUID — Superconducting QUantum Interference Device). Використання СКВІД-магнітометрії для вивчення процесів у вуглефікованій органіці зумовлене високим вмістом парамагнітних центрів (ПМЦ, спін/грам) у структурі макромолекул вугільної речовини. Взаємодія магнітного поля ПМЦ або їхніх кластерів із зовнішнім магнітним полем (наприклад, полем підмагнічування зразка) спричиняє посилення спін-спінової взаємодії, що, у свою чергу, може ініціювати спінові переходи в кластері у момент його збудженого стану та подальшого переходу кластера у більш вигідну за енергією конфігурацію [1].

Ми вважаємо, що метою безконтактних СКВІД-магнітометричних досліджень може бути контроль за станом електричних та магнітних властивостей речовини після впливу на неї зовнішніх факторів різної природи та інтенсивності. Це може стати основою для формування обґрунтованих уявлень про механізми

структурних та функціональних перетворень у твердих вуглеводнях. Наші попередні дослідження засвідчили, що запропонований метод експериментальних досліджень є інформативним [1, 2]. Зокрема, за допомогою методів СКВІД-магнітометрії вперше експериментально доведено, що зміни магнітної сприйнятливості зразків вугілля пов'язані зі структурними перетвореннями речовини на атомно-молекулярному рівні під впливом зовнішніх силових полів [3, 4]. Цей факт дає змогу в перспективі визначити фрагменти структури твердих природних вуглеводнів, які є осередками акумулювання енергії. Вивільнення цієї енергії за певних умов може ініціювати процеси спонтанної чи керованої трансформації вугільної речовини.

У статті розглянуто принципи побудови програмно-апаратного комплексу надчутливої СКВІД-магнітометричної системи для безконтактних досліджень зразків вугільної речовини, а також наведено деякі експериментальні результати для різних серій вимірювань.

ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ СКВІД-МАГНІТОМЕТРИЧНИЙ КОМПЛЕКС

Відомо, що на початкових етапах досліджень магнетизму вугілля було встановлено, що за умов кімнатної температури вугільні породи переважно діамагнітні з наявністю парамагнітних включень та великими змінами значень магнітної сприйнятливості. Вважали, що, не зважаючи на велику концентрацію ПМЦ, основний внесок у загальний парамагнетизм додають мінеральні компоненти, а не органічні вільні радикали. Інакше кажучи, на початковій стадії досліджень парамагнетизм та феромагнетизм вугілля асоціювали з магнітними домішками, але не з вуглецевою матрицею.

Сучасні теоретичні та експериментальні дослідження також вказують на те, що вуглець у всіх його різноманітних бездефектних поліморфних видозмінах зазвичай діамагнітний. Однак у недосконалих вуглецевих структурах має місце як органічний суперпарамагнетизм, так і високотемпературний феромагнетизм. У кожному з цих випадків і видозмін рівень магнітних сигналів від вугільної речовини у навколишньому просторі дуже слабкий. Тому для реєстрації таких слабких сигналів потрібно використовувати магнітометричні системи, рівень власних завад (чутливість) яких становив би величину порядку 1 фемтоТесла в одиничній смузі частот. На сьогоднішній день подібні характеристики мають лише надпровідникові магнітометри на основі СКВІДів [5, 6], а застосування градієнтометричної схеми реєстрації сигналу дає змогу вилучати з даних магнітне поле Землі і використовувати СКВІД-градієнтометри в спеціально неекранованому приміщенні. Оскільки зараз не існує приладів на основі серійних СКВІД-магнітометрів, для подібних досліджень було розроблено та створено експериментальний прототип такої магнітометричної системи та проведено цикли експериментальних досліджень магнітних властивостей зразків вугільної речовини. Основу вимірювальної системи становить одноканальна СКВІД-система з приймальним аксіальним градієнтометром (антенною) другого порядку $\frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2}$ на спеціальному зонді.

Кріостат з вимірювальним зондом розміщено та зафіксовано в центрі системи підмагнічування, яка складається з двох пар котушок Гельмгольца на квадратних каркасах, що дає змогу змінювати магнітне поле B_x і B_y амплітудою до кількох міліТесла у взаємно перпендикулярних напрямках горизонтальної площини. Аксіальний градієнтометр другого порядку виготовлено за схемою включення приймальних витків (2 : 4 : 2) (+2 – 4 + 2); діаметр витків дорівнює 8 мм,

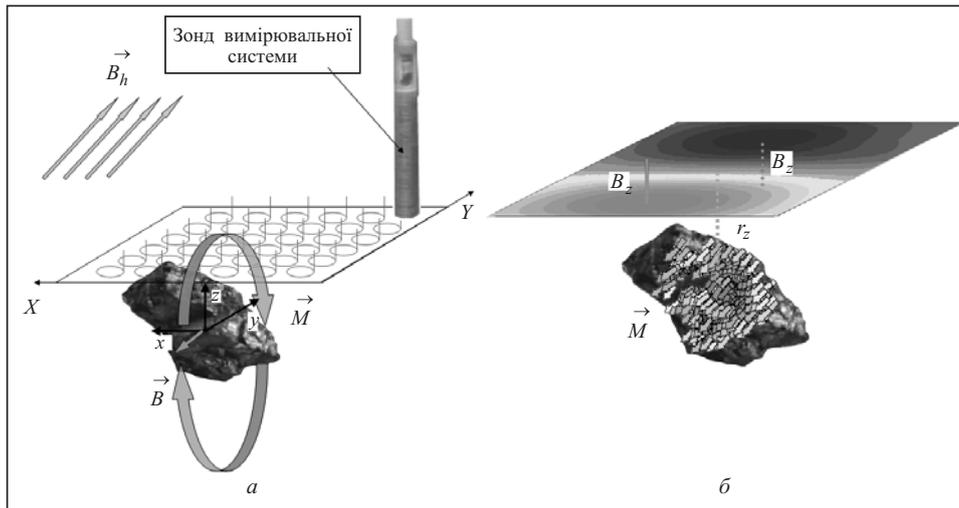


Рис. 1. Схема розташування у просторі сітки вимірювань (а) та просторовий розподіл магнітного поля (магнітна карта) досліджуваного зразка у межах області вимірювань (б)

а величина бази — 30 мм. Приймальні витки градієнтметра розміщені в центральній частині котушок Гельмгольца, де поле підмагнічування максимально однорідне і паралельне горизонтальній площині XU . Досліджувані зразки закріплюють на рухомій платформі для переміщення у площині XU так, щоб вони були безпосередньо наближені до дна нерухомого кріостата з приймальним градієнтметром СКВІД-системи. Принцип роботи магнітометричної системи ґрунтується на вимірюванні магнітної сприйнятливості зразка вугільної речовини, який переміщують у центрі котушок Гельмгольца, що генерують однорідне поле підмагнічування частотою 80 Гц. При цьому СКВІД-градієнтметр безконтактно реєструє магнітний сигнал зразка в 36 вузлах квадратної сітки з кроком 12 мм між ними (рис. 1). Магнітний сигнал реєструють із частотою кілька кілогерців, тому крива сигналу складається з окремих «фрагментів», що відповідають окремим «моментом» часу. На основі 36 синхронних усереднених кривих за допомогою алгоритмів двовимірної інтерполяції будуються «миттєві» (для кожного моменту часу) карти розподілу магнітного поля. Отримана двовимірна карта розподілу магнітного сигналу — це основа для подальшого оброблення та просторової локалізації джерел сигналу в об'ємі речовини та оцінювання їхньої концентрації. Зауважимо, що темніша гама кольорів на рис. 1, б відповідає позитивним значенням сигналу, а світла — негативним.

Розміри сітки реєстрації магнітних сигналів зразків збігаються з межами квадрата зі стороною 60 мм за взаємно перпендикулярними напрямками X і Y . Зовнішній вигляд магнітометричної системи показано на рис. 2.

Зауважимо, що суттєвою наукомісткою компонентою, яка визначає можливість та досягнення у прикладному використанні таких технічних систем, є створення інформаційної технології для інтерпретації результатів магнітометричних вимірювань, що потребує теоретичного обґрунтування та створення нових математичних моделей і методів відновлення просторово-часового відображення джерел поля.

Алгоритм оброблення магнітних сигналів. Магнітометричну систему можна умовно подати у вигляді кількох модулів. Перший модуль (вимірювальний) складається з СКВІД-сенсора, антен, розміщених у кріостаті з рідким гелієм, та електроніки зчитування сигналів. Другий модуль (керувальний) формують електронний блок та мікропроцесорне керування роботою всієї системи,

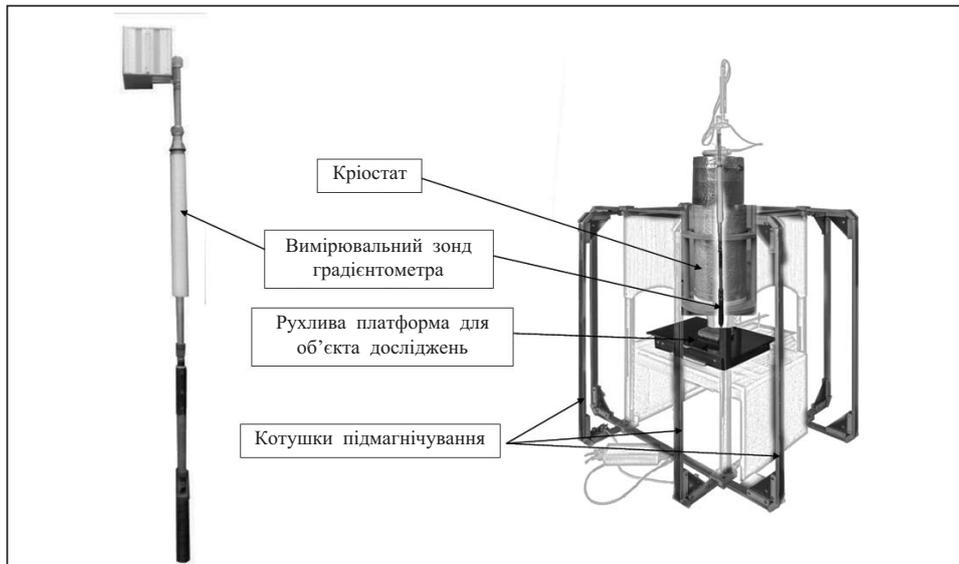


Рис. 2. Зовнішній вигляд СКВІД-магнітометричної системи для дослідження магнітних властивостей зразків вугільної речовини

блок живлення котушок підмагнічування. Третій модуль (програмний) забезпечує комп'ютерне оброблення сигналів, відображення та їхній аналіз з використанням прикладного пакета програм. Для просторової фіксації даних під час магнітометричного дослідження використовують точки спостереження — вузли перетину квадратної сітки ($6 \times 6 = 36$ вузлів).

Робота програмного комплексу магнітометричної системи виконується у два послідовні етапи:

- уведення сигналів, збереження результатів вимірювань у базі даних та їхнє цифрове передоброблення;
- виділення інтервалу часу для дослідження і просторово-часовий аналіз магнітного сигналу та його джерел.

Основним завданням першого етапу досліджень магнітного поля, крім безпосереднього уведення та збереження даних вимірювань, є виокремлення та очищення сигналів від завад. При цьому пакет початкового оброблення магнітних сигналів включає три логічно розділені програмні блоки: блок введення даних з вимірювальної системи в комп'ютер; база даних магнітометричних досліджень; передоброблення сигналів.

Після цифрової фільтрації та усереднення магнітометричних записів (після виконання передоброблення) стає можливим дослідження та оцінювання магнітного сигналу об'єкта. Це завдання виконує пакет програм магнітометричної системи, який містить блок програм дослідження усереднених магнітометричних сигналів у заданих точках площини вимірювань, а також блок програм розв'язання оберненої задачі магнітостатики для різних моделей джерела сигналу.

На другому етапі виконується також візуалізація та аналіз просторових розподілів вимірюного магнітного поля та його джерел, а також оцінюється часова динаміка їхніх змін. На рис. 3 показано алгоритм оброблення досліджуваного магнітного сигналу об'єкта.

Алгоритм розв'язання задачі визначення джерел магнітного сигналу за даними вимірювань магнітного поля. На цьому етапі досліджень задача формулюється в такому вигляді. Нехай в деякому об'ємі простору відомі характеристики магнітного поля. Потрібно визначити місце розташування джерела

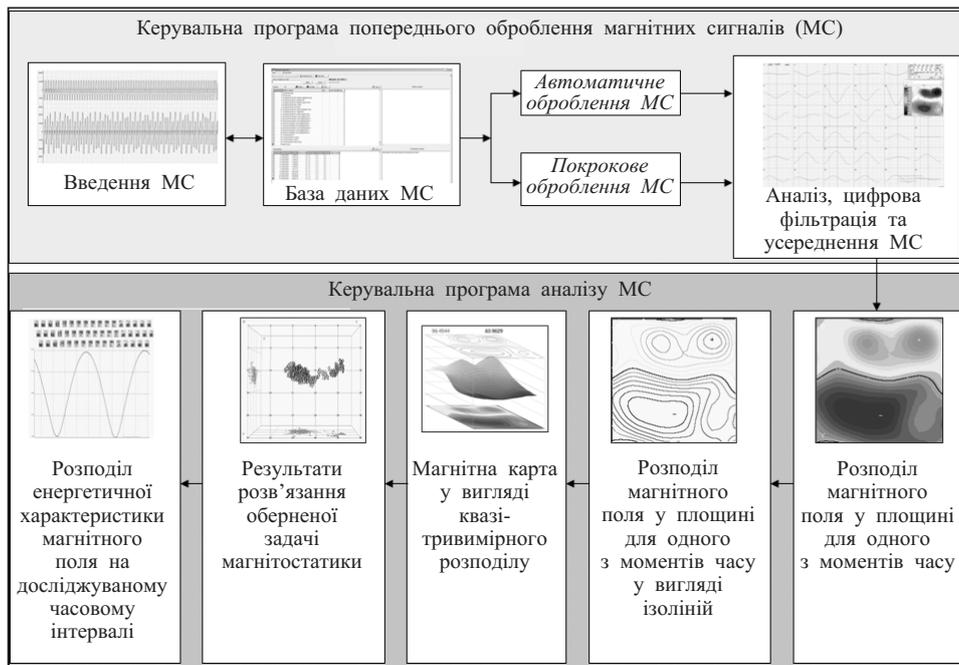


Рис. 3. Послідовність реєстрації, оброблення та аналізу магнітного сигналу

поля в системі координат, пов'язаній із заданим об'ємом простору, та параметри джерела, що характеризують його як магнітний об'єкт (вектор магнітного моменту, просторовий розподіл вектора густини струму і т.д.). За своєю суттю це обернена задача магнітостатики, оскільки частоти магнітного поля в такому випадку фіксовані і їхні значення наближаються до нуля. Обернена задача у магнітостатиці — це знаходження просторового розподілу джерел поля за відомими (зазвичай вимірними) значеннями величин параметрів поля. Функціональні зв'язки між параметрами розподілу, а також типом джерел поля та вимірними значеннями величин поля вважають невідомими і їх також потрібно визначити. Загалом у такій «класичній постановці» розв'язок оберненої задачі магнітостатики є неоднозначним. Тому для тривимірних задач потрібно вводити низку обмежень: наприклад, припускати (якщо це можна обґрунтувати), що магнітне поле створює точкове джерело, декілька джерел, розподілені як незалежні у тривимірному об'ємі або двовимірний шар струму в площині, яка паралельна площині вимірювань. У цьому випадку обернену задачу можна розв'язати однозначно, і такий підхід застосовують для багатьох практичних задач [7, 8]. До того ж коли як модель джерела сигналу використовують модель магнітного диполя, то розв'язок оберненої задачі можна отримати аналітично.

Ідея аналітичного методу розв'язання оберненої задачі базується на використанні властивостей тензора просторових похідних вектора магнітної індукції в однорідному, немагнітному, непровідному середовищі (у точках вимірювання $\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$, $\operatorname{curl} \mathbf{B} = 0$). У цьому випадку тензори перших (D_1) і других (D_{2i} , $i = x, y, z$) просторових похідних вектора \mathbf{B} є симетричними, не мають сліду, але мають такі властивості: їхні власні значення дійсні і різні; власні вектори незалежні та ортогональні; мають діагональний вигляд у системі координат, базисом якої є власні вектори. Інакше кажучи, коли як базис нової системи координат прийняти нормовані власні вектори D_1 або D_2 , можна аналітично розв'язати

ти обернену задачу спочатку у системі координат власних векторів, а потім шляхом зворотного переходу — у заданій. Дослідження [7, 8] показують, що для повного аналітичного розв'язання оберненої задачі магнітостатики в такій постановці (джерело — магнітний диполь) потрібна магнітометрична система, у якій можна було б виміряти одночасно в одній точці спостереження всі незалежні елементи D_1 або D_{2i} . Якщо магнітометрична система складається з градієнтометрів першого порядку, то кількість незалежних елементів тензора складає п'ять: три недиагональні $\frac{\partial B_x}{\partial y}$, $\frac{\partial B_x}{\partial z}$, $\frac{\partial B_y}{\partial z}$ і два діагональні $\frac{\partial B_x}{\partial x}$, $\frac{\partial B_y}{\partial y}$.

Щоб визначити відстань до джерела, потрібно знати також й B_x . Отже, для локалізації дипольного джерела сигналу потрібна 6-канальна магнітометрична система або дані вимірювання, використання яких дало б змогу отримати незалежні елементи тензора просторових похідних D_1 . Аналогічно показано [7, 8], що задачу можна розв'язати повністю аналітично, якщо відомі (виміряні або обчислені за даними вимірювань) п'ять незалежних елементів одного з тензорів D_{2i} та відповідна перша похідна.

Отже, якщо для реєстрації магнітного поля використовують аксіальний градієнтометр другого порядку з трансформатором магнітного потоку, утвореним з витків радіуса R , відстанню між витками L (половина «базису» градієнтометра) і схемою включення $\langle +2 : -4 : +2 \rangle$, то вихідний сигнал ψ вимірювального каналу має вигляд

$$\psi \approx 2B_z(r_x, r_y, r_z) - 4B_z(r_x, r_y, r_z + L) + 2B_z(r_x, r_y, r_z + 2L). \quad (1)$$

Значення величин ψ залежать від схеми включення трансформатора магнітного потоку градієнтометра і в нашому випадку виміряні в 36 вузлах сітки (див. рис. 1, а). Оскільки силові лінії магнітного поля в площині вимірювань замкнуті, не мають розривів і особливостей, значення величин параметра ψ можна визначити в довільній точці спостереження. У нашому випадку ці значення було знайдено в 961 точці площини вимірювань (крок сітки 0.2 см на кожній стороні квадрата) за допомогою алгоритмів двовимірного заповнення та інтерполяції даних.

Під час дослідження магнітного поля об'єкта (зразка вугільної речовини) його параметри вимірюють в повітрі у вузлах просторової сітки площини вимірювань, а максимальна відстань від площини нижнього витка антени вимірювача до джерела сигналу становить 2.0–3.5 см. За таких умов вимірювань в площині реєструється зазвичай різнополярний сигнал і, таким чином, проекція об'єму джерела магнітного сигналу (проекція фокуса джерела поля) для заданого моменту часу на площину вимірювань завжди знаходиться в межах області спостереження.

Тому вважатимемо, що магнітне поле в усіх точках спостереження є векторною сумою магнітних полів Q (0, 1, 2, 3, 4, ...) різних магнітних диполів з параметрами $\{r_1'', M_1\}, \dots, \{r_Q'', M_Q\}$. Інакше кажучи, вектор магнітної індукції можна визначити у такий спосіб:

$$B(r_x, r_y, r_z) = \sum_{i=1}^Q B(r_{xi}'', r_{yi}'', r_{zi}'', M_{xi}, M_{yi}, M_{zi}). \quad (2)$$

При цьому просторова конфігурація джерела магнітного поля задовольняє перерахованим вище обмеженням, але значення параметрів Q , $\{r_1'', M_1\}, \dots, \{r_Q'', M_Q\}$ довільні, невідомі та мають бути визначені за результатами магнітних вимірю-

вань. Тоді обернену задачу можна сформулювати так: за результатами вимірювань величин параметрів магнітного поля в площині вимірювань потрібно отримати оцінки можливої кількості джерел, їхнє взаємне розташування та вектори поляризації в лабораторній системі координат, а також оцінки їхньої відносної потужності.

Розв'язання задачі у такій постановці запропоновано в [9, 10], де на першому кроці виконують аналіз магнітного поля об'єкта досліджень у площині вимірювань та визначають просторовий розподіл величини інтенсивності градієнтів g і G магнітного поля у межах цієї площини. Значення g і G обчислюють з таких виразів:

$$g^2 = \left(\frac{\partial B_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial B_z}{\partial y} \right)^2,$$

$$G^2 = \left(\frac{\partial B_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial B_z}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial B_z}{\partial z} \right)^2.$$

У роботах [9, 10] показано, що довільному розподілу магнітного поля може відповідати карта розподілу градієнта в тих самих точках спостереження. Параметри g і G мають локальний максимум у точках площини вимірювання, які є фокусом проєкції відповідного джерела на цю площину. Їхню кількість, місце розташування та відносну потужність можна знайти, використовуючи алгоритм побудови діаграм Вороного [11]. Отже, можна припустити, що площина вимірювань містить незбіжні області, які є проєкцією об'єму джерела на площину вимірювань; кількість, місцезнаходження, межі та відносну потужність цих областей можна знайти під час аналізу інтенсивності градієнтів g і G величин параметрів магнітного поля. Загальний підхід та алгоритм перетворення даних, який дає змогу одержати значення величин вектора магнітної індукції та його похідних у кожній точці області вимірювань описано в [6, 7, 10]. Реалізація алгоритму не передбачає наявності попередньої інформації про моделі джерела поля, а з даних вимірювань магнітного сигналу, використовуючи апарат інтегрального перетворення Фур'є, можна отримати всі (зокрема, і компоненти вектора \mathbf{B}) потрібні вихідні дані для розв'язання оберненої задачі.

Оскільки у нашому випадку для вимірювання величин параметрів магнітного поля зразка вугільної речовини використано одноканальну СКВІД-магнітометричну систему з аксіальним градієнтметром другого порядку, результати вимірювань у заданих точках площини є однорідними і не відповідають вихідним даним для аналітичного розв'язання оберненої задачі. Тому ми покажемо, у який спосіб визначити необхідні величини з однорідних даних вимірювань з урахуванням просторової конфігурації перетворювача магнітного потоку (антени) і особливостей алгоритму вимірювань.

Алгоритм отримання незалежних елементів тензора просторових похідних магнітного поля з даних «однорідних» вимірювань. Просторові конфігурації антен магнітометрів і градієнтметрів другого порядку з надпровідного дроту зображено на рис. 4.

З урахуванням конструкції перетворювача потоку магнітометричної системи у нашому випадку маємо, що вихідний сигнал СКВІД-градієнтметра пропорційний другій просторовій похідній $\frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2}$. За допомогою алгоритмів дво-вимірної інтерполяції та гладкого поповнення даних можна визначити ці значення в $N \times N$ вузлах плоскої регулярної прямокутної решітки з кроком Δ (напри-

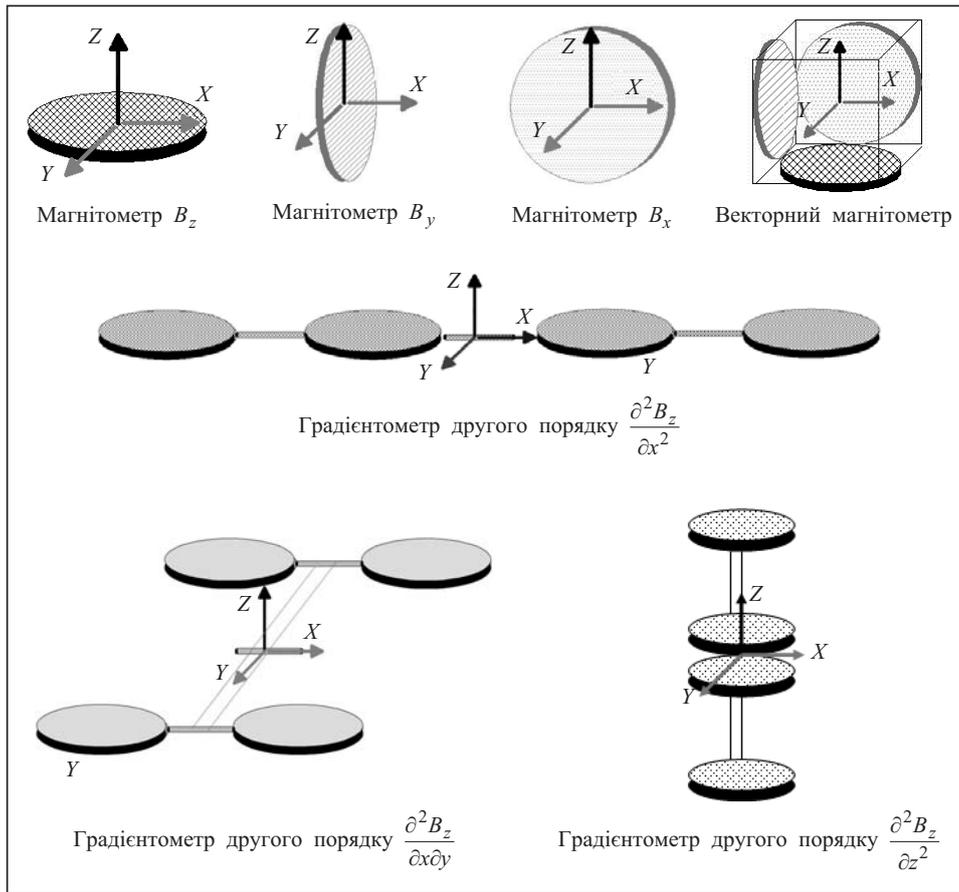


Рис. 4. Варіанти просторової конфігурації антен магнітометрів і градієнтометрів другого порядку з надпровідного дроту

лад, дрібнішим, ніж у вихідних даних вимірювань). А потім за отриманими даними визначити значення Фур'є-образу параметра Ψ у хвильовій площині:

$$F[\Psi](k_x, k_y) = \int \Psi(x, y, z) e^{-ik_x x - ik_y y} dx dy, \quad (3)$$

$$\Psi(x, y, z) = \int F[\Psi](k_x, k_y) e^{ik_x x + ik_y y} dk_x dk_y. \quad (4)$$

Зазначимо, що (3) і (4) — пряме та обернене перетворення Фур'є відповідно, а k_x, k_y — компоненти хвильового вектора.

Оскільки точки спостереження розташовані в немагнітному, непровідному однорідному середовищі (у повітрі), для вектора магнітної індукції справедливі однорідні рівняння Максвелла ($\text{div } \mathbf{B} = 0, \text{curl } \mathbf{B} = 0$), які у хвильовій площині мають вигляд

$$\begin{aligned} -ik_x F[B_x] - ik_y F[B_y] - \sqrt{k_x^2 + k_y^2} F[B_z] &= 0, \\ -ik_y F[B_x] - ik_x F[B_y] &= 0, \\ -\sqrt{k_x^2 + k_y^2} F[B_x] + ik_x F[B_z] &= 0, \\ -\sqrt{k_x^2 + k_y^2} F[B_y] + ik_y F[B_z] &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Звідси випливає, що у хвильовій площині значення вихідного сигналу СКВІД-системи та z -ї складової вектора магнітної індукції пов'язані простими аналітичними співвідношеннями:

$$F[B_z] = F[\Psi] \quad (6a)$$

для магнітометра ($\Psi \approx B_z$),

$$F[B_z] = \frac{F[\Psi]}{1 - 2e^{-L\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} + e^{-2L\sqrt{k_x^2 + k_y^2}}} \quad (6b)$$

для аксіального градієнтометра другого порядку ($\Psi \approx \frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2}$).

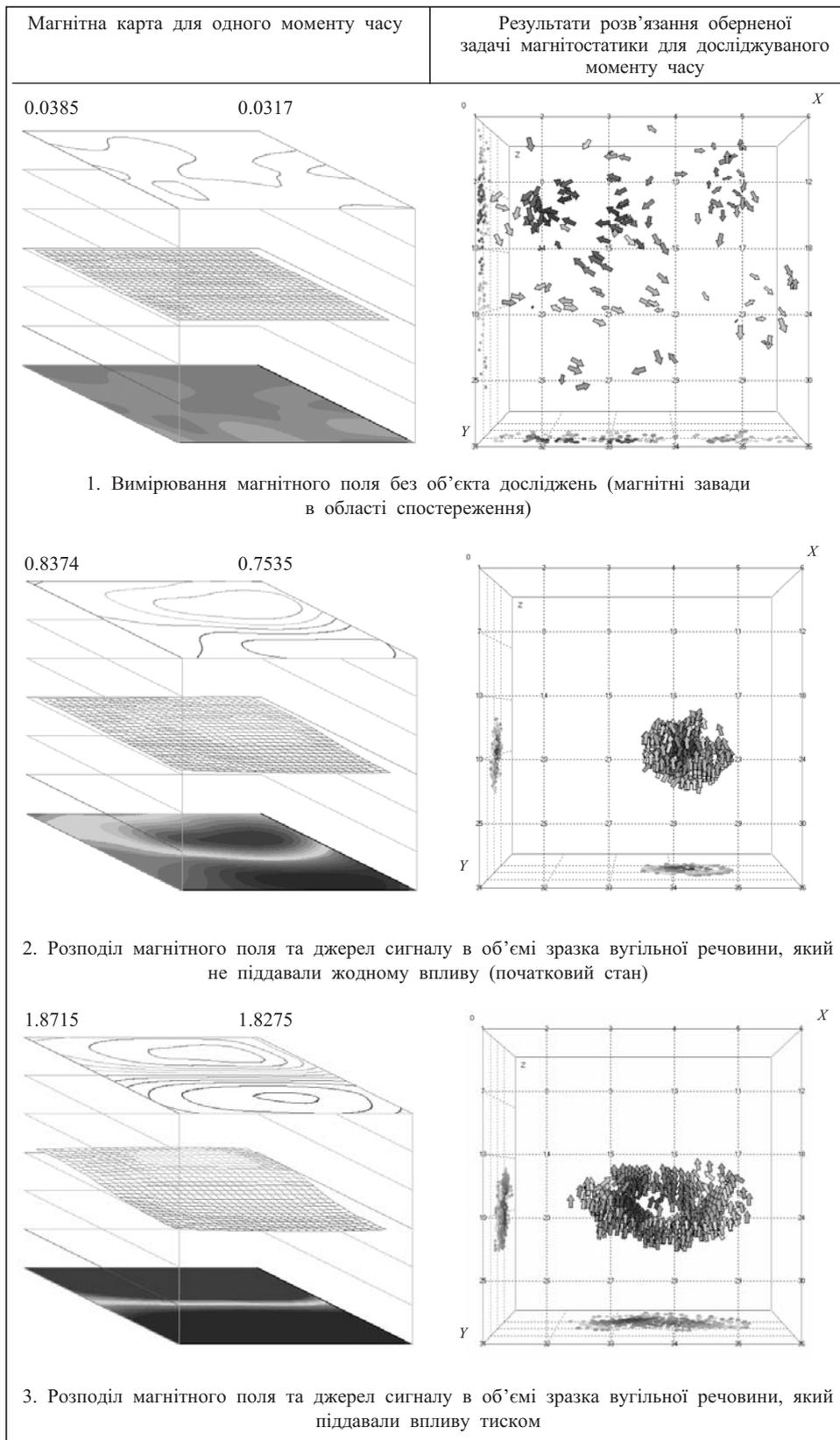
Враховуючи (3) і (4), отримуємо співвідношення для обчислення всіх компонентів вектора магнітної індукції та його просторових похідних за значеннями Фур'є-образу z -ї складової вектора магнітної індукції

$$\begin{aligned} F[B_x] &= -ik_x \frac{F[B_z]}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}}, \quad F[B_y] = -ik_y \frac{F[B_z]}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}}, \\ F\left[\frac{\partial B_x}{\partial y}\right] &= k_x k_y \frac{F[B_z]}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}}, \quad F\left[\frac{\partial B_y}{\partial x}\right] = k_y k_x \frac{F[B_z]}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}}, \\ F\left[\frac{\partial B_z}{\partial x}\right] &= -ik_x F[B_z], \quad F\left[\frac{\partial B_z}{\partial y}\right] = -ik_y F[B_z], \\ F\left[\frac{\partial B_z}{\partial z}\right] &= -\sqrt{k_x^2 + k_y^2} F[B_z]. \end{aligned} \quad (7)$$

Отже, ми отримали значення Фур'є-образів вектора магнітної індукції та його просторових похідних у кожній точці хвильової площини, а потім за допомогою оберненого перетворення Фур'є (4) — значення цих характеристик магнітного поля в точках спостереження, що дає повне розв'язання поставленої задачі.

ПОПЕРЕДНІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНИХ СИГНАЛІВ ЗРАЗКІВ ПРИРОДНИХ ВУГЛЕВОДНІВ

Як зазначено вище, практичне значення безконтактних магнітометричних досліджень зумовлене необхідністю розроблення нових методик вивчення властивостей вугільної речовини для отримання інформації про можливі механізми спонтанної чи керованої трансформації вугільної речовини. Для перевірки роботи алгоритмів перетворення магнітометричних даних було виконано низку серій експериментів з дослідження магнітних властивостей проб вугільної речовини з різних шахт України. Як джерело магнітного поля в цих дослідженнях використано магнітні носії різної об'ємної щільності та розмірів, розподілені у спеціальних капсулах та/або — на підкладках (зокрема і калібрувальні зразки). Деякі результати з реєстрації та перетворення даних магнітометричних вимірювань зразків вугільної речовини опубліковано в [2–4], а для демонстрації роботи програмно-апаратного комплексу на рис. 5 наведено результати досліджень для проб, які попередньо були піддані (не були піддані) зовнішньому впливу. Як матеріал проб використано вугільний порошок (фракція 0.16–0.08 мм) масою 5.35 г, що заповнював спеціальний немагнітний контейнер. Кожну пробу розташовували на предметному столі (див. рис. 2). Рівень магнітних сигналів (МС) для зразків, які було піддано зовнішньому впливу тиском (3), змінним електричним полем (4) та термічно-го (5), є вищим, ніж магнітний сигнал від проби у початковому стані (2).



Продовження рисунку на наступній сторінці

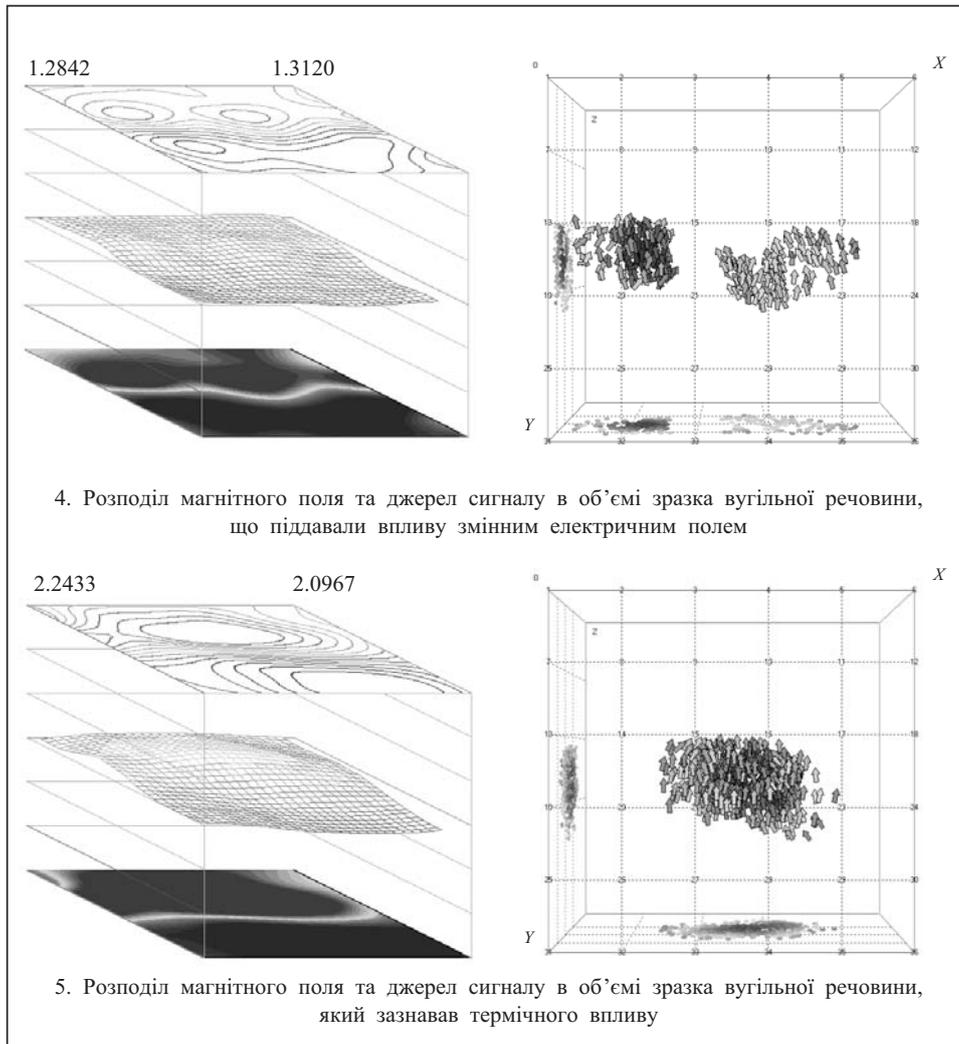


Рис. 5. Варіанти відображень вимірювань магнітного поля та результати розв'язання оберненої задачі для досліджуваних проб

Крім того, вплив змінним електричним полем призводить до найбільшої фрагментації джерела магнітного сигналу, знайденого після розв'язання оберненої задачі в об'ємі зразка.

Для кількісного аналізу та порівняння результатів вимірювань для кожного з 51 моменту часу та для кожного вимірювання було обчислено значення енергетичної характеристики магнітного поля (сума квадратів значень вихідного сигналу СКВІД-градієнтметра у всіх 36 точках спостереження). Результати обчислень показано у вигляді графіків (рис. 6) та гістограми (рис. 7) і відображають діапазон можливої варіації результатів вимірювань для досліджених проб вугільної речовини.

ВИСНОВКИ

Використання безконтактного магнітометричного контролю може забезпечити високу ефективність досліджень під час оцінювання впливу різних факторів (наприклад, тиску, температури) на магнітні властивості твердих вуглецевих матриць з метою керування їхнім станом, складом та властивостями. Отримані дані у перспективі можуть бути науковою основою для створення нових методів оцінювання параметрів електромагнітних процесів у вугіллі та розроблення перспективних технологій видобутку і перероблення вуглеводневих енергоносіїв.

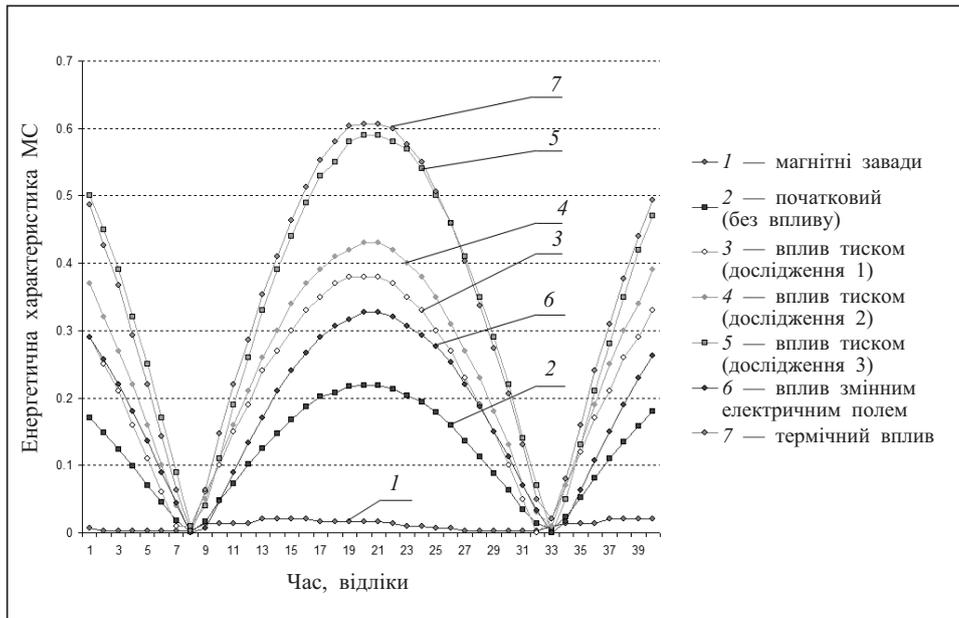


Рис. 6. Розподіл енергетичної характеристики магнітного сигналу зразків вугільної речовини

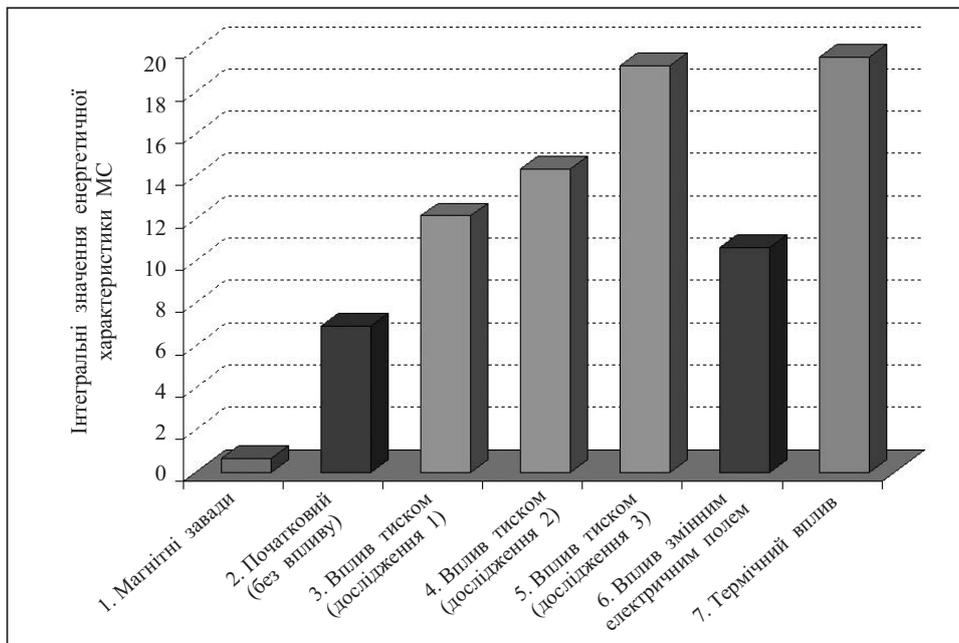


Рис. 7. Розподіл інтегральних значень енергетичної характеристики магнітного сигналу зразків вугільної речовини у вигляді гістограми

Інформацію про закономірності та механізми перетворень органічних сполук, отриману методом СКВІД-магнітометрії, можна використовувати для створення нового покоління процесів наносинтезу з метою отримання нових вуглецевих матеріалів із заданими властивостями, а також і вуглецевих наноструктур (фулеренів, карбину, нанотрубок, вуглецевих волокон тощо) у тому числі і інтеркалюванням графітових сіток.

Вилучення з кам'яного вугілля речовин з високою магнітною сприйнятливістю — магнетиків або отримання діаманетиків (піролітичний вуглець) може бути перспективнішим у практичному сенсі, ніж їхній синтез.

Отримані результати досліджень у перспективі допоможуть визначити умови активації структурних перетворень, наслідком яких може бути керування станом вугільного пласта та процесів у ньому, включаючи метаногенерацію, а також підвищення безпеки видобутку енергетичної сировини та ефективності її перероблення.

Розуміння природи магнітного сигналу у вуглецевих структурах може суттєво прискорити створення дешевих біосумісних вуглецевих магнітів, а це уможливить у медицині потужний поштовх для транспортування ліків до заданих органів для терапії та діагностики (наприклад, в онкології).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Burchak O.V., Sobolev V.V., Bezruchko K.A., Kovrov O.S., Kurliak A.V., Yakh K. Impact of weak electromagnetic fields on the properties of coal substance. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022. N 5. P. 66–73. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/046>.
2. Булат А.Ф., Богданов В.Л., Трачевський В.В., Бурчак О.В., Серіков Ю.А. Дослідження механізмів і рушійних сил самоорганізації матриць природних твердих вуглеводнів. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2021. № 3. С. 26–32. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2021.03.026>.
3. Булат А.Ф., Войтович І.Д., Бурчак О.В., Примін М.А., Недайвода І.В. Дослідження магнітної сприйнятливості вугільної речовини як показника енергетичного стану вугілля. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2013. № 6. С. 99–104. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/85776>.
4. Примин М.А., Недайвода И.В., Бурчак А.В., Сутковой П.И., Минов Ю.Д. Бесконтактные исследования и анализ магнитных сигналов образцов угольного вещества. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. 2017. № 16. С. 30–39. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/131507>.
5. Clarke J., Braginski A.I. SQUID Handbook. Vol. I. Berlin: Wiley-VCH 2006. Vol. II. Weinheim: Wiley-VCH, 2004. 634 p. <https://doi.org/10.1002/3527603646>.
6. Weinstock H. SQUID sensors: Fundamentals, fabrication and applications. NATO ASI Series, Series E: Applied Sciences. 1995. Vol. 329. 703 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-5674-5>.
7. Примин М.А., Гуменюк-Сычевский В.И., Недайвода И.В. Методы и алгоритмы локализации источника магнитного поля. Киев: Наук. думка, 1992. 92 с.
8. Primin M., Nedayvoda I. Mathematical model and measurement algorithms for a dipole source location. *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.* 1997. N 8. P. 119–131. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0031169716&partnerID=40&md5=d6213b27cf64c732bdffide892e77657>.
9. Primin M., Nedayvoda I. Inverse problem solution algorithms in magnetocardiography: New analytical approaches and some results. *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.* 2009. Vol. 29, N 3. P. 65–81. <https://doi.org/10.3233/JAE-2009-1001>.
10. Primin M.A., Nedayvoda I.V. Method and algorithm for obtaining elements of the tensor of spatial derivatives of the magnetic induction vector in the problem of magnetic anomalies search. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2019. Vol. 55, N 2. P. 336–346. <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00139-2>.
11. Atsuyuki O., Boots B., Sugihara K. Spatial tessellations: Concepts and applications of Voronoi diagrams. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, 1992. <https://doi.org/10.1002/9780470317013>.

M. Primin, O. Burchak, I. Nedayvoda, O. Balalaev

SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR NON-CONTACT INVESTIGATION OF SAMPLES OF SOLID NATURAL HYDROCARBONS: PRELIMINARY EXPERIMENTS

Abstract. An ultrasensitive magnetometric complex, based on low-temperature SQUIDS, has been created for non-contact studies of the magnetic properties of solid hydrocarbons. A technology for data recording, processing, and analyzing from magnetometric measurements has been developed. The results of experimental studies of the magnetic properties of coal samples are presented.

Keywords: SQUID sensor, magnetometric system, information technology, coal substance, natural hydrocarbons.

Надійшла до редакції 24.03.2023