

ПРОУЧВАНЕ НА ЗЕМНИТЕ НЕДРА С БЕЗПИЛОТНИ ЛЕТАТЕЛНИ АПАРАТИ

Павлин Граматиков¹, Джулиан Тахов²

¹Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: pgramatikov@space.bas.bg, juliantahov@gmail.com;

²Д Аероспейс <https://d-aerospace.com/>

Ключови думи: *подповърхностно радиолокационно сондиране, хексакоптер, откриване на близки под повърхността цели, магнитно изследване с безпилотните летателни апарати, безпилотни летателни системи, геофизика*

Резюме: *Изложени са приложения на безпилотните летателни апарати при геоложко проучване и картографиране на земните недра. Разгледани са бордни геофизични сензори като магнитни, електромагнитни, инфрачервени, радарни, сензори за гама-лъчи и други. Обсъдени са тяхното използване и специфични проблеми, предимства и недостатъци. Приложени са графични и таблични данни. Представена е авторска разработка на шесткоптер и е предложена за него бордна апаратура, обезпечавача проучване на земните недра.*

SUB-SURFACE EXPLORATION WITH UNMANNED AERIAL VEHICLE

Pavlin Gramatikov¹, Dzhulian Tahov²

¹Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences

²D Aerospace

e-mail: pgramatikov@space.bas.bg, juliantahov@gmail.com;

Keywords: *ground penetrating radar, hexacopter, near-surface targets detection, UAV-borne magnetic survey, Unmanned Aircraft Systems (UAS), Geophysics*

Abstract: *Applications of UAVs in geological exploration and subsurface mapping are outlined. Airborne geophysical sensors such as magnetic, electromagnetic, infrared, radar, gamma ray sensors and others are discussed. Their use and specific problems, advantages and disadvantages are discussed. Graphical and tabular data are appended. The author's development of a hexacopter and proposed on-board instrumentation for it, providing subsurface exploration, are presented.*

Въведение

Безпилотните летателни системи (БЛС), безпилотните летателни апарати (БЛА) или дистанционно управляемите летателни апарати (РРА), са въздухоплавателни средства без пилот на борда. Понастоящем БЛС са използват за геоложко и топографско картографиране, контрол на крайбрежието, инспекции на свлачища и др. Геофизичните БЛС използват геофизични сензори като магнитни, електромагнитни, инфрачервени, радарни, сензори за гама-лъчи и др. [1, 10].

Поради ограниченията на полезния товар и ограничено времето за полет, геофизичните БЛС използват олекотени сензори. Мултироторните БЛА обикновено имат време на полет до 30 min и полезен товар между 1 и 10 kg [1].

БЛС оборудвани с усъвършенстван софтуер и възможности за изкуствен интелект, могат да анализират геофизични данни в реално време и да предоставят на геолозите и изследователите ценна и полезна информация [1]. Друга област на напредък е интегрирането на различни сензори и технологии в една платформа на БЛС [1]. Например, БЛС могат да бъдат оборудвани едновременно с магнитометри, спектрометри и други геофизични инструменти за

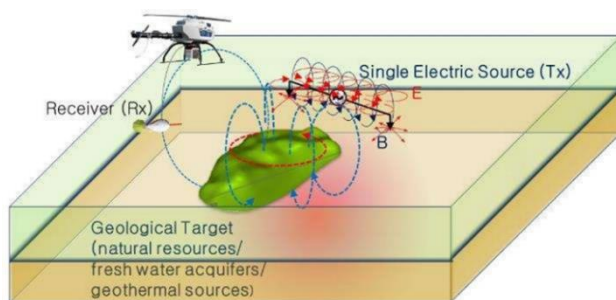
събиране на широк спектър от данни. Този мултисензорен подход осигурява цялостен поглед върху изследвания обект, което позволява на геолозите да разберат по-добре състава на минералите и потенциала на даден район [1].

Една от най-големите пречки при събирането на висококачествени магнитни данни от системата БЛА-магнитометър е интерферентното магнитно поле от БЛА [1]. Системата на БЛА не е немагнитна платформа. Някои модули и конструкции на БЛА са изработени от ферромагнитни материали, които влошават точността на измерване на магнитометрите, прикрепени към БЛА. Компенсирането на електромагнитното поле, създадено от полетната платформа е сериозен проблем. Аеромагнитната компенсация е проучена дълбоко при традиционното пилотирано въздушно магнитно изследване. При геофизичните БЛС общата максимална височина на полет е десетки метри, където фоновото магнитно поле е пространствено неравномерно и пречи при изучаването на геоложките структури. Затова сензорите се закрепват към дълго въже или към прът с дължина 3–5 m, под или пред платформата на БЛА (Фиг. 2 и Фиг. 3), с цел намаляване на въздействието на БЛА върху измерванията. Конструкцията с дълъг прът е склонна към ниска стабилност на полета и не е идеално решение. Компенсацията на смущаващите полета на БЛА е нерешен проблем и все още изисква допълнителни изследвания [2].

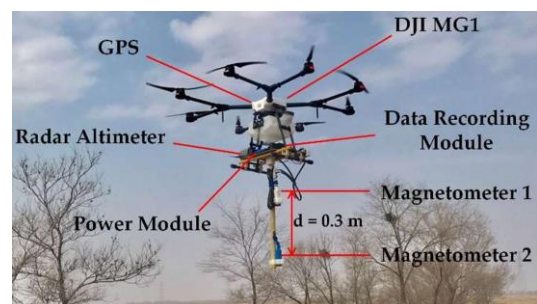
Бордни геофизични сензори и методи на изследване

На Фиг. 1 е показан метод за активни полувъздушни електромагнитни изследвания с помощта на БЛА. Характерно за този метод, е че на земната повърхност близо до изследвания подземен обект се монтират излъчвател (Tx) и приемник (Rx). Вторият приемник се намира на борда на БЛА, в случаят това е въртолет, [1, 2].

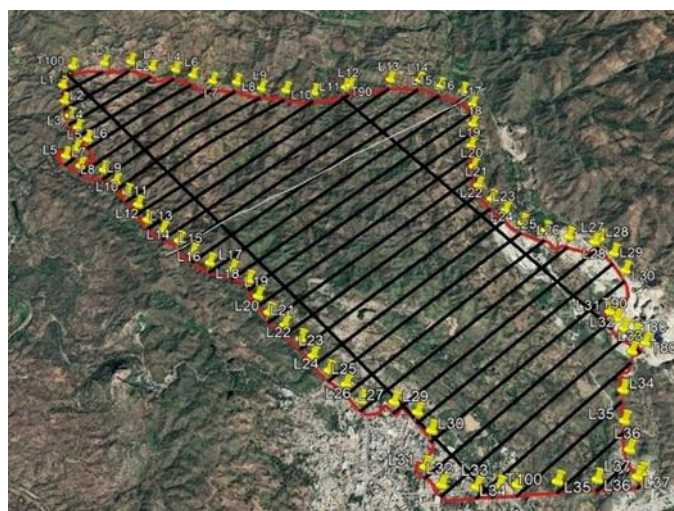
Разработена е нова система за магнитно измерване на БЛА за откриване на близки до повърхността цели [3]. Системата БЛА-магнитометър се състои от два магнитометъра, радарен висотомер, диференциален GPS модул, модул за записване на данни и захранващ модул, както е показано на Фиг. 2. Летателната платформа е осемроторен БЛА DJI MG1 [2].



Фиг. 1. Полувъздушни електромагнитни изследвания с помощта на БЛА [1]



Фиг. 2. БЛА с два магнитометъра, радарен висотомер, GPS, запис на данни [1, 2, 3]



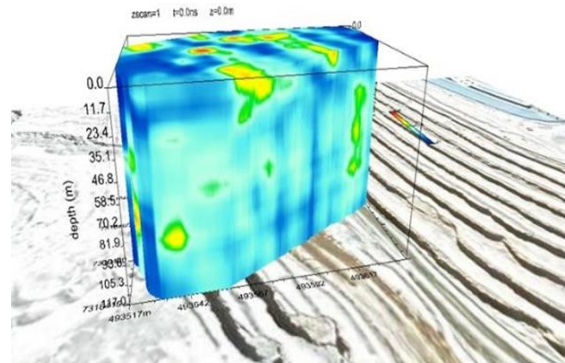
Фиг. 3. Мултикоптер, магнитометър MagArrow, GPR и реализирана траектория на полета [1, 6]

На Фиг. 3 е представена БЛС, в която се използва чувствителен магнитометър MagArrow на базата на цезиеви пари. Вземането на магнитни проби е със скорост 1000 проби за секунда. Методът позволява прецизно идентифициране и разграничаване на руди съдържащи Au, Cu, Li, Ni и Fe при проучване на големи площи.

Анализът в реално време подобрява ефективността на проучването, а комбинирането на георадари с LiDAR създава прецизни 3D карти (Фиг. 4 и Фиг. 5), [1, 4].

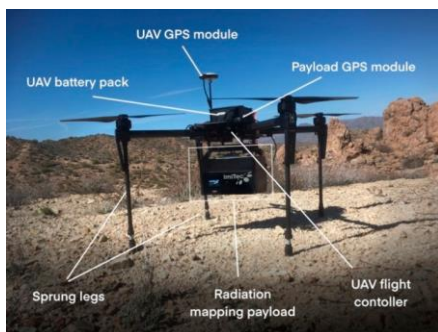


Фиг. 4. Мултикоптер и радар за проникване в земята (GPR) [1, 4]

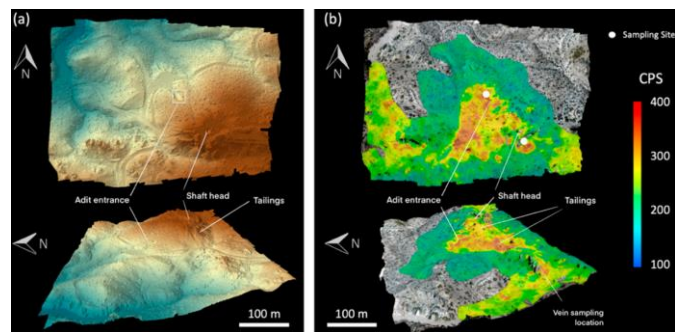


Фиг. 5. Изоповърхности в 3D модел на аномалии в дълбочина със софтуера GPR Slice [1, 4]

В [5] е представена БЛС за радиологична идентификация. Използва се модифицирана платформа за изследване на замърсяването с радиоактивен цезий в префектура Фукушима, Произведена е от Imitec Ltd., с тегло 1 kg и тя заменя старата система Kromtek на базата на кадмиев и цинков телурид (CZT) GR1 с по-голям обем и по-чувствителен детектор на базата на полупроводник, легиран с талий. Модулът SIGMA-50, също от Kromtek, е (CsI(Tl)) идентифицира области с по-ниска активност на фоновата среда. Въпреки че не притежава толкова висок спектър разделителна способност като GR1 (<7,2 % пълна ширина при половин максимум (FWHM) при 662 keV, вместо <2,5 %). FWHM при 662 keV за GR1) и енергиен диапазон (50 keVz – 1,5 MeV, за разлика от 30 keV до 3.0 MeV за GR1) активният обем на детектора от 32,8 cm³ на SIGMA-50 е значително по-голям от този на детекторите на GR1, само 1cm³. Освен системата за откриване на лъчение има: точков лазерен далекомер (за корекция на данните за височина до 1 m над земята); GPS модул; радиотелеметрия (за предаване на данни в реално време към базова станция). БЛА M100 (Фиг. 6) носи и насочена надолу видеокамера GoPro Hero5 Black за получаване на изображения за създаване на 3D фотограметричен модел (Фиг. 7).



Фиг. 6. БЛС за радиологична идентификация [5]



Фиг. 7. Тримерна фотограметрия реконструкция на рудник (a) и резултати от аеронавигационно картографиране (b) [5]

В [7] е изложена геофизична БЛС на базата на: осмокоптер; MagArrow сензор и векторен магнитометър, използващ сензор SHFT02e за контрол на полета. Характеристиките и състава на MagArrow са: батерия с тегло 1 kg; шум 5 pT/√Hz; честота на вземане на проби 1000 Hz; честотна лента 400 Hz; грешка на измерване 5 nT; жироскоп Bosch BMI160; компас. В [8] е представена геофизична БЛС на базата на: осмокоптер с четири рамена; два сензора MagArrow; три трансмитера Tx; два приемника Rx. Има два различни трансмитера LIAGHigh-power и ZongeGGT-10. Използва се методология на минимизация по Гаус-Нютон с явни Якобиански изчисления.

В [9] е даден метод на анализ на електромагнитни (ЕМ) данни с контролиран източник, записани с полу-въздушни изследователските системи. В метода се използват електромагнитни контролирани източници; електромагнитната теория; обратна теория и числени решения.

В [10], Таблица 1 и Таблица 2 са сравнени съвременни геофизични методи като: дистанционно наблюдение; геоложко и структурно картографиране; геофизично проучване; геохимично проучване; сондиране и др. Широкомащабното картографиране на полезни изкопаеми обикновено се извършва с помощта на наземни геофизични проучвания. Определянето на радиоактивните минерали като уран (U) и торий (Th) е възможно чрез метода на гама-спектрометрията. Различните видове рудни находища (например порфирна мед, епитермално злато, масивни сулфидни находища) имат различни геохимични подписи. Използва се софтуер с отворен код, за обработка на масиви от данни за дистанционно наблюдение; облачни изчисления; Google Earth Engine; Google Colab; jupyter notebook; python и др. Този софтуер и кодове могат да се използват за обработка и генериране на литологични и минералогични карти [10].



Фиг. 8. Мултироторна платформа Azriel и Salvatore [12]

Хексакоптерът Азриел (Azriel) [11, 12] е авторска разработка на мултироторна платформа за тежки товари, позволяваща разнообразни оперативни възможности. Азриел използва различни модули и дава свобода за монтаж и електрозахранване на полезни товари.

Характеристиките на AZRIEL са:

- възможен борден автопилот; Cube Orange and Cube Blue
- възможност за полет с общо тегло (AUW); 25 kg
- защита от вода и прах (проектиран е съгласно стандарт IP54)
- софтуерната конфигурация е с отворен код, позволена от Ardupilot и Cube
- релси за монтиране на полезен товар и лесен демонтаж на шасито за кацане
- лесен достъп към допълнителни напрежения за периферни устройства, налични на горната рамка, долната рамка и външната страна на Азриел.

Таблица 1. Приложения на различни геофизични методи за проучване на различни неблагородни метали и минерални системи от благородни метали Geological Association (GA) [10]

№	Геофизичен метод	Платформа	Метод определяне на местоположението	Pb-Zn	Порфирна мед	Депозит SEDEX	VMS депозит	Ni-Cu-PGE	Злато	Диамант С
1	Електромагнитен	Въздушна	Пряк	-	-	+	++	++	+	++
			GA	-	-	+	+	++	+	+
		Наземна	Пряк	+	-	+	++	++	-	++
			GA	+	-	+	+	++	+	++
2	Електрически	Наземна	Пряк	++	++	-	++	++	+	+
			GA	+	-	-	+	++	-	-
		Въздушна	Пряк	+	-	+	++	++	-	++
			GA	+	+	+	+	++	+	+
3	Гравитационен	Наземна	Пряк	++	+	++	++	++	-	++
			GA	+	+	+	+	++	+	+
		Въздушна	Пряк	++	+	++	++	++	-	++
			GA	+	+	+	+	++	+	++
4	Магнитен	Въздушна	Пряк	-	++	+	++	+	-	++
			GA	++	++	++	++	++	++	++

5	Радио-метричен	На-земна	Пряк	-	++	+	++	+	+	++
			GA	+	++	++	++	+	++	++
		Въз-душна	Пряк	-	++	-	+	-	+	-
			GA	+	++	++	++	+	++	+
На-земна	Пряк	-	++	-	+	-	+	-		
	GA	-	++	+	+	+	++	-		
6	Сеизми-чен	На-земна	Пряк	+	+	+	+	+	-	+
			GA	+	+	+	+	+	+	+

Таблица 2. Характеристики и свойства на геофизичното проучване и техните приложения в геонауките [10]

№	Геофизичен метод	Физични свойства	Измерено поле	Единици	Дълбочина на изследване	Приложения в науките за Земята
1	Електро-магнитни	Електрическа проводимост и индуктивност	Електрическо и магнитно поле	$\Omega \text{ m}$ (ом-метри)		Изкопаеми горива, т.е. газ (нефт), въглища, метални минерални находища, археологически проучвания
2	Гео-термална	Топлинна проводимост	Температура или топлина	W/mK	30–100 m и дълбочината на източника	Картографиране на геотермална повърхност, идентифициране на зони на геотермални аномалии
3	Гравитационен метод	Плътност	Поле на естествената гравитация	mGal	всички	Сулфиди, включително сфалерит, мед, злато, барит, минно дело, ископаеми горива, хидрология, тектоника на плочите
4	Радар за проникване в земята (GPR)	Диелектрична константа	Радиовълни	Мегахерц (MHz) milli Siemens на метър	10 метра (хиляди метри в лед)	Проучване на подземни минерални находища, особено метални минерали, подземни води, проучване на материали на строителна площадка, археологически проучвания, неметални материали за пукнатини или кухини
5	Индуцирана поляризация (IP) Метод	Електрически капацитет (зареждане)	Потенциална разлика (затихване на напрежението)	milli Semens	Разстоянието между електродите обуславя дълбочината	Метални минерални находища, сулфидни минерали (масивни и разпръснати), богати на глини материали и графит.
6	Магнитен метод	Магнитна чувствителност	Naturl магия fd	nT	До изотерма на кюри	Магнетит, ултрамафити, богати на желязо скали, метални минерални находища, анализ на басейни, ископаеми горива, тектоника на плочите, злато и порфирна мед
7	Радио-активен метод	Радио-активност	Гама лъчение	eTh (еквивалентен торий в ppm) и eU (еквивалентен уран в ppm)	Няколко cm (скали) до стотици метри (въздух)	Уран, торий и калий
8	Съпротивление	Електрическо съпротивление	Привидно съпротивление	$\Omega \text{ m}$	Разстоянието между електродите обуславя дълбочината	Проучване на подземни води, метални минерални находища,
9	Сеизмичен метод	Скорост на еластична вълна	скорости на сеизмични вълни	m/s		Изкопаеми горива, насипни минерални находища, т.е. чакъл и пясък, проучване на подземни води, археологически проучвания
10	Метод на собствен потенциал (SP)	Електрическа проводимост	Естествен телуричен ток	mV	Няколко стотици метри	Метални сулфиди, серпентинит, графит, кухини напълнени с вода, солена вода

Литература:

1. Moezzi Nasab, Reza, Abolghasem Kamkar-Rouhani, Ali Reza Arab-Amiri. Development of Drone-Borne Geophysical Surveys for Mineral Exploration, *Journal of Environment and Sustainable Mining* 1.2 (2023), ISSN: 3041-900X, pp. 41–47.
https://jesm.usb.ac.ir/article_8155_1d0a05f85c6592b417a0272444c93abc.pdf.usb.ac.ir/article_8155_cf3434771c45e18590d206e0e8de6c27.pdf
2. Y Mu, X Zhang, W Xie, Y Zheng. Automatic detection of near-surface targets for unmanned aerial vehicle (UAV) magnetic survey, *Remote Sensing* 12.3 (2020): 452., ISSN: 2072-4292, pp. 1–19.
<https://doi.org/10.3390/rs12030452>
<https://www.mdpi.com/2072-4292/12/3/452/pdf>
3. Mu, Yaxin, Wupeng Xie, and Xiaojuan Zhang. The joint UAV-borne magnetic detection system and cart-mounted time domain electromagnetic system for UXO detection, *Remote Sensing* 13.12 (2021): 2343., ISSN: 2072-4292, pp. 1–20.
<https://doi.org/10.3390/rs13122343>
<https://www.mdpi.com/2072-4292/13/12/2343/pdf>
4. Junaid M., Abdullah R. A., Sa'ari R., Ali, W., Islam A., & Sari M. (2022). 3D modelling and feasibility assessment of granite deposit using 2D electrical resistivity tomography, borehole, and unmanned aerial vehicle survey, *Journal of Mining and Environment*, 13(4), Print ISSN:2251-8592, Online ISSN:2251-8606, pp. 929–942.
https://doi.org/10.22044/jme.2022.11938.2189_
https://jme.shahroodut.ac.ir/article_2530_91b9b42a5a74d0c30ed73ff37574ba0b.pdf
5. Martin, P. G., Connor, D. T., Estrada, N., El-Turke, A., Megson-Smith, D., Jones, C. P., ... & Scott, T. B. (2020). Radiological identification of near-surface mineralogical deposits using low-altitude unmanned aerial vehicle, *Remote Sensing*, 12(21), 3562, ISSN: 2072-4292, pp. 1–17.
<https://doi.org/10.3390/rs12213562>
<https://www.mdpi.com/2072-4292/12/21/3562/pdf?version=1604281392>
6. Cyriac, J., Kumare, D., & Balooni, S. P. (2023). Exploring the Potential of Drone-Based Geophysical Survey, In 2nd EAGE/Aqua Foundation Indian Near Surface Geophysics Conference & Exhibition Vol. 2023, No. 1, European Association of Geoscientists & Engineers, pp. 1–5.
DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202375017>
https://www.researchgate.net/profile/Darshana-Kumare/publication/375598977_EXPLORING_THE_POTENTIAL_OF_DRONE-BASED_GEOPHYSICAL_SURVEY_USING_MAGARROW_AND_GROUND_PENETRATING_RADAR_GPR_FOR_CRITICAL_MINERAL_EXPLORATION/links/655212bf3fa26f66f4fcd95/EXPLORING-THE-POTENTIAL-OF-DRONE-BASED-GEOPHYSICAL-SURVEY-USING-MAGARROW-AND-GROUND-PENETRATING-RADAR-GPR-FOR-CRITICAL-MINERAL-EXPLORATION.pdf
7. Becken, M., Schmalzl, J., Schmidt, V., Kotowski, P., & WG, D. (2022). Testing a scalar magnetometer for airborne EM applications, In 29. Schmucker-Weidelt-Kolloquium für Elektromagnetische Tiefenforschung, Deutsche Geophysikalische Gesellschaft e. V., ISSN: 0947-1944, pp. 126–126.
https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/rest/items/item_5010190/component/file_5010192/content
8. Rochlitz, R., Kotowski, P., Becken, M., Schmalzl, J., Ronczka, M., Günther, T., ... & Vazquez, J. C. (2024). Joint inversion of drone-based semi-airborne data measured in two frequency ranges with scalar and vector magnetometers, In 30. Schmucker-Weidelt-Kolloquium für Elektromagnetische Tiefenforschung, Deutsche Geophysikalische Gesellschaft e. V., ISSN: 0947-1944, pp. 107–121.
https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/rest/items/item_5026147_3/component/file_5026149/content
9. Rochlitz, R., Becken, M., & Günther, T., (2023). Three-dimensional inversion of semi-airborne electromagnetic data with a second-order finite-element forward solver, *Geophysical Journal International*, 234(1), ISSN: 1365-246X, pp. 528–545.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggad056>
<https://academic.oup.com/gji/article-pdf/234/1/528/49532791/ggad056.pdf>
10. Jain, R., Bhu, H., Pandey, A. K., & Pour, A. B. (2024). Base-metal Exploration by using remote sensing, geology, geophysical, and geochemical datasets with clues from Ancient Mining: A Comprehensive Review on Aravalli-Delhi Fold Belt, Rajasthan, India, *Advances in Space Research*, ISSN: 1879-1948, pp. 1–85.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.09.038>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117724009724/pdf?md5=b7213a95d1130900a6e142d6f73b19e9&pid=1-s2.0-S0273117724009724-main.pdf>
11. Stoll, J. B. (2021). Advances and future trends in drone-borne geophysics, In *First International Meeting for Applied Geoscience & Energy Society of Exploration Geophysicists*, ISSN (print): 1052-3812 ISSN (online): 1949-4645, pp. 3053–3057.
<https://doi.org/10.1190/segam2021-3594442.1>
12. Павлин Граматиков, Джулиан Тахов. Моторно-витлови групи и акумулаторни батерии за хексакоптер. Доклади от годишна университетска научна конференция 08–09 юни 2023 година, том 7, Издателски комплекс на НВУ „Васил Левски“, 2023, ISSN:ISSN 2367-7481, с. 139–149.
13. <https://d-aerospace.com/>