

<https://doi.org/10.15407/csc.2024.01.062>
УДК 621.39

О.С. КРЯЧОК, кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 03056, м. Київ, просп. Берестейський, 37, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4829-635X>, alexandrkiachok@gmail.com

Н.В. МАКАРЕНКО, аспірантка, Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, 03187, м. Київ, просп. Академіка Глушкова, 40, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1416-2824>, makarenko.nataliia.v@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ТА АЛГОРИТМІВ СИСТЕМ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ДЖЕРЕЛ МАГНІТНИХ АНОМАЛІЙ

Здійснено аналіз моделей та алгоритмів локалізації джерел магнітних аномалій. Розглянуто методи локалізації джерел магнітних аномалій для випадку збору даних за допомогою роботизованих рухомих платформ. Запропоновано та реалізовано прикладне програмне забезпечення для оцінки даних вимірювань напруженості магнітного поля в задачах виявлення відхилень від визначеної нормалі.

Ключові слова: магнітна аномалія, локалізація, магнітне поле, геологія, магніторозвідка, алгоритм, програмне забезпечення.

Вступ

Сфери прикладного застосування методів локалізації магнітних аномалій надзвичайно різноманітні — від дослідження глибин океанів та геофізичних досліджень до сучасної археології. Основна ідея такого застосування ґрунтується на відносній прогнозованості величини магнітного поля Землі в різних ділянках досліджуваної області.

Теоретичне підґрунтя для практичного застосування розв'язку питань локалізації джерел магнітних аномалій сформоване багаторіч-

ними дослідженнями в області фізики, математики, геофізики, геології тощо. А проблемами безконтактної діагностики в екології, геології та біології займаються провідні науковці України та світу.

Питання локалізації джерел магнітних аномалій розглядається з урахуванням важливих аспектів. У випадку пошуку магнітної аномалії, як об'єкта, застосовуються системи магнітного пошуку з припущенням, що об'єкт та магнітометр рухаються один відносно одного, що є типовою ситуацією для обстеження, наприклад, підводних просторів. А за відсутності припу-

Цитування: Kriachok O.S., Makarenko N.V. Research of Models and Algorithms of Systems for Localization of Magnetic Anomalies Sources. *Control Systems and Computers*, 2024, 1, 62—72. <https://doi.org/10.15407/csc.2024.01.062>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2024. Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

щень щодо взаємного руху об'єктів, методи локалізації джерел магнітних аномалій базуються на аналізі масиву даних від магнітометра.

У статті розглянуто основні моделі представлення магнітних аномалій та алгоритми роботи систем локалізацій джерел магнітних аномалій і запропоновано програмний продукт з можливістю оцінки даних вимірювань напруженості магнітного поля та подальшою візуалізацією даних.

Постановка проблеми

Після отримання набору даних під час польових досліджень, вкрай важливо їх правильно обробити — відфільтрувати, виконати прив'язку до рухомої платформи, визначити можливі магнітні аномалії та місця їх локалізації [1].

Якість цифрового аналізу параметрів магнітного поля, отриманих у результаті досліджень є критично важливою для коректної інтерпретації результатів. Так, на основі отриманих даних можливо побудувати графік величини магнітного поля, що відображає характер поля в точках реєстрації сигналу. Слід зауважити, що в точці реєстрації сигналу можливим є вплив магнітного поля від геологічних утворень і присутніх додаткових магнітних джерел на іншій глибині залягання. Якщо протяжність такого джерела є значною, то на графіку формуватимуться помилкові екстремуми. За відсутності додаткових досліджень і покращеного аналізу такого графіка інтерпретація обстеження окресленої ділянки може не відповідати дійсності.

Традиційним підходом у визначенні магнітних аномалій вважається підхід узгодженої фільтрації [2]. Згідно такого підходу магнітна аномалія розкладається на ортогональні базисні функції, які в подальшому використовуються для фільтрації зібраного сигналу. Особливістю використання такого методу є вимога здійснення ретельного моделювання об'єкта. Іншим підходом у визначенні магнітних аномалій є моделювання на основі інформаційної ентропії та стохастичного резонансу.

Метою сучасних досліджень у цій галузі є підвищення ефективності розподілу аномалій

та локалізації питомих об'єктів, розробка програмних систем для аналізу цифрової форми магнітного поля. Ґрунтовні праці за даною тематикою орієнтовано на окремо розроблюваний підхід та не висвітлюють інші можливі підходи, методи та алгоритми.

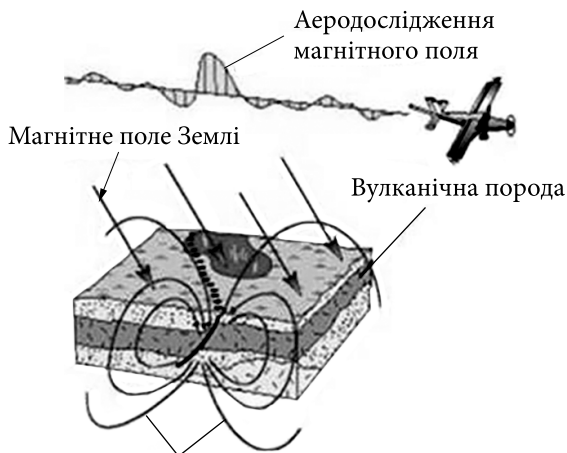
Наземна магніторозвідка та аеророзвідка

Серед геофізичних методів високу результативність та економічну доцільність показують засоби магнітометрії. Ключовим чинником при цьому стає ретельність обробки даних. Підвищення ефективності пошуку геологічних порід шляхом розробки програмної системи локалізації магнітних аномалій цілковито відповідає обраній стратегії «зеленого» переходу гірничодобувної галузі та підходам, озвученим на Міжнародній конференції з відбудови України [3].

Виокремлюють три підходи [4] у проведенні розвідувальних робіт: загально-пошуковий, пошуково-розвідувальний, розвідувальний. Метою загально-пошукового підходу є створення геологічної мапи великого масштабу та пошук великих родовищ. Пошуково-розвідувальний підхід ретельніше досліджує виявленні за допомогою загально-пошукового підходу родовища та допомагає створити деталізовану геологічну карту. Розвідувальний підхід є найбільш деталізованим у разі дослідження виявлених магнітних аномалій.

Вимірювання в магніторозвідці здійснюються й наземно, й за допомогою аерозйомок (див. рис. 1). Основним вимірювальним інструментом є магнітометр, а предметом вимірювань — відносні значення вертикальної або горизонтальної складової напруженості магнітного поля, й у тому разі, коли збір даних відбувався за допомогою аеромагнітних зйомок, — модуль вектора повної напруженості геомагнітного поля.

На рис. 1 зображено схему збору даних магніторозвідки. Дані магнітного поля будуть використані для локалізації та визначення параметрів питомої аномалії. Використання сучасних методів збору інформації мінімізує необхідність залучення висококваліфікованих



Магнітна аномалія спричинена розломом

Рис. 1. Здійснення магнітометричних досліджень

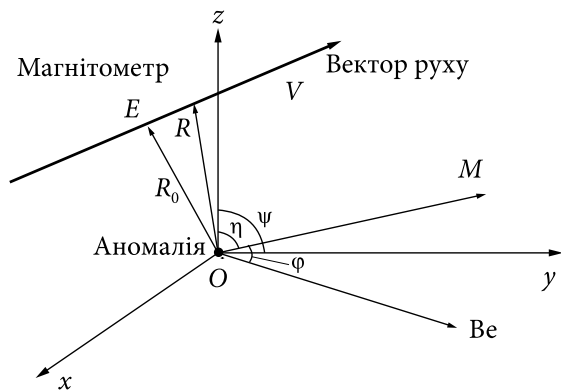


Рис. 2. Виявлення магнітної аномалії рухомим магнітометром

спеціалістів, дає змогу пришвидшити збір інформації та автоматизувати цей процес.

Згідно окремих джерел [4], застосування аеророзвідки підвищує економічну ефективність збору інформації на 40%, зокрема тому, що немає витрат на організацію польового відрядження, а швидкість збору інформації на великих площах є значно вищою. До того ж аеромагнітні зйомки уможливають збір інформації та дослідження у непридатних або небезпечних для наземної зйомки місцях.

Метою розробки та застосування геофізичних методів розвідки є дослідження будови земної кори, пошук корисних копалин, а також дослідження процесів ґрунтоутворення та вивчення магнітної структури ґрунтів. Сукуп-

ність аналітичних та синтетичних процедур для розв'язання поставленої задачі є інтерпретацією гравітаційних та магнітних аномалій [5]. Під аналітичними процедурами інтерпретації даних розуміють перетворення одного масиву даних в інший, а під синтетичними процедурами — оцінку даних спеціалістом-інтерпретатором.

Особливе значення має практична реалізація методів, оскільки більшість геологічних об'єктів, що мають практичну цінність, створюють невеликі аномалії, які складно ідентифікувати емпірично, а виміри наражені на інструментальні похибки, що переходять у похибки кінцевих результатів. Виявлення джерел таких аномалій несе практичну цінність, але вимагає удосконалення наявних підходів.

Надмірна деталізація моделі може призвести і до невиправданих обчислювальних витрат, і до посилення впливу обчислювальних похибок. Тому апроксимаційна модель, що відображає фізико-геологічну ситуацію, не повинна містити надмірних деталей. Водночас, спрощена апроксимація призводить до помилок у результатах через невідповідність реальній моделі.

Методи досліджень джерел магнітних аномалій

Об'єктний підхід у дослідженнях магнітних аномалій — це такий підхід, де магнітна аномалія є метою пошуку, а припущення щодо взаємного руху об'єкта та магнітометра відсутні. Джерело магнітного поля переважно складно описується та важко моделюється. Однак, у тому разі, коли відстань між магнітометром та аномалією є значною, такий об'єкт може бути описаний як магнітний диполь [5]. Конфігурацію виявлення магнітної аномалії зображено на рис. 2.

На рис. 2 пошуковий об'єкт розташований в точці початку координат O . Рухомою платформою з встановленим магнітометром рухається за заданим напрямком зі швидкістю v . R_0 — найближча відстань від об'єкта до траєкторії руху платформи, а точка E — перетин R_0 та траєкторії руху платформи.

Магнітне поле B , створене магнітною аномалією можна виразити наступним співвідношенням [5]:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3(M \cdot R)R}{|R|^5} - \frac{M}{|R|^3} \right], \quad (1)$$

де μ_0 — проникність вакууму, M — магнітний момент об'єкта, R — відстань від магнітометра до об'єкта.

В практичних дослідженнях встановлено, що магнітне поле аномалії є значно меншим, ніж магнітне поле Землі B_e . Відповідно, сигнал від магнітної аномалії S , вимірний магнітометром, розглядається як проекція B вздовж напрямку магнітного поля Землі:

$$S = \frac{B \cdot B_e}{|B_e|}. \quad (2)$$

Враховуючи співвідношення кутів та рівняння (1, 2) значення для сигналу магнітної аномалії можна переписати так:

$$S = \frac{M\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3 \cos \eta \cos \varphi - \cos \psi}{|R|^3} \right], \quad (3)$$

де η — кут MOR , ψ — кут MOB_e , φ — кут ROB_e .

Кути η , ψ , φ обчислюються за напрямками магнітного моменту M , відстані магнітометра до об'єкта R , магнітного поля Землі B_e . Для опису сигналу також важливо визначити відстань від магнітометра до аномалії:

$$R = R_0 + v(t - t_0). \quad (4)$$

Відзначимо перевагу аеророзвідки, у цьому разі — точність визначення ліній зйомок, оскільки траєкторія руху платформи носія, а відповідно магнітометра, визначається літальним апаратом та супутнім обладнанням.

Існує також низка стохастичних моделей поля: Гаусова модель [6], яка являє собою модель поля контактної поверхні на певній глибині, евристична модель Шварца [7], яка задає

спектральну щільність аномального поля на заданій постійній висоті, багат шарова модель, що описує суперпозиції полів декількох шарів з випадково розподіленими шарами.

Гаусова модель базується на аналізі магнітного поля, яке генерується об'єктом. У цій моделі вважається, що магнітні властивості об'єкта відповідають закону Гауса, а Гаусовий процес використовується для моделювання просторово-корельованих вимірювань. Гаусовий процес розглядають як розподіл за функціями [6]:

$$f(x) \sim GP(\mu(x), K(x, x')), \quad (5)$$

де $\mu(x)$ — середнє значення функції, $K(x, x')$ — коваріаційна функція.

Гаусовий процес розглядається як узагальнений процес багатовимірною ймовірнісного розподілу. Значення функції оцінюються для скінченної кількості входів x_1, \dots, x_N , які мають нормальний розподіл. Отже

$$\begin{bmatrix} f(x_1) \\ \vdots \\ f(x_N) \end{bmatrix} \sim N(\mu, K), \quad (6)$$

де

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu(x_1) \\ \vdots \\ \mu(x_N) \end{bmatrix}$$

та

$$K = \begin{bmatrix} K(x_1, x_1) & \dots & K(x_1, x_N) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ K(x_N, x_1) & \dots & K(x_N, x_N) \end{bmatrix}.$$

Для конструювання Гаусової моделі припускається, що сигнали, отримані з вимірювань магнітного поля ділянки спотворено Гаусовим шумом.

$$y_{B,k} = f_B(x_k) + e_{B,k}, \quad e_{B,k} \sim N(0, \sigma_n^2 l_3). \quad (7)$$

де σ — очікувана амплітуда, l — очікуваний масштаб довжини функції, що вивчається, $y_{B,k}$ — вимірювання магнітометра, трансфор-

мовані у системі координат, $f_B(x_k)$ — значення напруженості магнітного поля у точці x_k .

Модель Шварца в контексті магнітних аномалій використовується для опису магнітних властивостей геологічних структур та формувань і дозволяє апроксимувати магнітні властивості об'єктів у геофізичних дослідженнях [7]. Побудова такої моделі базується на гіпотезі про геологічну структуру об'єкта та розподіл магнітних властивостей у формі ідеальних циліндричних об'єктів, що мають сферичну симетрію.

Багатошарова модель розроблялася для оцінки об'єктів, що мають різну геологічну структуру та неоднорідні фізичні властивості [8]. Передбачається, що такий об'єкт має шарову будову або зміни магнітного поля спричинено не однією, а кількома геологічними структурами, розташованими в різних шарах земної поверхні. Оскільки кожен шар має свої характеристики магнітних властивостей, таке різноманіття слід враховувати під час моделювання. Особливістю моделі є врахування параметрів кожного шару.

Окрім методів фільтрації, виняткове місце серед підходів локалізації джерел магнітних аномалій посідає метод найменших квадратів. Задачею методу є оцінка закономірностей, які спостерігаються на тлі випадкових коливань, а також використання оцінених закономірностей для подальшого прогнозування. Такий підхід активно використовується в методології розв'язання обернених задач. Проблемне питання методу найменших квадратів вирішується шляхом параметричної оцінки функції регресії, яка описує залежність однієї величини з випадковими похибками від групи невідповідних величин.

Метод нелінійної оптимізації передбачає мінімізацію функції відхилення між спостереженнями та розрахунковими аномаліями. В рамках даного методу спочатку визначається функція, яка описує відхилення між спостережуваними та розрахованими значеннями магнітних аномалій за заданими параметрами моделі. Наступним кроком є вибір методу оптимізації для визначення екстремуму функції

відхилення. Після перевірки збіжностей і внесення коректив, отримуються оптимальні параметри моделі для опису магнітної аномалії.

Метод аналізу градієнтів використовується для визначення розташування та форми джерел магнітних аномалій. На початкових етапах застосування даного методу локалізації джерел магнітних аномалій визначаються градієнти магнітних аномалій — похідні магнітного поля в заданих координатах. Далі здійснюється глибинний аналіз отриманих градієнтів, на підставі якого стає можливою локалізація джерела магнітних аномалій.

Застосування та вдосконалення означених методів передбачає використання додаткових обчислювальних потужностей та спеціалізованого програмного забезпечення.

Програмні та онлайн-ресурси для локалізації джерел магнітних аномалій

Магніторозвідка в Україні проводиться в комплексі з іншими геофізичними заходами та має на меті оцінку даних, зібраних на значних територіях, їх аналіз та коректну інтерпретацію. Для обробки значних масивів даних використовуються ґрунтовні програмні продукти. А на онлайн-ресурсах викладаються готові результати досліджень та інтерпретації їх. Такий підхід загалом відповідає світовій практиці, де дослідження та процедура обробки даних вимагають встановлення на персональному комп'ютері спеціалізованого програмного забезпечення, а онлайн-ресурси висвітлюють результати проведених досліджень.

Окрім компанії надають послуги зі збору магнітометричних даних за допомогою безпілотних літальних апаратів, наприклад, *UgcS, Latvia, Pegasus, Australia*. В Україні приватних підприємств, які займаються зборами даних та обстеженнями територій за допомогою безпілотних літальних апаратів ще не зареєстровано, що відкриває широкі перспективи розвитку в даній галузі для приватного підприємництва.

У відкритому доступі є вже оброблені та інтерпретовані дані, представлені в графічному форматі у вигляді карт із позначеними кольором

зонами магнітних аномалій, а також інформаційних таблиць. Оскільки дані магнітометрів здебільшого досліджуються в геофізичних роботах, використовується спеціалізоване програмне забезпечення, таке як *GRASS GIS*, *Oasis Montaj* від *Geosoft*, *MagMap*. Ці програми являють собою потужний набір інструментів для аналізу різноманітних геофізичних даних, включно з магнітометричними.

Широкий функціонал є беззаперечною перевагою названих програм, а встановлені системи дають змогу зчитувати різноманітні формати геомагнітних даних, здійснювати глибокі дослідження та наочно візуалізувати дані. Водночас користувачі названих систем виокремлюють і недоліки:

- весь широкий функціонал можливостей не використовується в разі вузькоспеціалізованих досліджень;

- графічний інтерфейс *Oasis Montaj*, *MagMap* доволі складний, а у *GRASS GIS* його взагалі немає;

- суттєві вимоги для обчислювальних ресурсів — навіть, якщо користувачу потрібно досліджувати незначні масиви, — встановлення програмної системи вимагає сучасного обладнання. Такі вимоги роблять названі програмні системи недоступними для користувачів з обмеженими ресурсами комп'ютера;

- вартість — *Oasis Montaj* є комерційною програмою, а отже, використання повного функціоналу для малих компаній або одноосібних користувачів пов'язане з додатковими витратами на дослідження.

Слід також зауважити, що є окремі програмні пакети для обробки магнітометричних даних, наприклад, *MagPy*, *ObsPy* з відкритим кодом. Однак використання їх потребує додаткових навичок в розгортанні та застосуванні програмних продуктів.

Попри широкий функціонал цих та інших програмних продуктів у низці випадків достатньо поверхової оцінки отриманих даних на предмет можливих магнітних аномалій на досліджуваній поверхні. Подібну оцінку можливо здійснити навіть у режимі реального часу за допомогою веб-застосунку. Однак, подібних

веб-застосунків для попередньої оцінки даних магнітометричних досліджень у відкритих джерелах не виявлено.

Найпопулярнішим онлайн-ресурсом для попередньої роботи з магнітометричними даними є сайт Національного центру геофізичних досліджень (США), на якому розміщено інструмент для розрахунку нормального значення напруженості магнітного поля Землі залежно від географічних координат, заданих користувачем. Такий калькулятор функціонує на основі сучасної моделі *WMM14*, розробленої Національним центром.

Ще одна розробка Національного центру геофізичних досліджень дає змогу звантажувати актуальні магнітометричні карти та використовувати їх у подальшій візуалізації. Однак, слід зауважити, що такі карти доречні у разі візуалізації загально-пошукових досліджень.

Онлайн ресурс *GeoMapApp* надає користувачу сучасну візуалізацію магнітометричних даних. На сайті завантажено глобальні та регіональні дані для відкритого доступу та подальшого аналізу. Однак, взаємодія користувача з ресурсом є односторонньою — аналізувати можливо лише дані, наведені на сторінках ресурсу.

Слід виокремити ресурси, що дозволяють аналізувати та інтерпретувати магнітометричні дані, зібрані в результаті аеророзвідки. Такі дослідження вимагають узгодження даних від рухомої платформи носія та магнітометра з урахуванням мінімізації впливу рухомої платформи носія на датчик вимірів. Сучасні технології уможливають синхронізацію часу збору даних, а отже, полегшують їхню подальшу прив'язку.

Окремі компанії, такі як *Sensys* (Німеччина), *Pegasus* (Австралія) позиціонуються на ринку, як комерційні дослідники ділянок, що використовують для збору даних безпілотні літальні апарати. Подальший аналіз та інтерпретація даних відбувається у тісній співпраці з компаніями, основною діяльністю яких є геофізичні дослідження. Також є компанії, наприклад, *JBuas* (Великобританія), що постачають технічні рішення для аеромагніторозвідки —

а саме безпілотні літальні апарати з магнітометрами для відповідних досліджень. Онлайн-ресурси таких компаній мають виключно інформаційний характер та не дозволяють користувачу проаналізувати конкретні дані. Методологія та моделі, що використовуються в програмному забезпеченні, не виносяться на широкий загал.

Програмного продукту, що дозволив би оцінити в режимі онлайн дані вимірювань напруженості магнітного поля під час аеророзвідки, не виявлено.

Результати

Авторами запропоновано та реалізовано програмне забезпечення з можливістю оцінки даних вимірювань напруженості магнітного поля на предмет відхилень від визначеної нормалі, що враховує дані руху автономної платформи на досліджуваній ділянці для локалізації можливих аномалій [9].

Оскільки в рамках розробленого проекту не планується встановлювати розташування території (прив'язка до глобальної системи координат), за значення нормалі беруться дані USGS, водночас, концепція веб-застосунку передбачає можливість додавання функціоналу в майбутньому для уточнення даних, необхідних для первинного аналізу, а саме, вирізнення даних потенційних магнітних аномалій. Як відомо, значення векторного показника магнітного поля в середньому коливається від $25 \cdot 10^{-6}$ до $65 \cdot 10^{-6}$ Тл залежно від локальної місцевості. Отже, діапазон норми для розробленого веб-застосунку перебуватиме у межах загальноприйнятої нормалі $25 \div 65 \cdot 10^{-6}$ Тл.

Для вимірювань у магніторозвідці застосовуються магнітометри різного типу. Прилади проходять передпроцесорне калібрування. Усі дані також мають проходити постпроцесорну обробку для коригування даних від зовнішніх впливів, зокрема навіть можливого впливу рухомої платформи на вимірювальний прилад. Після такої обробки, отримують два масиви даних s перший з координатами переміщення рухомої платформи, другий — зі значеннями магнітометра. Спрацьовування датчиків для

запису синхронізовано. Таким чином, розроблений застосунок має можливість приймання файлів з великими об'ємами даних, формат файлів *.csv — найпоширеніший формат для файлів з вимірами магнітометрів, що пройшли постпроцесорну обробку.

Слід зауважити, що магнітометр вимірює значення магнітного поля за трьома складовими, відповідно, для подальшого аналізу потрібно визначити векторний показник, що прив'язується до координат рухомої платформи-носія. Однак у разі розширення проекту не виключається додавання функціоналу з визначенням коливань магнітного поля за окремими напрямленостями.

За результатами такої обробки даних в онлайн-форматі користувач може оцінити потенційну наявність магнітної аномалії на досліджуваній ділянці, та прийняти рішення про подальші глибші дослідження.

Взаємодія користувача з веб-застосунком передбачає, що користувач може імпортувати дані до застосунку. За результатами такого імпортування користувач побачить інформаційне повідомлення про успішність (або помилку) імпорту даних. На заключному етапі користувач зможе ознайомитися з візуальним відображенням оброблених даних.

Таким чином, виокремлено два ситуативні сценарії під час яких користувач взаємодіє із застосунком у тій чи іншій формі (див. рис. 3). Зокрема, при першому вході у застосунок, користувачу пропонується обрати файли для завантаження.

Перший сценарій передбачає, що користувач ввів дані коректно. У цьому разі користувач бачить повідомлення про завершення імпорту даних, а також таблицю значень переміщення рухомої платформи-носія, на позиціях яких можлива магнітна аномалія. Також користувач бачитиме графік змін векторної суми магнітного поля та додатково графік переміщень рухомої платформи-носія з виокремленням місць потенційних магнітних аномалій. Після відображення даних користувач може на цій же сторінці завантажити інші дані для наступного дослідження.

Другий сценарій передбачає, що дані введено користувачем неправильно. У цьому разі користувачу виводиться інформаційне повідомлення з означенням характеру помилки. Користувач також залишається на сторінці, де може імпортувати коректні дані та перейти до виконання першого сценарію.

Перевірка на валідність даних, які імпортує користувач, відбувається за наступними критеріями:

- наявність файлу до даних переміщення рухомої платформи-носія;
- наявність файлу до даних магнітометра;
- відповідність формату файлу до даних переміщення рухомої платформи-носія заданому;
- відповідність формату файлу до даних магнітометра заданому;
- відповідність вмісту файлу до даних переміщення рухомої платформи носія заданому;
- відповідність вмісту файлу до даних магнітометра заданому.

Перевірка на відповідність до умов виконується за вказаним порядком; користувачу виводиться повідомлення про першу виявлену помилку, а сама сторінка оновлюється, для того, щоб користувач мав змогу повторно імпортувати дані.

Для того, щоб розпочати роботу з веб-застосунком, користувачу потрібно зайти на сторінку та виконати прості дії:

1. Обрати файл з даними від рухомої платформи носія, формат файлу *.csv.
2. Обрати файл з синхронізованими даними від магнітометра, формат файлу *.csv.
3. Натиснути кнопку «Імпортувати дані».

Дані, які намагається імпортувати користувач, проходять послідовну перевірку на відповідність заданим умовам. У разі некоректно введених даних виводиться інформаційне повідомлення. Аналіз на відповідність вмісту здійснюється шляхом перевірки заголовків вмісту файлів *.csv формату, оскільки передбачається, що файл із даними переміщення рухомої платформи носія містить тільки x та y координати, а файл із даними магнітометра відповідно x , y , z — значення показів за відповідними напрямками.

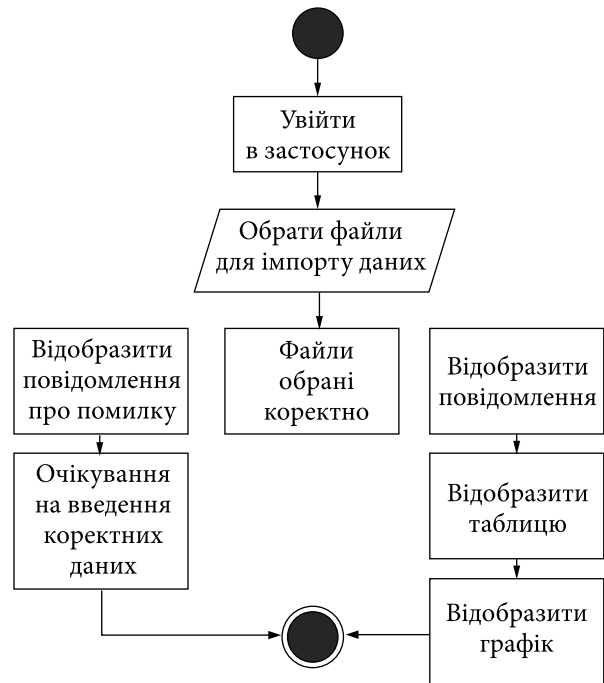


Рис. 3. Сценарії переходів користувача у застосунку

Імпортуйте дані переміщення та магнітометра, будь ласка

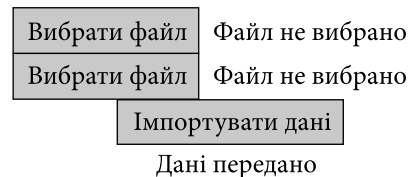


Рис. 4. Повідомлення про успішне імпортування даних

Відповідно, поки користувач не імпортував дані, поля з графіком та таблиця залишаються порожніми, оскільки немає даних для відображення. На екрані з'являється виключно інформаційне повідомлення. У разі, коли кількість файлів, їхній формат і вміст відповідають вимогам, розпочинається імпортування даних. Процес імпортування даних, враховуючи значні об'єми досліджень, триватиме певний час. Одразу після завершення процесу імпорту на екрані з'явиться повідомлення про завершення передачі даних (див. рис. 4), а також графік зміни векторної суми, графік руху

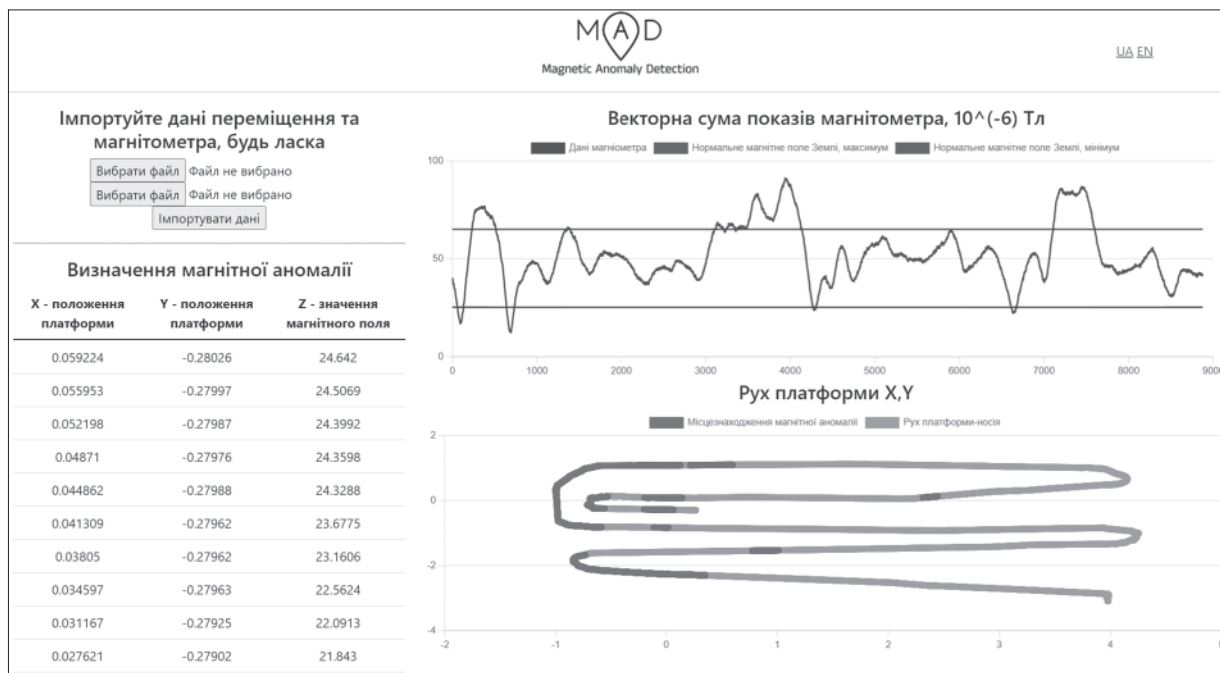


Рис. 5. Побудова графіка та виведення даних на екран після імпортування даних

рухомої платформи носія та таблиця зі значеннями векторної суми та відповідними їй координатами рухомої платформи носія, що не входять у діапазон встановленої нормалі.

Тексти всіх інформаційних повідомлень — як про помилку, так і про успіх, виводяться мовою, обраною користувачем. За замовчуванням обрано англійську мову.

Реалізацію наведеного функціоналу зображено на рис. 5. Після перезавантаження сторінки чи оновлення, інформаційне повідомлення зникає, однак база даних не очищається, графіки та таблиці залишаються заповненими. Очищення бази даних відбувається тільки під час наступної спроби передати дані, а саме, з натисканням кнопки “Імпортувати дані”.

Графік доповнено прямими, що обмежують діапазон нормального значення магнітного поля Землі ($25 \div 65 \cdot 10^{-6}$ Тл). Величини діапазону нормального значення прийнято згідно з висновками USGS. При цьому в майбутньому планується розширити функціонал веб-застосунку та надати користувачеві можливість самостійно встановлювати діапазон. Така можливість

покращить аналіз даних, прив'язуючи їх до локальної місцевості.

Таблиця, що відображається на екрані є вибіркою з бази даних значень та не змінює останню. У цьому разі відображаються лише точки, значення магнітного поля в яких виходить за рамки визначеної нормалі. В перспективі зареєстрованому користувачу може бути надано можливість редагувати та фільтрувати дані для відображення.

Висновки

У роботі розглянуто основні математичні моделі магнітних аномалій та методи їх локалізації, програмні реалізації даних задач. Онлайн-ресурсів, які б здійснювали попередню обробку, виявлено не було, а тому було запропоновано та створено програмний застосунок із потрібним функціоналом, а саме, для обробки даних рухомої платформи та магнітометра з їхнім подальшим аналізом та візуалізацією отриманих результатів. Якщо на обстежуваній ділянці зафіксовано відхилення від встанов-

леної нормалі, такі ділянки відобразяться на побудованому графіку руху платформи-носія іншим кольором. Попередня локалізація може застосовуватися для подальшого поглибленого вивчення збурень, що спричинили відхилення показів магнітометра від встановленої нормалі.

Активне використання підходів локалізації магнітної аномалії та подальша обробка даних можуть бути вдосконалені застосуванням сучасних програмних засобів та методологій. Створена програма розрахована на подальше поглиблення досліджуваних питань.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sharma P. *Geophysical Methods in Geology*. Elsevier, 1976. Amsterdam. URL: <https://archive.org/details/geophysicalmetho0000shar/page/426/mode/2up> (Дата звернення: 23.12.2023)
2. Wang Yi., Han Q et. al. A deep neural network based method for magnetic anomaly detection. *IET Science, Measurement & Technology*. 2022. 16 (1). <https://doi.org/10.1049/smt2.12084>.
3. Ukraine Recovery Conference. 2022. Ukraine Recovery Conference [онлайн]. URL: <https://www.urc-international.com/urc-2022> (Дата звернення: 28.11.2023).
4. Омельчук О.В., Загнітко В.М., Курило М.М. Пошуки та розвідка родовищ корисних копалин. 2017. Київ. ННІ «Інститут геології». URL: http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/poshuky_ta_rozvidka_RKK.pdf (Дата звернення: 02.02.2024).
5. Ginzburg B., Frumkis L. Processing of magnetic Scalar gradiometer signals using orthonormalized functions. Elsevier. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(02\)00351-5](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(02)00351-5).
6. Wahlström N., Kok M., Schön T.B. and Gustafsson F. Modeling magnetic fields using Gaussian processes, *2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. Vancouver, BC, Canada. 2013. pp. 3522—3526, doi: 10.1109/ICASSP.2013.6638313.
7. Arfken G.B., Weber H.J. and Harris F.E. *Mathematical Methods for Physicists seventh edition* Elsevier. Waltham, MA: Academic. 2012.
8. Rabeh T., Abdallatif T., Mekki M. Magnetic data Interpretation and depth estimation Constraints: a correlative study on magnetometer and gradiometer data. *NRIAG journal of Geophysics Special Issue* 10. 2008. URL: https://www.researchgate.net/publication/265168250_Magnetic_Data_Interpretation_and_Depth_Estimation_Constraints_A_correlative_Study_on_magnetometer_and_Gradiometer_Data (Дата звернення: 03.01.2024)
9. А.С. №122247 Україна. Комп'ютерна програма “Anomaly Detection” / Крячок О.С., Макаренко Н.В. (Україна). № 122247 від 22 грудня 2023 р.; заявл. 17.10.2023; опубл. 31.01.2024, бюл. 79.

Надійшла 07.03.2024

REFERENCES

1. Sharma, P. (1976). *Geophysical Methods in Geology*. Elsevier, Amsterdam. [online]. Available at: <<https://archive.org/details/geophysicalmetho0000shar/page/426/mode/2up>> [Accessed: 23 Dec. 2023]
2. Wang, Y., Han, Q., Zhao, G., Li, M., Zhan, D., & Li, Q. (2022). A deep neural network based method for magnetic anomaly detection. *IET Science, Measurement & Technology*, 16 (1), 50-58. <https://doi.org/10.1049/smt2.12084>.
3. Ukraine Recovery Conference (2022). Ukraine Recovery Conference [online]. Available at: <<https://www.urc-international.com/urc-2022>> [Accessed: 28.11.2023]
4. Omelchuk, O.V., Zagnitko, V.M., Kurylo, M.M. (2017). Search and exploration of mineral deposits [online]. Kyiv. Institute of the Geology. Available at: <http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/poshuky_ta_rozvidka_RKK.pdf> [Accessed: 02.02.2024]
5. Ginzburg, B., Frumkis, L., & Kaplan, B. Z. (2002). Processing of magnetic scalar gradiometer signals using orthonormalized functions. *Sensors and Actuators A: Physical*, 102 (1—2), pp. 67-75. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(02\)00351-5](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(02)00351-5).
6. Wahlström, N., Kok, M., Schön, T. B., Gustafsson, F. (2013). Modeling magnetic fields using Gaussian processes. In *2013 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing*, pp. 3522—3526. doi: 10.1109/ICASSP.2013.6638313.
7. Arfken, G. B., Weber, H J., Harris, F.E. (2012). *Mathematical Methods for Physicists seventh edition* Elsevier. Waltham, MA: Academic.

8. Rabe, T., Abdallatif, T., Mekkawi, M. (2008). Magnetic data Interpretation and depth estimation Constraints: a correlative study on magnetometer and gradiometer data. NRIAG journal of Geophysics Special Issue, [online], 10. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/265168250_Magnetic_Data_Interpretation_and_Depth_Estimation_Constraints_A_correlative_Study_on_magnetometer_and_Gradiometer_Data> [Accessed: 03.01.2024]
9. C.C. no 122247 Ukraine. Computer program “Anomaly Detection” / Kriachok, O.S., Makarenko, N.V. (Ukraine). no 122247, 22.12.2023; received 17.10.2023; published 31.01.2024, bul. 79.

Received 07.03.2024

O.S. Kriachok, Ph.D (Eng), Assistant Professor, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Beresteiska ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine, “
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4829-635X>,
alexandr.kriachok@gmail.com

N.V. Makarenko, Student, Researcher, V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Glushkov ave., 40, Kyiv, 03187, Ukraine,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1416-2824>,
makarenko.nataliia.v@gmail.com

RESEARCH OF MODELS AND ALGORITHMS OF SYSTEMS FOR LOCALIZATION OF MAGNETIC ANOMALIES SOURCES

Introduction. The application of modern geophysical methods are caused by the challenges of nowadays Ukraine standing with. The high efficiency of geophysical research is shown by the methods of magnetic exploration. Method of analyzing the array of data from the magnetometer is used to localize the magnetic anomaly’s sources. Such localization is implemented by using various mathematical models and algorithms of software systems.

Purpose. The aim of the article is to show an overview of mathematical models and algorithms for the localization of magnetic anomalies’ sources (disturbances). They allow to speed up the processing of magnetometric research’s data and visualize the obtained results.

Methods. The article examines the mathematical models of the magnetic anomaly< such as magnetic dipole model, the Gaussian model, the Schwartz model. The multilayer model, and also provides the overview of the main methods for the localization of the described anomaly — the filtering method, the least square method, the gradient analysis method. A list of software and online resources is given, this software is used to analyze magnetometer data and locate magnetic anomalies’ sources.

Results. Four mathematical models of magnetic anomalies that allow describing objects of various configurations are considered in the article, and the main methods of determining these objects in the magnetometer data array are given. The article presents the most popular software used for magnetometric data processing. Most of the software is used in geophysics for deep research and requires significant computing resources. A software application was proposed and developed. It allows importing data from the moving platform and magnetometer, analyzing data and visualizing the results.

Conclusion. The results of the review emphasize the importance of improving existing mathematical models and developing specialized software for magnetic anomalies’ source localization.

Keywords: magnetic anomaly, localization, magnetic field, geology, magnetic exploration, algorithm, computer program.