

Магнітометричний метод виявлення вибухонебезпечних предметів: можливості та перспективи

М.І. Орлюк¹, С.М. Кузнєцов², А.О. Роменець¹,
А.В. Марченко¹, І.М. Орлюк¹, 2025

¹Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

²Державне підприємство «Науково-дослідний центр проблем надкористування "ГЕОРЕСУРС"»

Одним із сучасних методів картографування територій, у тому числі забруднених вибухонебезпечними предметами (ВНП), є метод дистанційного магнітного знімання з використанням безпілотного літального апарата (БПЛА). Метод заснований на використанні сучасних магнітометрів і градієнтометрів, зокрема LEMI-026, які в поєднанні з БПЛА реєструють складові магнітного поля, що за результатами експериментальних досліджень на полігонах дає можливість ідентифікувати скупчення різноманітних металевих залишків, у тому числі вибухонебезпечних предметів.

Ключові слова: магнітометр, LEMI-026, магнітне знімання, магнітні аномалії, ВНП, БПЛА.

Вступ. Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України має багатий досвід магнітного картування та інтерпретації геомагнітних аномалій для вирішення фундаментальних і прикладних завдань геофізики. Зокрема, для території України розроблено карту модуля індукції геомагнітного поля та технологію розрахунку його силових і кутових компонент, включно з цифровою картою магнітного схилення D , яка передана і використовується нині топографічною службою ЗСУ [Орлюк и др., 2015; Orlyuk et al., 2024]. Іншим вагомим здобутком є побудова великомасштабних магнітних моделей структур родовищ корисних копалин і картування трипільських й скіфських археологічних об'єктів за результатами інтерпретації аеро- та наземних детальних і мікромагнітних знімів [Орлюк и др., 2016]. Методика комплексних магнітометричних досліджень археологічних об'єктів може бути взята за основу при розробці технології виявлення

вибухонебезпечних предметів (ВНП) з використанням безпілотного літального апарату (БПЛА).

Магнітні аномалії є суперпозицією природних і техногенних джерел. Природні магнітні аномалії відображаються на розроблених картах модуля індукції геомагнітного поля та його аномалій. Техногенні магнітні аномалії наявні в сумарному магнітному полі і можуть бути виявлені методами фільтрації модульних значень індукції геомагнітного поля, або його вертикального та горизонтального градієнтів, отриманих за результатами сучасних високоточних магнітних знімів.

Попередній аналіз і розрахунки показали, що в районах бойових дій техногенна компонента магнітного поля (з інтенсивністю окремих аномалій 10—500 нТл і більше) співставна, або суттєво переважає за інтенсивністю природні аномалії, за рахунок насичення верхньої частини розрізу земної кори різного роду металобрухтом

Citation: Orlyuk, M., Kuznetsov, S., Romenets, A., Marchenko, A., & Orliuk, I. (2025). Magnetometric detection of explosive objects: opportunities and prospects. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 285—289. <https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322560>.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

(зокрема ВНП). Одним з найефективніших і економних методів виявлення площ, забруднених боєприпасами, які не вибухнули, є метод дистанційного магнітного знімання з використанням БПЛА. Метод ґрунтується на підставі застосування сучасних магнітометрів і градієнтометрів, які кріпляться на БПЛА та вимірюють аномалії магнітного поля, що дає можливість ідентифікувати бомби, міни, боєприпаси та скупчення різноманітних металевих залишків [Пристай, Ладанівський, 2017]. Вимірювальний комплекс оснащується навігаційною системою з точною геоприв'язкою. На цей час існує декілька іноземних варіантів такого комплексу (MagDrone R3 (компанія SENSYS GmbH, Німеччина), DRONEmag (компанія GEM Systems, Канада), MagNIMBUS (SPH) та ін. [Nikulín et al., 2020; Kolster et al., 2022]. Інститутом геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України спільно з Львівським центром Інституту

космічних досліджень НАНУ-ДКАУ, ДП «ГЕОРЕСУРС» та компанією «Агросем» випробувано аналогічний комплекс з використанням магнітометра українського виробництва LEM1-026 та мультикоптера DJI Matrice 300 RTK з бортовим комп'ютером SkyHub і системою GNSS.

За результатами пілотних досліджень на військових та експериментальних полігонах показано, що практично застосування всіх комплексів дає можливість виявляти ВНП та їхні залишки (у складі яких є залізо) на висотах до 1,5—2,0 м. Це узгоджується з теоретичними розрахунками стосовно затухання поля від магнітних ВНП.

Для виявлення можливого впливу БПЛА на покази магнітометра було виконано експериментальні роботи під час зависання апарата над приладом на різних висотах.

На відстані БПЛА 1 м магнітометр реєструє «аномалію—заваду» інтенсивністю 6 нТл, на відстані 2 м — 2 нТл і на відстані

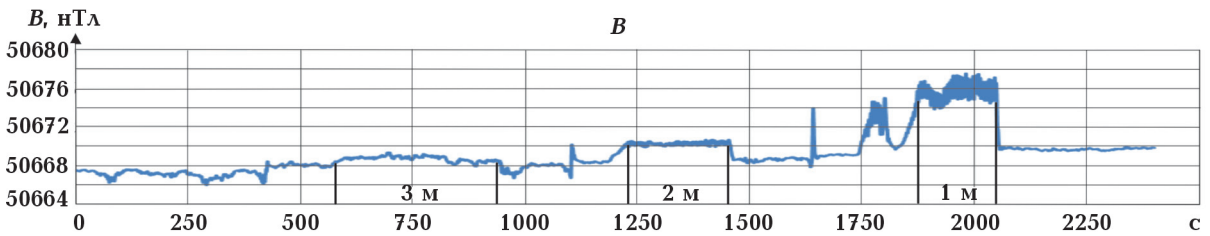


Рис. 1. Проліт і зависання БПЛА над магнітометром на висоті 3 м (500—1000 за шкалою x), 2 м (1200—1500) та 1 м (1800—2100).

Fig. 1. Flight and hovering of the drone over the magnetometer at a height of 3 m (500—1000 on the x scale), 2 m (1200—1500) and 1 m (1800—2100).

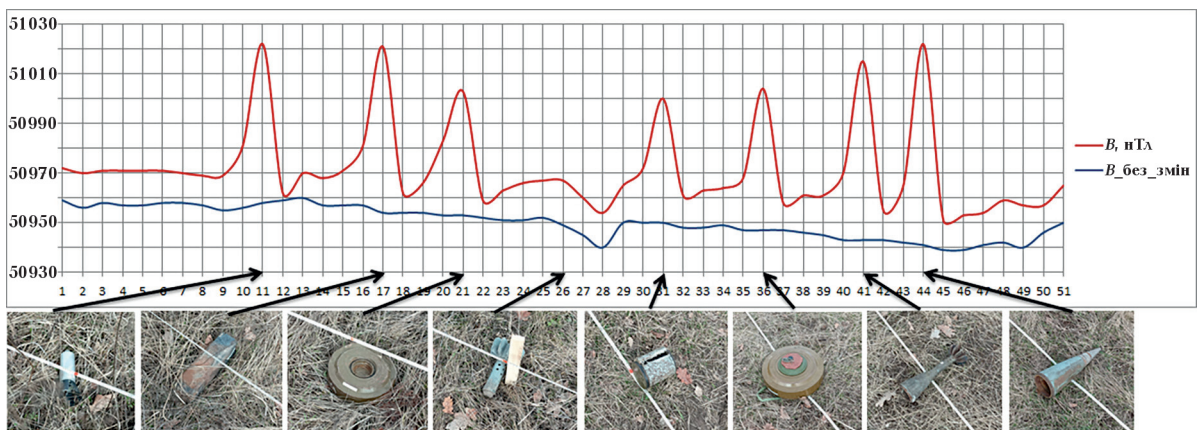


Рис. 2. Магнітне поле вздовж профілю з мінами та боєприпасами (червона крива) та без них (синя крива).

Fig. 2. Magnetic field along a profile with mines and ammunition (red curve) and without them (blue curve).

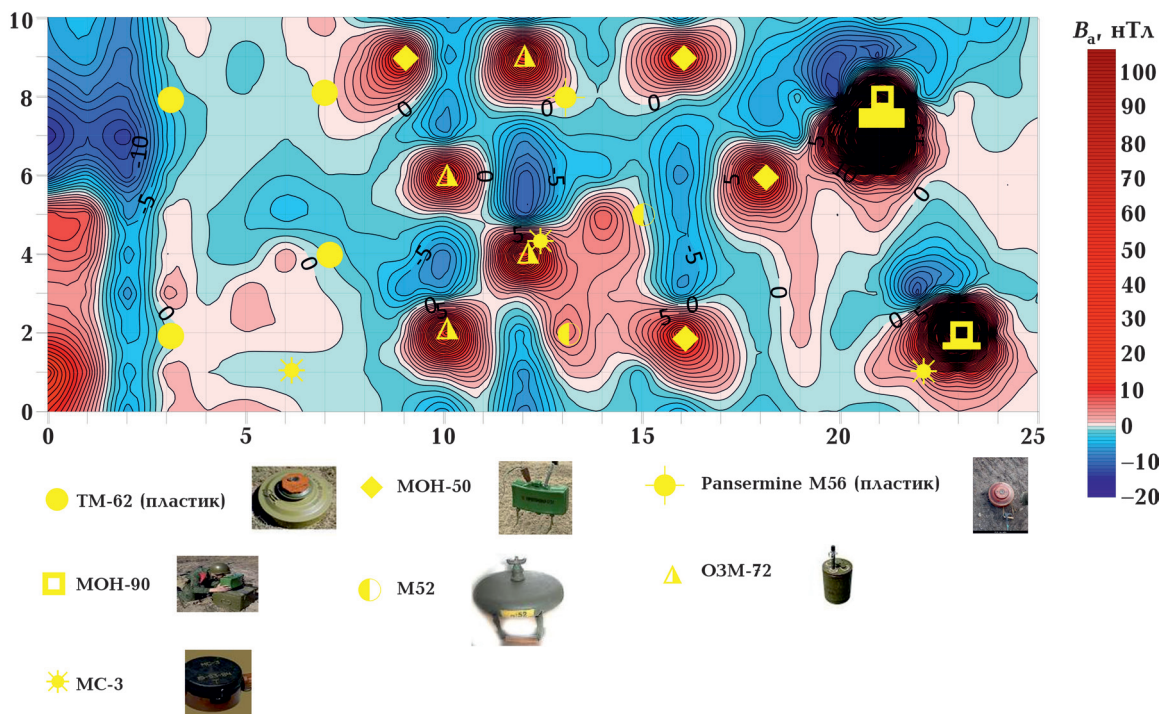


Рис. 3. Аномалії модуля індукції B_a на експериментальній ділянці площею 10×25 м.
 Fig. 3. Anomalies of the B_a induction module on the experimental site 10×25 m.

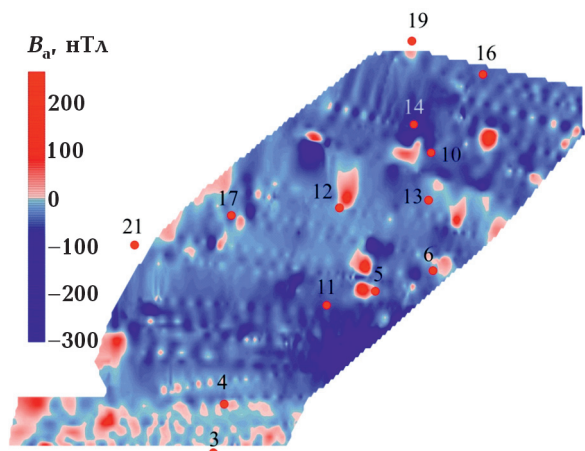


Рис. 4. Аномалії модуля індукції B_a на військовому полігоні.
 Fig. 4. Anomalies of the B_a induction module at the military training ground.

3 м — близько $0,5\text{—}1$ нТл (рис. 1). Згідно з наведеним, датчик магнітометра має розташовуватися на віддалі мінімум 3 м від дрона.

На рис. 2 наведено результати експериментальних досліджень стосовно замірів індукції геомагнітного поля B на висоті 1 м над ВВП, виявленими вздовж профілю за-

вдовжки 50 м з кроком замірів 1 м. На цьому самому рисунку наведено індукцію B без мін і боєприпасів.

Як можна бачити з рис. 2, всі міни та боєприпаси, що містять залізні елементи, добре виявляються в магнітному полі аномаліями з інтенсивністю $20\text{—}50$ нТл.

Для оцінювання прояву та можливості ідентифікації ВВП проведено експериментальні дослідження на військовому полігоні. Насамперед виконано магнітне знімання на «чистій» ділянці, на якій в подальшому було розміщено низку мін різних типів. Висота знімання — 1 м. Відстань між профілями — 1 м, крок уздовж профілю — 1 м. Згідно з результатами знімання на ділянці розміром 10×50 м модуль індукції геомагнітного поля змінюється в межах $B=50096\div 50134$ нТл, а виділені шляхом фільтрації методом осереднення аномалії модуля індукції B_a змінюються в межах від -14 до 22 нТл.

На цій ділянці було розміщено різноманітні міни (рис. 3) в межах 10×25 м її площі та виконано магнітне знімання за тією самою мережею спостережень.

Як можна бачити з рисунку, аномалії модуля індукції B_a змінюються в межах від -20 до 110 нТл, а їх максимумами чітко ідентифікуються міни, крім пластикових.

Результати знімання на військовому полігоні магнітометром LEMI-026 ілюструє рис. 4.

За результатами магнітометричного знімання з БПЛА за керування в ручному режимі було ідентифіковано 6 із 9 ВНП, які розташовані в межах ділянки. Один із них (14) може бути пластиковою ТМ.

Зауважимо, що виконані дослідження засвідчують можливість виявлення незначних за розмірами ВНП на глибині до $1,0$ м. Якщо датчик розміщений на висоті $0,5$ м, а заміряна аномалія відповідає аномалії на висоті $1,5$ м, то можна прогнозувати пошуковий об'єкт на глибині 1 м. Згідно з розрахунками, починаючи з висоти 2 м, спостерігаються суперпозиційні аномалії від металевих залишків, зокрема мін і боєприпасів, що дає можливість говорити тільки про загальну забрудненість території ВНП.

Для підтвердження цього висновку ми розрахували аномальне магнітне поле на висотах $1-5$ м (з кроком 1 м) від ВНП на ділянці розміром 80×200 м. Згідно з розрахунками, починаючи з висоти 2 м, складно ідентифікувати окремих ВНП.

Висновки. За результатами пілотних досліджень показано, що застосування магнітометричних комплексів з використанням БПЛА дає можливість виявляти ВНП та їхні залишки (у складі яких є залізо) на висотах польоту над поверхнею максимум до $1,5-2,0$ м.

Важливим етапом при проведенні такого роду робіт є оцінювання природного магнітного поля (фону), яке у деяких

випадках може ускладнювати виділення корисного сигналу. Воно може бути виконано шляхом розробки та аналізу карт природної компоненти аномального магнітного поля для території бойових дій на сучасну епоху. Зіставлення останніх з картами післявоєнних магнітних знімачь дасть можливість виділити техногенну складову магнітного поля та оцінити ступінь забрудненості території. Завадою при пошуку мін і ВНП є також наявність залишків залізних виробів, які не пов'язані з бойовими діями.

ВНП з пластиковими та дерев'яними корпусами не можуть бути виявлені магнітометричним методом, що потребує його комплексування з георадарними, мульти- і гіперспектральними методами. З наведеного вище можна зробити загальний висновок, що магнітометричні методи та створені на їх основі системи пошуку доцільно використовувати на початкових стадіях для отримання загальної оцінки забрудненості території, а в подальшому, як одного із основних методів комплексу для розмінування із застосуванням БПЛА. Головною перевагою використання магнітометричних систем є виявлення джерел аномалій у розрізі верхньої частини земної кори незалежно від типу вміщуючого середовища (грунт, вода і т. ін.) і погодних умов.

Пропоновані магнітометричні системи і інтерпретація отриманих даних дадуть важливі рекомендації та розрахунки щодо рекультивації земель. На базі оцінювання техногенної складової магнітного поля в межах бойових дій розроблятимуть методики відновлення довкілля в широкому спектрі питань.

Список літератури

Орлюк М.И., Ролле Р., Роменец А., Ульрих Б., Цольнер Х. Микромагнитная съемка Большого Бельского городища скифского времени, Полтавская область. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 5. С. 25—39. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i5.2016.107818>.

Орлюк М.И., Роменец А.А., Марченко А.В.,

Орлюк И.М., Иващенко И.Н. Магнитное склонение на территории Украины: результаты наблюдений и вычислений. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 2. С. 73—85. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i2.2015.111307>.

Пристай А., Ладанівський Б. Застосування

безпілотних апаратів для геофізичних досліджень. *Геофиз. журн.* 2017. Т. 39. № 2. С. 109—125. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i2.2017.97378>.

Nikulin, A., DeSmet, T., Puliaiev, A., Zhurakhov, V., Fasullo, S., Chen, G., Spiegel, I., & Cappuccio, K. (2020). Automated UAS Aeromagnetic Surveys to Detect MBRL Unexploded Ordnance. *The Journal of Conventional Weapons Destruction*, 24(1), Article 13. Retrieved from <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol24/iss1/13>.

Kolster M.E., Wigh, M.D., Lima Simões da Silva, E., Vilhelmsen, T.B., & Dössing, A. (2022). High-Speed Magnetic Surveying for Unexploded Ordnance Using UAV Systems. *Remote Sensing*, 14, 1134. <https://doi.org/10.3390/rs14051134>.

Orlyuk, M., Marchenko, A., Romenets, A., Bakarzhieva, M., & Orliuk, I. (2024). Development of geomagnetic field induction module maps for the territory of Ukraine. *Geodynamics*, (1), 74—84. <https://doi.org/10.23939/jgd2024.01.074>.

Magnetometric detection of explosive objects: opportunities and prospects

M. Orlyuk¹, S. Kuznetsov², A. Romenets¹, A. Marchenko¹, I. Orliuk¹, 2025

¹S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²State Enterprise Research Center for Subsoil Use Problems «GEORESURS»

One of the modern methods of mapping territories, including those contaminated with explosive ordnance (EOD), is remote magnetic surveying using UAVs. The method is based on the use of modern magnetometers and gradiometers, in particular LEMI-026, which, in combination with UAVs, record the components of the magnetic field. According to the results of experimental studies at landfills, it allows identifying accumulations of various metal residues, including explosive objects.

Key words: magnetometer, LEMI-026, magnetic survey, magnetic anomalies, EO, UAV.

Reference

Orlyuk, M.I., Rolle, R., Romenets, A., Ulrich, B., & Zollner, H. (2016). Micromagnetic survey of the Great Belsk settlement of the Scythian period, Poltava region. *Geophysical Journal*, 38(5), 25—39. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i5.2016.107818> (in Russian).

Orlyuk, M.I., Romenets, A.A., Marchenko, A.V., Orlyuk, I.M., & Ivaschenko, I.N. (2015). Magnetic declination on the territory of Ukraine: results of observations and calculations. *Geophysical Journal*, 37(2), 73—85. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i2.2015.111307> (in Russian).

Prystay, A., & Ladanivsky, B. (2017). Establishment of unmanned vehicles for geophysical surveys. *Geophysical Journal*, 39(2), C. 109—125. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i2.2017.97378> (in Ukrainian).

Nikulin, A., DeSmet, T., Puliaiev, A., Zhurakhov, V., Fasullo, S., Chen, G., Spiegel, I., & Cappuccio, K. (2020). Automated UAS Aeromagnetic Surveys to Detect MBRL Unexploded Ordnance. *The Journal of Conventional Weapons Destruction*, 24(1), Article 13. Retrieved from <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol24/iss1/13>.

Kolster M.E., Wigh, M.D., Lima Simões da Silva, E., Vilhelmsen, T.B., & Dössing, A. (2022). High-Speed Magnetic Surveying for Unexploded Ordnance Using UAV Systems. *Remote Sensing*, 14, 1134. <https://doi.org/10.3390/rs14051134>.

Orlyuk, M., Marchenko, A., Romenets, A., Bakarzhieva, M., & Orliuk, I. (2024). Development of geomagnetic field induction module maps for the territory of Ukraine. *Geodynamics*, (1), 74—84. <https://doi.org/10.23939/jgd2024.01.074>.