

Застосування безпілотних апаратів для геофізичних досліджень

© А. Пристай¹, Б. Ладанівський², 2017

¹Львівський центр Інституту космічних досліджень
НАН та ДКА України, Львів, Україна

²Карпатське відділення Інституту геофізики НАН України, Львів, Україна
Надійшла 26 січня 2017 р.

Приведен обзор особенностей основных методов аэромагнитной съемки и рассмотрены перспективы применения этих методов с новым типом носителей, таким как дистанционно пилотируемые малые беспилотные летательные аппараты — коптеры, или дроны. В связи с появлением нового перечня требований к бортовым магнитометрам таких летательных аппаратов описана разработка соответствующего прибора и приведено сравнение технических параметров созданного феррозондового магнитометра LEMI-026 и подобного зарубежного прибора. Отмечены преимущества магнитометра LEMI-026 перед известным прибором по наиболее важным параметрам — порогу чувствительности и, особенно, потреблению энергии. Приведены результаты испытаний двух экспериментальных образцов магнитометров LEMI-026 относительно возможности получения данных, пригодных для дальнейшей обработки. Показано, что сильные аномалии магнитного поля могут быть уверенно выделены. Указаны проблемы, требующие решения для более результативного применения малогабаритных легких беспилотных летательных аппаратов с магнитометром. Подчеркнуто, что для использования преимущества векторных измерений, которые предоставляет феррозондовый датчик, методика приведения системы координат подвижного датчика к геомагнитной системе координат требует новых подходов. С помощью имеющихся алгоритмов, предназначенных для стационарно установленных магнитометров, эту проблему можно решить лишь частично. Дополнительного внимания требует и система подвеса для разделения по механическим колебаниям двигательной установки дрона и бортового магнитометра.

Ключевые слова: аэромагнитная разведка, дрон, магнитометр, испытания.

Вступ. Магнітометрію широко застосовують для дослідження геологічної будови земної кори та пошуків корисних копалин, що ґрунтуються на вивченні особливостей розподілу магнітного поля, викликаних магнітними властивостями гірських порід (див., наприклад: [Broughton Edge, Laby, 2012]). Магнітне розвідування вивчає магнітні

аномалії, спричинені геологічними тілами, намагніченими або нині (індукована намагніченість), або в попередні геологічні епохи (залишкова намагніченість). Намагніченість цих тіл визначають за наявністю ферромагнітних мінералів, наприклад магнетиту, піротину. Для вивчення великих територій або ділянок з утрудненим доступом (ліси,

болота, мілководдя) найпоширенішим методом магніторозвідування є аеромагнітні дослідження. Донедавна їх здійснювали переважно зі спеціалізованих літаків і вертольотів. На сьогодні найчастіше застосовують дистанційно пілотовані транспортні засоби або безпілотні літальні апарати — коптери (дрони). Їх використання під час регіональних геофізичних досліджень, розвідування й картування корисних копалин дає змогу виконувати набагато ширший спектр завдань. Це, наприклад, пошук закритих ґрунтом археологічних ділянок, де зміна концентрації слабوماгнітних мінералів, таких як дрібнозернисті оксиди заліза магнетит або магеміт, за людської діяльності зумовлює збільшення магнітної сприйнятливості ґрунту [Dyson et al., 2007; Linford, 2009; Stull, 2015]. Картування магнітних властивостей ґрунтів потрібне в разі застосування методів компенсації впливу ґрунту для виявлення захованих металевих предметів (локальні металеві об'єкти, трубопроводи, міни та ін.) з використанням електромагнітних датчиків, вивчення дрібномасштабних просторових змін магнітної сприйнятливості ґрунтів тощо [Das, 2009; Pasion et al., 2009]. Цифрове картування ґрунту може зробити значний внесок у передбачення розподілу параметрів і просторової структури ґрунту в ландшафті з використанням моделей. На першому етапі таких досліджень в основному класифікують типи ґрунтів, з розвитком методики можна досліджувати щораз більшу кількість їхніх параметрів [Dobos et al., 2006; Mayr, 2009].

Основні методи дослідження глибинної будови Землі. Метод ZTEM (*z-axis tipper electromagnetic*). За цим методом до вертольота на спеціальному підвісі чіпляють індукційний зонд у вигляді котушки діаметром близько

7 м, яка під час польоту реєструє вертикальну компоненту природного змінного магнітного поля [Lo, Zang, 2008; Lo et al., 2009]. Дві горизонтальні складові реєструють за допомогою розташованої на землі базової станції. Польоти здійснюють над окремими профілями або системою профілів, покриваючи вимірюваннями певну площу. Теорія методу в цілому дуже близька до магнітотелуричних (МТ) та магнітоваріаційних (МВ) зондувань в аудіодіапазоні [Wannamaker, Legault, 2014; Holtham, Oldenburg, 2010]. Поле первинного джерела, як і в магнітотелуриці, описують плоскою хвилею, яка, взаємодіючи з неоднорідностями електропровідності в Землі, індукує вторинне змінне в часі та просторі магнітне поле. Базова станція реєструє варіації горизонтальних компонент B_x та B_y , які пропорційні первинному полю, а бортовий датчик реєструє варіації вертикальної компоненти B_z , що пропорційна вторинному індукваному полю. Відношення спектрів вертикальної і горизонтальної компонент дає змогу побудувати передавальні функції (типери): $B_z = T_{zx} B_x + T_{zy} B_y$.

Типери (T_{zx} , T_{zy}) є комплексними функціями частоти, інваріантними до напрямку, можуть бути подані у вигляді дійсних і уявних індукційних стрілок і за своєю теоретичною суттю пов'язані з градієнтом провідності. Іншими словами, вони чутливі не до самої провідності, а до її змін (відхилень від середнього, аномалій). Побудова таких передавальних функцій (у різних формах) на карті дає змогу виділити аномалії електропровідності на досліджуваній території. Додатково можна проводити невелику кількість опорних наземних МТ-зондувань для запобігання невизначеності під час моделювання та інтерпретації результату ZTEM [Wannamaker, Legault, 2014]. Очікувані

глибини досліджень за середніх типових для верхніх шарів Землі значень питомого опору становлять від перших сотень метрів до приблизно 2000 м.

У цьому методі є низка особливостей. Сучасним магнітометром, який прикріплюють до дрона, можна вимірювати три компоненти поля на борту плюс два канали нахиломірів. Базова станція на землі також вимірює три компоненти магнітного поля. За допомогою цих п'яти каналів дані, що отримані з борту дрона, можна привести до геомагнітної системи координат, подібно до того, як це робиться для МВ даних [Ладанівський, 2013], з урахуванням руху давача. Якщо рух нерівномірний, а позиціонування не надто точне, можна застосувати усереднення і згладжування для мінімізації впливу неточності. Далі розраховують передавальні функції.

За наявності більшої кількості дачців з'являється більше варіантів, ніж у стандартному методі ZTEM, наприклад, такі розрахунки передавальних функцій:

а) за даними, отриманими лише з дрона, подібно до одної станції, — найімовірніше, дані будуть зашумлені;

б) з використанням даних з дрона та базової станції (метод віддаленої станції) — є надія на кращий результат;

в) подібно до методу ZTEM: вертикальна компонента з дрона, горизонтальні — з наземної станції, ймовірність результату — як і в разі віддаленої станції.

Аеромагнітне знімання. Як відомо, аеромагнітне знімання використовує літальні апарати для дослідження просторового розподілу повного магнітного поля (модуля) над певною територією. Значення поля залежить від магнітних властивостей мінералів аномалієутворювального тіла, його гео-

метричних параметрів та розташування відносно давача поля. Вимірювання виконують на літальному апараті, а також синхронно на базовій наземній станції, щоб усунути вплив часових варіацій поля під час польоту. Аеромагнітне знімання ефективно для картування поверхневих і підповерхневих геологічних структур, особливо для виявлення прихованих розломів, наявності вивержених і вулканічних порід. Бортовим ферозондовим магнітометром (ФЗМ) реєструють три складові вектора напруженості магнітного поля, для кожного моменту часу й простору розраховують його модуль. При цьому не потрібно зводити дані до геомагнітних координат, оскільки модуль вектора не залежить від системи координат, що підвищує точність обчислень.

Бортовим приладом менш точно вимірюють повне поле, ніж варіації, але інтерес становлять саме варіації поля. Огляд літератури показав, що аеромагнітне знімання можна ефективно здійснювати і за їх вимірюванням [Korhonen, 2005; Reeves, 2005].

За цим методом вимірювання проводять уздовж мережі профілів (маршрутів польоту), покриваючи таким чином певною сіткою досліджувану територію. Для надійного виділення більшості приповерхневих аномальних об'єктів необхідно, щоб відношення відстані між суміжними маршрутами (профілями) до висоти польоту не перевищувало 2:1. На практиці застосовують і вищі співвідношення (в публікаціях трапляються значення 2,7; 3,33; 3,75; 6,7 і навіть 10) [Ball et al., 2015]. Тоді, втрачаючи інформацію про приповерхневі аномалії, меншими ресурсами покривають більшу територію, досліджуючи глибші шари.

При обробці даних зі значень рухомого магнітометра найчастіше вида-

ляють добову варіацію, отриману від базової станції, та, за потреби, враховують курсову поправку. Доволі часто курсовою поправкою нехтують через те, що вона може бути незначною порівняно з шумами приладу. За даними обробки будують магнітні карти, а в результаті інтерпретації розраховують геометричні параметри, глибину залягання об'єктів, які спричинили аномалію, роблять висновок щодо їх речовинного складу.

Просторовий градієнт поля. Розрахувати просторовий градієнт повного поля можна лише на підставі даних з бортового давача. Якщо задатись якоюсь невеликою відстанню лінії польоту, наприклад 50 м, і допустити, що за час польоту дрона вздовж цієї лінії поле не змінюється (або зміни співмірні з точністю вимірювань), то різниця значень, поділена на відстань, є градієнтом магнітного поля, який має чіткіше виділити контури аномалій. Щось подібне роблять за сканування морського дна ехолотами, радіолокаційного дослідження Землі з супутників; в астрономії та інших галузях це носить назву «синтезована апертура» [Верба и др., 2010]. Такий розрахунок можна виконати і на підставі даних аеромагнітного знімання для інтерпретації його результатів. Слід зазначити, що в публікаціях надається перевага вимірюванню градієнта над вимірюванням напруженості полів [Reeves, 2005].

Щоб зробити висновок стосовно переваги якогось з описаних методів досліджень, слід отримати експериментальні дані і спробувати оцінити результат. У зв'язку з тим, що магнітне поле від поверхневих неоднорідностей є досить слабким навіть зовсім близько від поверхні Землі, під час геомагнітних спостережень за допомогою безпілотного літального пристрою ви-

никає питання щодо можливостей давачів магнітного поля реєструвати варіації саме цього геомагнітного поля на фоні шумів самого магнітометра і, тим більше, значних завад від працюючих електродвигунів носія [Unwin, Postula, 2015]. Звичайно, можна застосувати відомі методи виділення корисного сигналу на фоні шумів. Так, у додатку до публікації, присвяченій методу обробки МТ даних з віддаленої станції [Clarke et al., 1983], наведено формули для розрахунку енергії варіацій корисного сигналу і шумів на підставі даних з локальної і віддаленої точок. У частотному вимірі також є можливість розрахувати прогнозований (очікуваний) корисний сигнал, тобто яким би він був за відсутності шумів. Можна побудувати графік співвідношення сигнал/шум уздовж маршруту польоту на одному чи декількох періодах, що дає змогу зробити висновки стосовно відносної достовірності і надійності застосування згаданих вище методів. Якщо співвідношення сигнал/шум буде більшим за одиницю, можна очікувати, що профілі (вздовж ліній польоту) чи карти (за площею) енергії прогнозованого сигналу дадуть корисну інформацію, подібно до аеромагнітного знімання. Хоча, найімовірніше, перевагу слід надавати розподілу типерів у методі ZТЕМ, оскільки всі розрахунки проводять у частотному вимірі.

Розробка ФЗМ для малих носіїв. На підставі попереднього аналізу можна дійти висновку, що ефективно впровадження методів магнітних досліджень з борту малих рухомих носіїв потребує дуже чутливих магнітометрів для надійного виявлення аномалій. Крім того, в разі для знімання великих площ необхідно мати мобільний легкий пристрій для продуктивних вимірювань за низьких витрат. Нині для аеромаг-

нітного розвідування найчастіше використовують скалярні магнітометри, які мають дуже високу чутливість, а деякі з них — помірну масу для застосування з безпілотними літальними апаратами. Наприклад, рівень шуму магнітометра G-822A на парах цезію менший за $0,001 \text{ нТл} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ (еф.) при частоті дискретизації $0,1 \text{ Гц}$, маса давача і електронного модуля дорівнює 339 і 623 г відповідно [сайт Geometrics]. Однак істотним недоліком скалярних магнітометрів є вимірювання виключно модуля магнітного поля, що обмежує можливості інтерпретації даних.

Для отримання вектора магнітного поля слід вимірювати всі три компоненти. Найпридатнішим для цього є ферозондові магнітометри через їх низькі масу, рівень шуму, енергоспоживання і вартість. Наприклад, відомий ФЗМ, призначений для застосування на борту дрона, має рівень шуму менш як $0,02 \text{ нТл} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ (еф.) на частоті 1 Гц , частоту дискретизації 200 Гц , споживану потужність 6 Вт , масу давача і блока електроніки 200 і 500 г відповідно [сайт SENSYS GmbH]. На жаль, немає інформації про систему збору даних для цього ФЗМ, а його споживана потужність висока для невеликих портативних батарей, і так обтяжених двигунами дрона. Отже, необхідна адаптація високочутливих ФЗМ до вимог невеликого розміру і малої потужності для рухомих носіїв. Розглянемо можливість такої адаптації ФЗМ.

Найважливішим параметром якості магнітометра є його магнітний шум, який виникає через періодичну зміну намагніченості осердя давача ФЗМ і залежить від вибору матеріалу осердя давача, режиму його відпалу і способу збудження, а крім того — від вибору матеріалу корпусу давача. Передбачається, що якість сучасних електронних

компонентів, які використовують для виробництва ФЗМ, дає змогу нехтувати їх впливом на кінцеві параметри. Беручи до уваги дуже обмежену енергетичну спроможність дрона, необхідно зменшити, наскільки це можливо, споживану потужність ФЗМ зі збереженням низького рівня шуму, який, як правило, збільшується зі зниженням споживаної потужності. До того ж через рух безпілотника має бути розширений частотний діапазон ФЗМ, тому що зазвичай такі магнітометри призначені для вимірювання повільних коливань магнітного поля до частоти приблизно 1 Гц . Нарешті, для розширення можливості застосування ФЗМ у конфігурації з дроном, наприклад, для виявлення малих локальних неоднорідностей на поверхні Землі або під нею, важливо оцінити рівень сигналів, створюваних такими локальними об'єктами. Згідно з аналізом, навіть для малої сфери радіусом 1 см очікуваний рівень сигналу на висоті порядку $0,5 \text{ м}$ становитиме $0,5\text{—}0,9 \text{ нТл}$ [Prystai et al., 2016].

Докладний аналіз можливостей зниження споживаної потужності за збереження низького рівня шуму ФЗМ подано у праці [Kogepanov, Marusenkov, 2012]. З урахуванням викладених у ній рекомендацій розроблено спеціалізований магнітометр LEMI-026, який має низку переваг над найкращим магнітометром, який описано у публікаціях про орієнтовані на безпілотники ФЗМ — MagDroneOne [сайт SENSYS GmbH]. За даними наведеної таблиці, розроблений магнітометр має суттєві переваги над ФЗМ MagDroneOne за найважливішими параметрами — порогом чутливості і, особливо, споживанням енергії. Крім того, за наявними даними можна припустити, що MagDroneOne є лише ФЗМ, тоді як LEMI-026 є завершеним приладом, який може бути викорис-

таний підвішеним до дрона повністю автономно.

Інша перешкода застосуванню ФЗМ виникає внаслідок постійних змін його осей орієнтації, а також відстані до межі повітря—земля під час магнітного розвідування. Це дуже ускладнює процес вимірювання та інтерпретації даних [Когеранов, Tsvetkov, 2005]. У першому наближенні цю проблему проаналізовано нижче, але вона ще чекає продовження теоретичних досліджень і розробки експериментальної ідеології, що дає змогу отримати остаточні результати з високою точністю.

Результати обробки даних політних випробувань ФЗМ, закріпленого на дроні. Проведемо аналіз результатів,



Рис. 1. Дослідний магнітометр у польоті.

Порівняння технічних параметрів магнітометрів LEMI-026 і MagDrone One

Параметр	LEMI-026	MagDrone One
Діапазон вимірювання магнітного поля	± 70000 нТл	± 75000 нТл
Частотний діапазон	DC...100 Гц	Немає даних
Частота дискретизації	250 Гц	200 Гц
Рівень шуму при частоті 1 Гц	10 пТл	20 пТл
АЦП (6 каналів)	32 біт	24 біт
Діапазон вимірювання нахилу	$\pm 30^\circ$	Немає даних
Роздільна здатність нахиломіру	0,01°	»
Діапазон робочих температур	-20...+60 °C	-20...+50 °C
Напруга живлення	5 \pm 0,25 В	12 В
Максимальна споживана потужність	<1,2 Вт	6 Вт
Час запису з внутрішньої батареєю 1900 мА	5 год	Немає даних
GPS-приймач:		
помилка часової мітки максимальна	<100 нс	»
швидкість передачі даних	10 Гц	»
Цифровий інтерфейс	Серійний USB	Серійний USB
Обсяг внутрішньої пам'яті	8 Гб	512 Мб
Маса	<1,25 кг	0,7 кг
Розміри	Електронний блок з датчиком і акумулятором: діаметр 96×270 мм	Електронний блок: 205×105×45 мм Датчик: діаметр 35×365 мм

отриманих в експерименті з описаним вище ФЗМ, прикріпленим до легкого дрона на штанзі завдовжки 3 м (рис. 1). Спочатку було обчислено модуль вектора індукції магнітного поля для кожного моменту часу. Як видно з таблиці, дані від GPS-приймача ФЗМ надходять з частотою 10 відліків за секунду, а дані магнітних давачів — з частотою 250 Гц. Тому перший крок полягає у децимації даних магнітометрів до частоти дискретизації 10 Гц. Далі для кожного моменту часу розраховували модуль вектора індукції магнітного поля за формулою

$$F_f(t, x) = \sqrt{B_x(t, x)^2 + B_y(t, x)^2 + B_z(t, x)^2},$$

де $F_f(t, x)$ — модуль вектора індукції магнітного поля для давача в польоті як функція часу і просторової координати (символ x означає всі просторові координати для спрощення запису); $B_i(t, x)$ — компоненти вектора індукції магнітного поля. Слід зауважити, що для бортового магнітометра змінна часу і просторової координати однозначно пов'язані та залежать одна від одної. Кожному моменту часу відповідає певне розташування в просторі.

Як зазначено вище, мета аеромагнітного знімання — отримання просторового розподілу модуля індукції магнітного поля над досліджуваною територією. Тому з даних бортового магнітометра необхідно усунути вплив часових варіацій магнітного поля за час польоту. Для цього використано дані магнітометра LEM1-026, встановленого як базовий у регіоні досліджень. З його даними проведено такі самі маніпуляції, як і з даними бортового магнітометра, — децимацію та розрахунок модуля повного поля $F_b(t)$. Далі для кожного моменту часу, або для кожної точки в просторі за руху бортового магнітометра (що є те саме), було розраховано

різницю між значеннями поля для рухомої і базової точок:

$$F(x) = F_f(t, x) - F_b(t).$$

Траєкторію польотів дрона, показану на рис. 1, побудовано на підставі даних GPS-приймача, вбудованого в магнітометр (рис. 2, а). На рис. 2, б подано результат магнітного знімання як залежність різниці між виміряними значеннями модулів напруженості магнітного поля рухомого та базово-

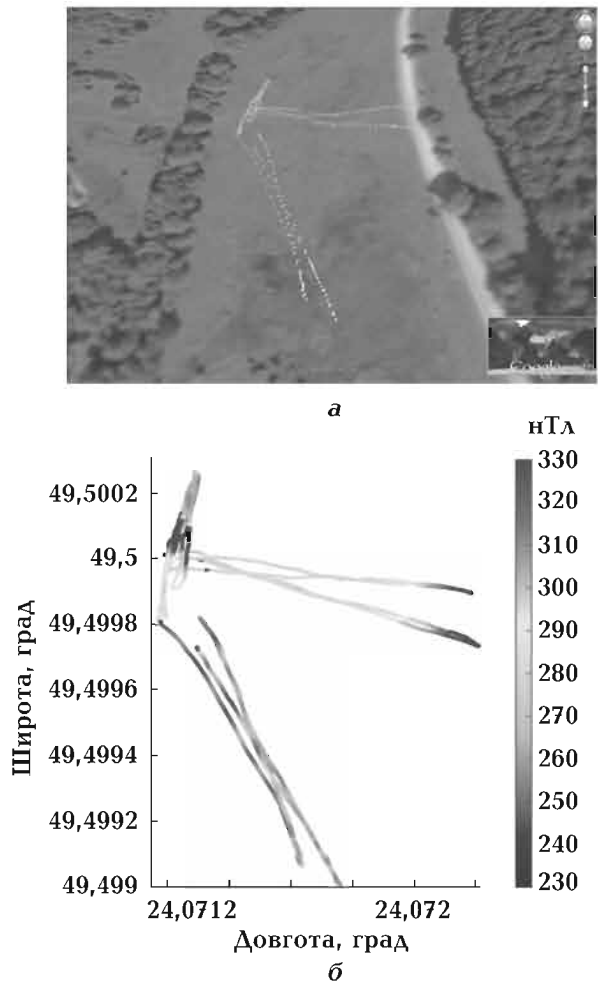


Рис. 2. Результати експериментальних досліджень: а — траєкторія польоту дрона під час випробувань; б — відповідна різниця розрахованих модулів індукції магнітного поля, виміряними магнітометрами на дроні та базовим.

го магнітометрів від координат рухомого. Між двома приладами постійна різниця значень становить приблизно 260—280 нТл. Уздовж різних профілів середні значення трохи різняться (північ—південь — середнє значення близько 260 нТл, захід—схід — у середньому близько 280 нТл). Згідно з аналізом записів компонент поля, найімовірніше це пов'язане з тим, що на різних профілях давачі було зорієнтовано по-різному щодо сторін світу (зовнішнього магнітного поля): компонента B_x у першому випадку була спрямована на північний захід, у другому — на захід.

Спектри компонент індукції магнітного поля. Наступний крок — аналіз спектрів компонент як бортового, так і базового магнітометра для оцінювання рівнів завад і можливості застосування методу ZТЕМ.

Базовий магнітометр було встановлено стаціонарно, тому від нього очі-

кували такі самі спектри компонент вимірюваної індукції магнітного поля, як і від звичайної МТ станції з ферозондовими давачами. В цьому випадку енергія спектра компонент очікувано наростала від 1 Гц у бік довгих періодів (рис. 3).

Спектри коливань даних нахиломірів T_x , T_y бортового магнітометра (рис. 4) підтверджують його рух. Звичайно спектри сигналів бортового магнітометра не зовсім коректні в системі координат, пов'язаних з магнітним полем Землі, оскільки азимути осей x та y постійно змінюються під час польоту. Спектри компонент можна розглядати як спектри в системі координат давача. Вони розраховані в основному для експрес-оцінювання того, що можна очікувати від ферозондів, установлених на дроні, в русі. Проте ці спектри дають змогу оцінити величини коливань у даних бортового приладу: як у

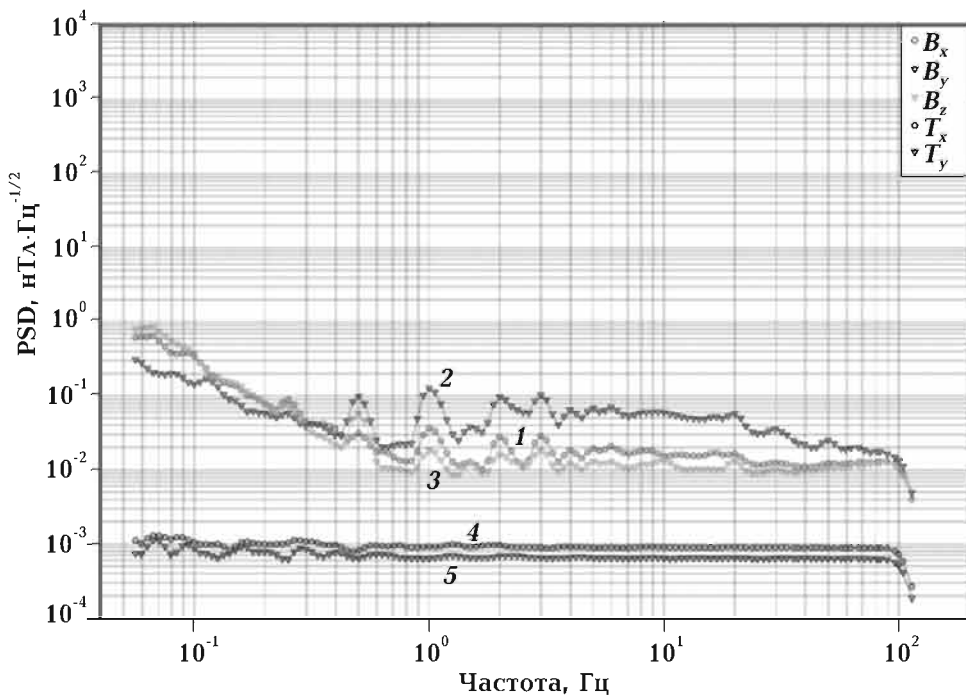


Рис. 3. Спектральна густина енергії компонент стаціонарного (базового) магнітометра Lemі-026. Криві 1—3 — пояснення у верхньому правому куті рисунка); 4, 5 — спектри даних нахиломірів T_x , T_y , град· Гц^{-1/2}.

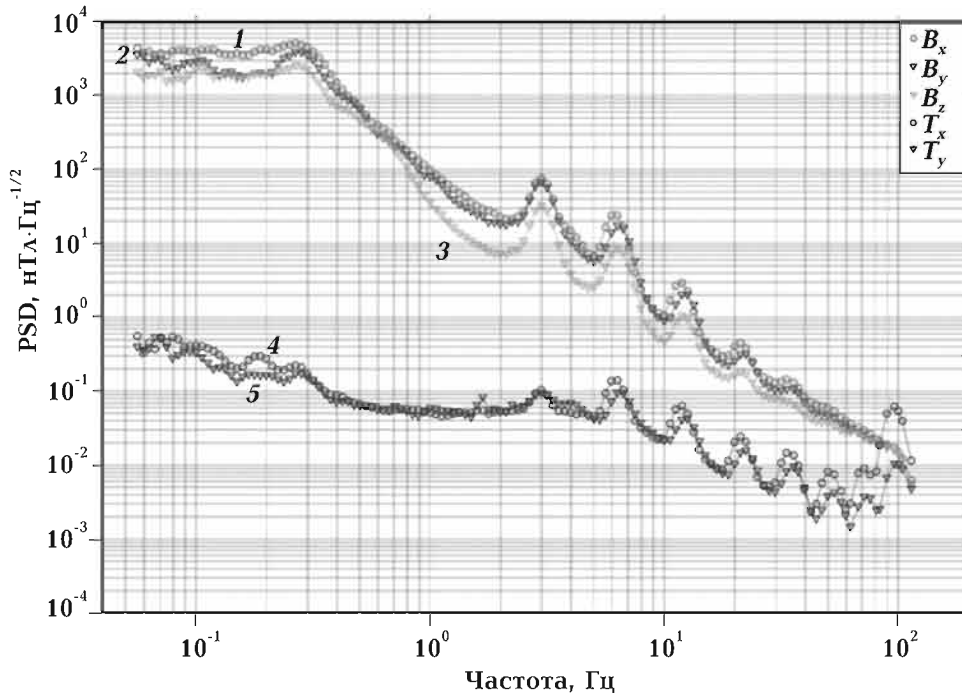


Рис. 4. Спектральна густина енергії компонент рухомого (бортового) магнітометра Lemi-026. Умовні позначення див. на рис. 3.

спектрах магнітних компонент, так і в спектрах нахиломірів виявлено інтенсивні коливання підвісу з частотою приблизно 3 Гц і його гармоніки 6, 12, 24, 36 і 48 Гц.

Слід зазначити, що від індукційних зондувань, які проводять за допомогою МТ та МВ станцій з ферозондовими датчиками, як правило, результат очікують на періодах, довших від 10 с. Власні шуми ФЗМ становлять 0,1—0,01 нТл·Гц^{-1/2} у цьому діапазоні, а на частоті 0,1 Гц (10 с) густина енергії природних варіацій дорівнює 0,15—0,40 нТл·Гц^{-1/2}. Інакше кажучи, очікуємо, що корисний сигнал варіацій магнітного поля у декілька разів має перевищувати власні шуми датчика. Водночас аналіз спектрів на рис. 4 показав, що спектральна густина енергії сигналів бортового магнітометра близько 0,1 Гц (10 с) становить приблизно 2000—4000 нТл·Гц^{-1/2}, тобто рі-

вень сигналу бортових датчиків більш як у 10 000! разів перевищує рівень очікуваних варіацій природного поля.

Корекція системи координат бортового датчика. Наступний крок — приведення даних бортового приладу до геомагнітної системи координат. Для цього було модифіковано алгоритм, розроблений для метеомагнітної станції LEMI-017 [Ладанівський, 2013]. На відміну від станції LEMI-017, яку встановлюють нерухомо, датчики дронівського магнітометра постійно перебувають у русі. Для нерухомої станції можна усереднити значення нахиломірів за весь період реєстрації даних, і тоді розраховані значення кутів є досить надійними у статистичному розумінні. У випадку магнітометра в русі поворот осей датчиків потрібно розраховувати для кожного відліку, тому що орієнтація осей постійно змінюється. Модифікація алгоритму поля-

гала у врахуванні цієї особливості. При цьому як дані магнітометрів, так і дані GPS-приймача піддавали децимації до частоти дискретизації 1 Гц, після цього виконували повороти осей.

Спектри компонент магнітного поля, приведені до системи координат HDZ, практично не відрізняються від спектрів, наведених на рис. 3 і 4.

Аналіз записів нахиломірів на бортовому приладі показав, що стандартне відхилення давача під час польоту від середнього значення дорівнювало $0,5^\circ$, а максимальне — близько 2° . Водночас напрямки осей базового магнітометра, згідно з показами його нахиломірів, відрізнялися від горизонталі на кути: $T_x = -0,8^\circ$, $T_y = -1,0^\circ$. Це дало змогу зроби-

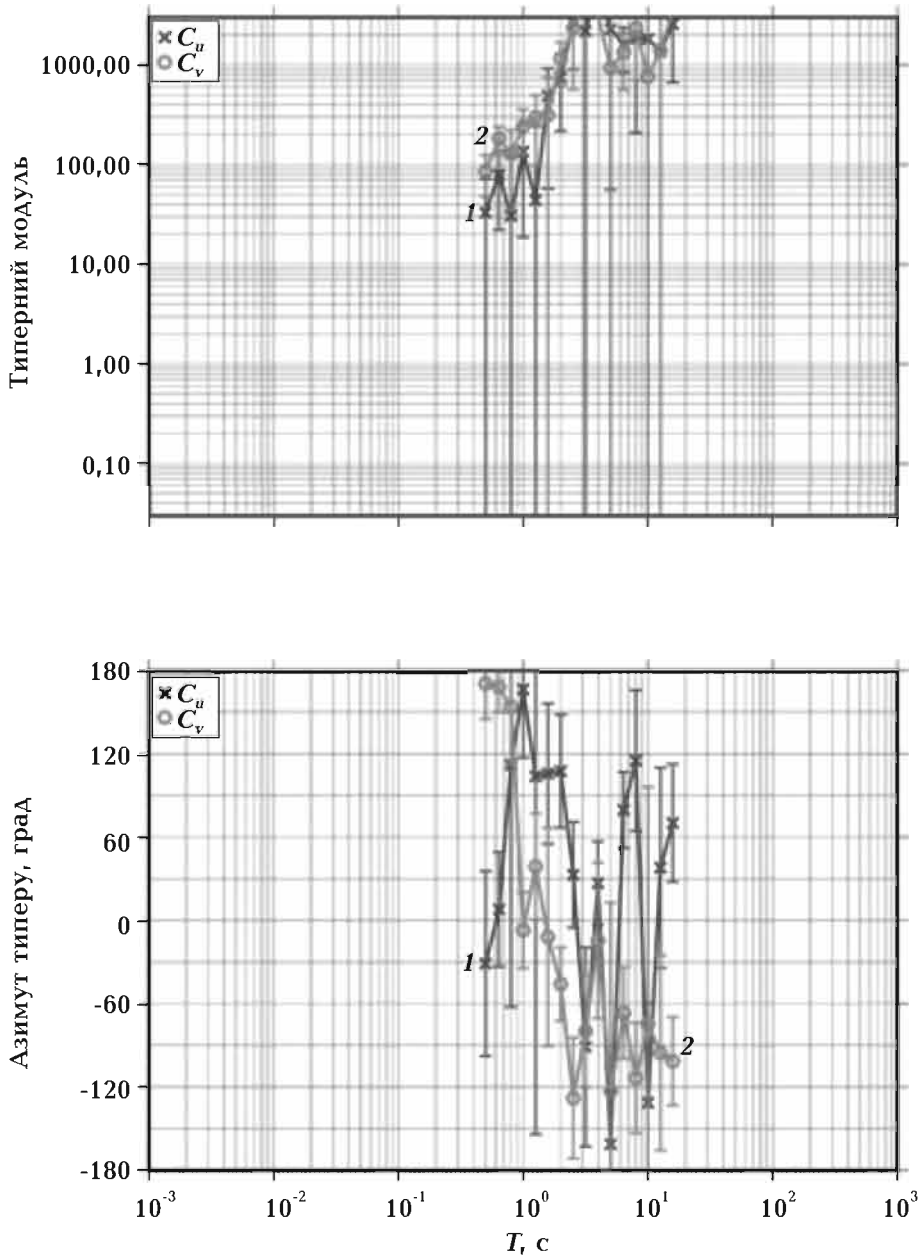


Рис. 5. Магнітоваріаційні передавальні функції, отримані методом ZTEM. Значення компонент B_x та B_y взято зі стаціонарної точки, а B_z — з бортового приладу.

ти попередній висновок, що довжини підвісу достатньо, щоб утримувати під час польоту горизонтальні осі давача в горизонтальному положенні, а вертикальну — у вертикальному з похибкою, співмірною з похибкою встановлення осей базового давача.

Під час приведення осей бортового магнітометра виявилась одна особливість. Оскільки давачі перебувають у постійному русі, проблематично одно-

значно відновити варіації компонент B_x та B_y в горизонтальній площині — азимут осей B_x і B_y можуть постійно змінюватися. Можна відновити варіації компонент B_x та B_y за рахунок часткового усереднення з припущенням, що на час усереднення азимут осей B_x і B_y не змінюються, або використати дані базового магнітометра. Це буде доволі грубим наближенням, тому що в першому випадку давачі постійно рухаються, а в

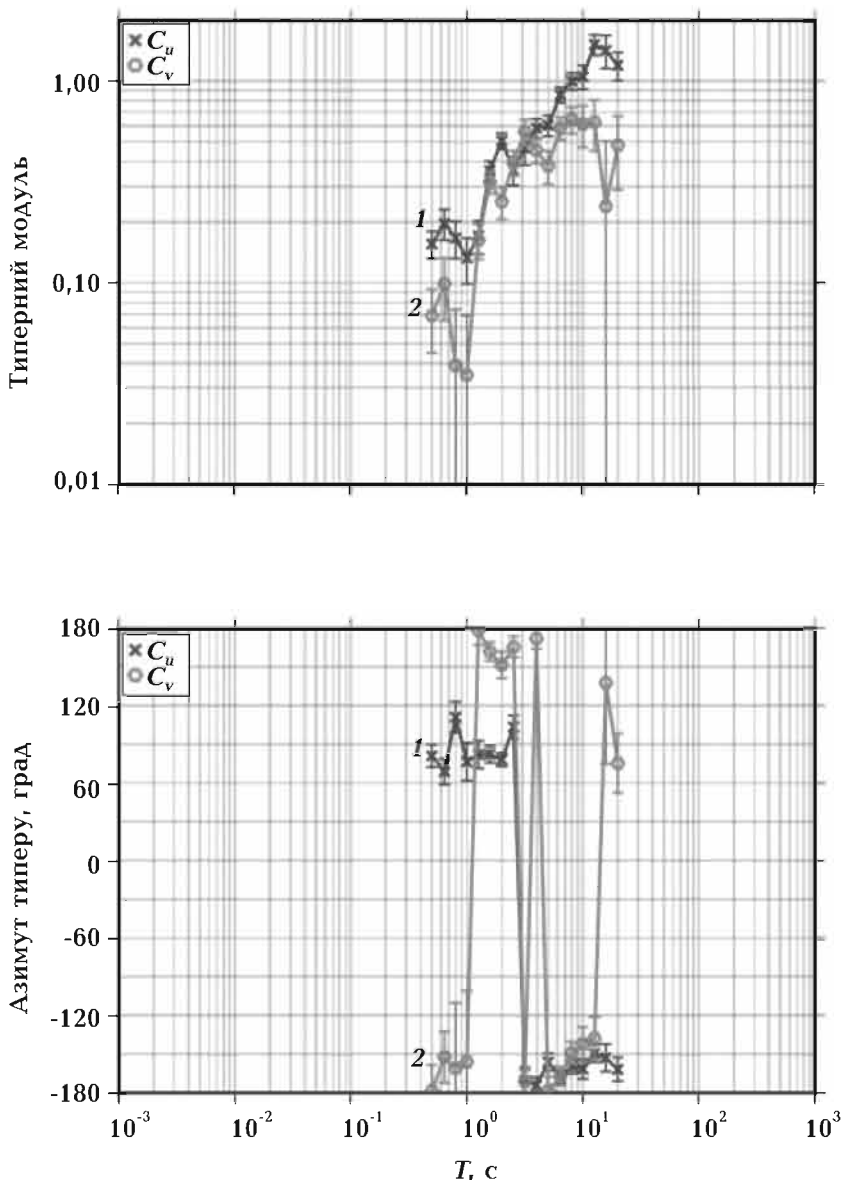


Рис. 6. Магнітоваріаційні передавальні функції в точці встановлення базового магнітометра.

другому — спектри базового і бортового магнітометрів дуже різняться. Можна лише однозначно визначити величину горизонтальної компоненти, тобто значення B_x при умови, що $B_y=0$.

Для реалізації методу ZTEM потрібно мати вертикальну компоненту B_z з літального апарата і дві горизонтальні компоненти B_x та B_y зі стаціонарної наземної точки. Оскільки компоненту B_z вдається відновити повністю з бортового приладу, було зроблено спробу застосувати метод ZTEM до тестових даних. Вихідні дані обох станцій — стаціонарної та рухомої — було приведено до частоти дискретизації 10 Гц і застосовано описану вище процедуру перерахунку напрямків осей бортового датчика до системи координат HDZ. Було створено комбінований файл, у якому

компоненти B_x та B_y взято зі стаціонарної наземної точки, а B_z — з бортового магнітометра. За допомогою програми обробки МТ даних *lemimt* отримано оцінки передавальних функцій на підставі даних побудованого комбінованого файлу (рис. 5).

Додатково дані зі стаціонарної точки (всі три компоненти від одного базового приладу) теж було оброблено за допомогою програми *lemimt* (рис. 6). Результат практично не відрізняється від звичайної МВ передавальної функції в одній точці.

За теоретичним визначенням, індукційні стрілки не можуть перевищувати одиничне значення. Якщо у разі стаціонарної точки (див. рис. 6) ще можна сказати, що значення близькі до правдоподібних, то для методу ZTEM зна-

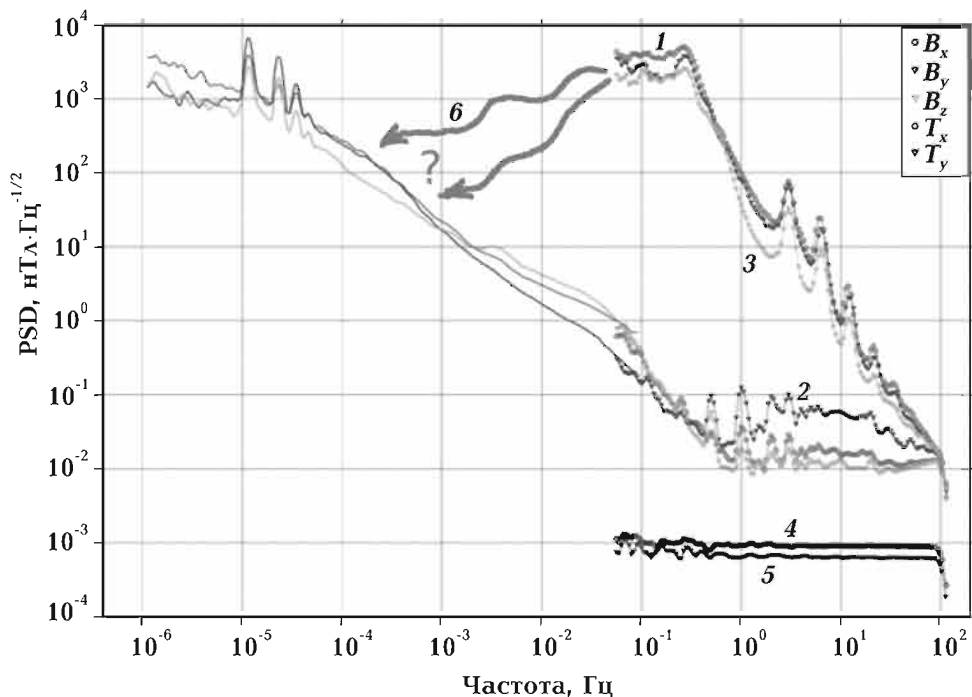


Рис. 7. Порівняння спектральної густини енергії PSD компонент магнітного поля. Криві 1—3 з символами в нижній частині рисунка належать до базового магнітометра; суцільні лінії — спектри компонент геомагнітного поля з обсерваторії «Львів», Криві з символами, поданими у верхній частині рисунка, відповідають даним бортового магнітометра. Криві 4, 5 — спектри нахиломірів базового магнітометра. Крива 6 — гіпотетична поведінка спектрів компонент бортових магнітометрів.

чення між 100 і 1000 дуже далекі від очікуваних. Отже, підтверджується висновок, що застосування магнітометра у конфігурації з дроном для методу ZTEM не дає результату.

Результативність аеромагнітного знімання. Аналіз рис. 2 показав, що аеромагнітне знімання, навіть у найпростішому варіанті, дає змогу виділити на досліджуваній території аномалії магнітного поля, зумовлені структурними неоднорідностями. Так, на рис. 2, б чітко видно очікувану аномалію біля його верхнього краю, оскільки в цьому місці закопано сталеву трубу, а також двічі підтверджену аномалію біля дороги, не відому перед тестуванням. Імовірно, це може бути трубопровід уздовж дороги.

Перспективи застосування магнітометра з безпілотником можна оцінити за даними рис. 7, на якому показано спектри компонент магнітного поля від різних магнітометрів. З використанням даних з частотою дискретизації 5 с, отриманих на геомагнітній обсерваторії «Львів» протягом 320 днів, від січня до листопада 2010 р., побудовано спектри з періодом до 11 днів. Видно повний збіг спектрів компонент періоду близько 20 с, де вони перекриваються, що є однозначним підтвердженням правильності роботи базового магнітометра. Дані бортового магнітометра демонструють у високочастотній частині спектра перевищення над природним рівнем сигналу та шумів (приладу, дрона і природних у тому числі) приблизно в 10 000 разів. Отже, на підставі аналізу даних рис. 7 можна дійти висновку, що співвідношення між спектральною густиною енергії, яку реєструють бортові давачі, та природним рівнем енергії варіацій зменшуватиметься у бік ниж-

чих частот (довших періодів). Так, на частоті 0,05 Гц (20 с) згадане співвідношення становить уже 2000—3000, а не 10 000, як на частоті близько 1 Гц. Через таку поведінку спектрів можна сподіватися на потенційну результативність аеромагнітного знімання за допомогою дронів, особливо якщо вони можуть довше автономно знаходитись у повітрі — приблизно до 2 год.

Висновки. Проаналізовано можливості застосування магнітометра з безпілотним літальним апаратом для аеромагнітного розвідування. В результаті сформульовано такі висновки.

1. Вивчено можливість приведення осей давачів бортового приладу до геомагнітної системи координат HDZ. За реєстрованими даними і використанням стандартних методів обробки без додаткової інформації однозначно це зробити неможливо. Можна лише надати напрямкам осей x та y горизонтальне положення, а осі z — вертикальне.

2. Усі спроби застосувати метод ZTEM до даних, отриманих від рухомого магнітометра, залишилися безуспішними, і перспектив зміни такої ситуації не видно.

3. Застосування даних рухомого магнітометра до методу аеромагнітного знімання дало частково позитивний результат. Як мінімум, сильні аномалії в магнітному полі виділяються чітко. Для визначення порогу можливості виділення слабших аномалій потрібні додаткові випробування.

4. Для поліпшення співвідношення сигнал/шум (за магнітним полем і кутами інклінометра) під час роботи дрона на профілі необхідна ретельна амортизація підвісу з метою розділення за механічними коливаннями рушійної установки дрона і бортового магнітометра.

Список літератури

- Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Г. Системы мониторинга воздушного, космического пространства и земной поверхности. Москва: Радиотехника, 2010. 680 с.
- Ладанівський Б. Т. Перерахунок магнітоваріаційних даних з довільної до геомагнітної системи координат. *Український антарктичний журнал*. 2013. № 12. С. 34—38.
- Ball L. B., Bloss B. R., Bedrosian P. A., Grauch V. J. S., Smith B. D., 2015. Airborne Electromagnetic and Magnetic Survey Data of the Paradox and San Luis Valleys, Colorado. Open-File Report 2015-1024, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. 23 p.
- Broughton Edge A. B., Laby T. N., 2012. The Principles and Practice of Geophysical Prospecting. Cambridge University Press, 404 p.
- Clarke J., Gamble T. D., Goubau W. M., Koch R. H., Miracky R. F., 1983. Remote-reference magnetotellurics: Equipment and procedures. *Geophys. Prospect.* (31), 149—170.
- Das Y., 2009. Soil magnetism and landmine (metal) detectors. In: J. A. Hannam, R. L. Van Dam, R. S. (eds.). *Harmon Workshop on Soil Magnetism: Multidisciplinary Perspectives, Emerging Applications and New Frontiers*. Report ERDC. P. 15—20.
- Dobos E., Carré F., Hengl T., Reuter H. I., Tóth G., 2006. Digital Soil Mapping as a support to production of functional maps. EUR 22123 EN, Luxemburg, Office for Official Publications of the European Communities. 68 p.
- Dyson L., Johnson C., Heppell E., Pieters M., 2007. Archaeological evaluation of wetlands in the Planarch area of North West Europe. The report. 91 p.
- Geometrics, OYO Corporation, <http://www.geometrics.com/geometrics-products/geometrics-magnetometers>.
- Holtham E., Oldenburg D. W., 2010. Three-dimensional inversion of ZTEM data. *Geophys. J. Int.* 182(1), 168—182. doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04634.x.
- Korepanov V., Marusenkov A., 2012. Flux-Gate Magnetometers Design Peculiarities. *Surv. Geophys.* (33), 1059—1079. doi:10.1007/s10712-012-9197-8.
- Korepanov V., Tsvetkov Yu., 2005. Gradient magnetometer system for balloons. *Proceedings of the 17th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, Sandefjord, Norway, 30 May — 2 June 2005*. P. 443—448.
- Korhonen J. V., 2005. Airborne Magnetic Method: Special Features and Review on Applications. *Geological Survey of Finland, Special Paper* (39), 77—102.
- Linford N., 2009. Archaeogeophysics: Applications and challenges for magnetic methods. In: J. A. Hannam, R. L. Van Dam, R. S. Harmon (eds.). *Workshop on Soil Magnetism: Multidisciplinary Perspectives, Emerging Applications and New Frontiers: Report*. ERDC. Report. P. 35—36.
- Lo B., Zang M., 2008. Numerical modeling of ZTEM (airborne AFMAG) responses to guide exploration strategies. *78th Annual International Meeting, SEG, Las Vegas, Expanded Abstracts* (27). P. 1098—1101.
- Lo B., Legault J. M., Kuzmin P., Combrinck M., 2009. ZTEM (Airborne AFMAG) tests over unconformity uranium deposits. *20th ASEG International Geophysical Conference and Exhibition, Australian Society of Exploration Geophysicists, Extended Abstracts*. 4 p.
- Mayr T., 2009. Digital Soil Mapping — spatial

- variability and prediction of soil properties. In: J. A. Hannam, R. L. Van Dam, R. S. Harmon (eds.). *Workshop on Soil Magnetism: Multidisciplinary Perspectives, Emerging Applications and New Frontiers: Report*. ERDC. Report. P. 41—45.
- Pasion L. R., Billings S. D., Oldenburg D. W., Li Y., Lhomme N., 2009. Soil compensation techniques for the detection of buried metallic objects using electromagnetic sensors, In: J. A. Hannam, R. L. Van Dam, R. S. Harmon (eds.). *Workshop on Soil Magnetism: Multidisciplinary Perspectives, Emerging Applications and New Frontiers: Report*. ERDC. Report. P. 64.
- Prystai A., Korepanov V., Dudkin F., Ladanivskyy B., 2016. Vector Magnetometer Application with Moving Carriers. *Sensors & Transducers* 207(is. 12), 44—49.
- Reeves C., 2005. *Aeromagnetic Surveys: Principles, Practice & Interpretation*. Published by Geosoft, 155 p.
- SENSYS GmbH, <http://www.sensysmagnetometer.com/en/magdrone-one.html>.
- Stull S. D., 2015. *From west to east: current approaches to medieval archaeology*. Cambridge Scholars Publishing, 275 p.
- Unwin N., Postula A., 2015. Motor Bourn Magnetic Noise Filtering for Magnetometers. *Sensors and Transducers* 193(is. 10), 161—169.
- Wannamaker P. E., Legault J. M., 2014. Two-dimensional joint inversion of ZTEM and MT plane-wave EM data for near surface applications. *27th Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, SAGEEP*. P. 134—139.

UAV application for geophysical research

© A. Prystai, B. Ladanivkyi, 2017

The paper provides an overview of the main features of the aeromagnetic survey techniques and some of their types with regards of their use with a new type of small unmanned carriers such as remotely piloted copters or drones. In connection with the emergence of a new set of requirements for on-board magnetometers for drones the development of the corresponding instrument was carried out. The comparison of the created flux-gate magnetometer LEMI-026 technical parameters with similar instrument from abroad is given; a number of its advantages over the known one by such the most important parameters — the sensitivity threshold and especially energy consumption — are noted. Using two constructed experimental models of magnetometer LEMI-026 the possibility of obtaining the data suitable for further processing was tested, and the results of these tests are described. It is shown that a strong anomaly of the magnetic field can be confidently identified and at the same time a number of problems that require solutions for more efficient use of small light UAV with a magnetometer was outlined. So, it is pointed that in order to take advantage of vector measurements that provides flux-gate sensor, the method of reducing the system of coordinates of mobile sensor to the geomagnetic coordinate system requires further upgrade. Existing algorithms for stationary magnetometers solve the problem only partially. Also further attention requires suspension system for separation by mechanical vibrations of drone motor and suspended magnetometer.

Key words: aeromagnetic exploration, drone, magnetometer, tests.

References

- Verba V. S., Neronskiy L. B., Osipov I. G., Turuk V. G., 2010. Systems monitoring air, outer space and the Earth's surface. Moscow: Radiotekhnika, 680 p. (in Russian).
- Ladanivskyy B. T., 2013. Reduction of magnetovariation al data from arbitrary to geomagnetic reference system. *Ukrayinskyy antarktychnyy zhurnal* (12), 34—38 (in Ukrainian).
- Ball L. B., Bloss B. R., Bedrosian P. A., Grauch V. J. S., Smith B. D., 2015. Airborne Electromagnetic and Magnetic Survey Data of the Paradox and San Luis Valleys, Colorado. Open-File Report 2015-1024, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. 23 p.
- Broughton Edge A. B., Laby T. N., 2012. The Principles and Practice of Geophysical Prospecting. Cambridge University Press, 404 p.
- Clarke J., Gamble T. D., Goubau W. M., Koch R. H., Miracky R. F., 1983. Remote-reference magnetotellurics: Equipment and procedures. *Geophys. Prospect.* (31), 149—170.
- Das Y., 2009. Soil magnetism and landmine (metal) detectors. In: J. A. Hannam, R. L. Van Dam, R. S. (eds.). *Harmon Workshop on Soil Magnetism: Multidisciplinary Perspectives, Emerging Applications and New Frontiers*. Report ERDC. P. 15—20.
- Dobos E., Carré F., Hengl T., Reuter H. I., Tóth G., 2006. Digital Soil Mapping as a support to production of functional maps. EUR 22123 EN, Luxemburg, Office for Official Publications of the European Communities. 68 p.
- Dyson L., Johnson C., Heppell E., Pieters M., 2007. Archaeological evaluation of wetlands in the Planarch area of North West Europe. The report. 91 p.
- Geometrics, OYO Corporation, <http://www.geometrics.com/geometrics-products/geometrics-magnetometers>.
- Holtham E., Oldenburg D. W., 2010. Three-dimensional inversion of ZTEM data. *Geophys. J. Int.* 182(1), 168—182. doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04634.x.
- Korepanov V., Marusenkov A., 2012. Flux-Gate Magnetometers Design Peculiarities. *Surv. Geophys.* (33), 1059—1079. doi:10.1007/s10712-012-9197-8.
- Korepanov V., Tsvetkov Yu., 2005. Gradient magnetometer system for balloons. *Proceedings of the 17th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, Sandefjord, Norway, 30 May — 2 June 2005*. P. 443—448.
- Korhonen J. V., 2005. Airborne Magnetic Method: Special Features and Review on Applications. *Geological Survey of Finland, Special Paper* (39), 77—102.
- Linford N., 2009. Archaeogeophysics: Applications and challenges for magnetic methods. In: J. A. Hannam, R. L. Van Dam, R. S. Harmon (eds.). *Workshop on Soil Magnetism: Multidisciplinary Perspectives, Emerging Applications and New Frontiers: Report*. ERDC. Report. P. 35—36.
- Lo B., Zang M., 2008. Numerical modeling of ZTEM (airborne AFMAG) responses to guide exploration strategies. *78th Annual International Meeting, SEG, Las Vegas, Expanded Abstracts* (27). P. 1098—1101.
- Lo B., Legault J. M., Kuzmin P., Combrinck M., 2009. ZTEM (Airborne AFMAG) tests over unconformity uranium deposits. *20th ASEG International Geophysical Conference and Exhibition, Australian Society of Exploration Geophysicists, Extended Abstracts*. 4 p.
- Mayr T., 2009. Digital Soil Mapping — spatial

- variability and prediction of soil properties. In: J. A. Hannam, R. L. Van Dam, R. S. Harmon (eds.). *Workshop on Soil Magnetism: Multidisciplinary Perspectives, Emerging Applications and New Frontiers: Report*. ERDC. Report. P. 41—45.
- Pasion L. R., Billings S. D., Oldenburg D. W., Li Y., Lhomme N., 2009. Soil compensation techniques for the detection of buried metallic objects using electromagnetic sensors, In: J. A. Hannam, R. L. Van Dam, R. S. Harmon (eds.). *Workshop on Soil Magnetism: Multidisciplinary Perspectives, Emerging Applications and New Frontiers: Report*. ERDC. Report. P. 64.
- Prystai A., Korepanov V., Dudkin F., Ladnivskyy B., 2016. Vector Magnetometer Application with Moving Carriers. *Sensors & Transducers* 207(is. 12), 44—49.
- Reeves C., 2005. *Aeromagnetic Surveys: Principles, Practice & Interpretation*. Published by Geosoft, 155 p.
- SENSYS GmbH, <http://www.sensysmagnetometer.com/en/magdrone-one.html>.
- Stull S. D., 2015. *From west to east: current approaches to medieval archaeology*. Cambridge Scholars Publishing, 275 p.
- Unwin N., Postula A., 2015. Motor Bourn Magnetic Noise Filtering for Magnetometers. *Sensors and Transducers* 193(is. 10), 161—169.
- Wannamaker P. E., Legault J. M., 2014. Two-dimensional joint inversion of ZTEM and MT plane-wave EM data for near surface applications. *27th Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, SAGEEP*. P. 134—139.