



Metody pomiarowe stosowane na platformach powietrznych w badaniach geologicznych

MIROSŁAW WOŁOSZYN

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki,
80-952 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12

Streszczenie. W pracy przedstawiono metody pomiarowe stosowane w pomiarach geologicznych z zastosowaniem platform powietrznych, takich jak samoloty, śmigłowce i bezpilotowe pojazdy (UVA). W wykrywaniu różnego rodzaju złóż bogactw mineralnych stosowana jest metoda magnetometryczna, elektromagnetyczna oraz grawimetryczna.

Słowa kluczowe: metoda magnetometryczna, elektromagnetyczna, grawimetryczna, metrologia, geologia, platformy powietrzne

Symbole UKD: 550.8

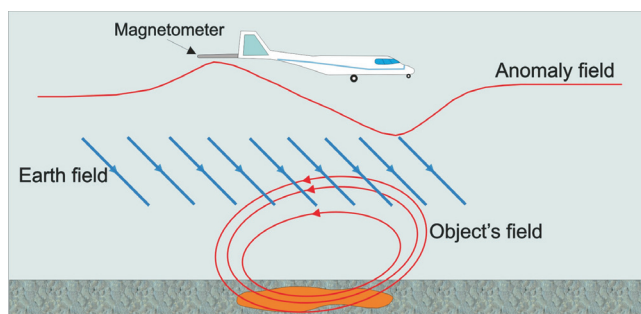
Wstęp

W pracy przedstawiono metody pomiarowe stosowane w pomiarach geologicznych z zastosowaniem platform powietrznych, takich jak samoloty, śmigłowce i bezpilotowe pojazdy (UVA). W wykrywaniu różnego rodzaju złóż bogactw mineralnych stosowana jest metoda magnetometryczna, elektromagnetyczna oraz grawimetryczna. W metodzie magnetometrycznej wykorzystuje się zjawisko zaburzenia ziemskiego pola magnetycznego, wywołanego przez warstwy Ziemi o różnych właściwościach ferromagnetycznych. W metodzie elektromagnetycznej wykorzystuje się „odpowiedź” warstw Ziemi o różnej przewodności elektrycznej na generowane silne pole magnetyczne. Pomiar zmian przyspieszenia ziemskiego stosowany w metodzie grawimetrycznej pozwala na określenie gęstości mas warstw Ziemi w badanym rejonie. W wyniku pomiaru stacjonarnego pola magnetycznego, pola magnetycznego wywołanego przez indukowane prądy wirowe w Ziemi oraz przyspieszenia ziemskiego, otrzymuje się trójwymiarowy obraz warstw Ziemi.

Pomiary te pozwalają geologom na wykrywanie takich złóż mineralnych, jak: ropa naftowa, gaz, woda czy diamenty.

Metoda magnetometryczna

Poszukiwanie na ogromnych obszarach złóż bogactw naturalnych Ziemi przeprowadza się z zastosowaniem platform powietrznych (samolot, helikopter). Jest to stosunkowo szybka i tania metoda poszukiwań. W badaniach geologicznych stosuje się metodę magnetometryczną, elektromagnetyczną i grawitacyjną. W metodzie magnetometrycznej znanej już od ponad wieku wykorzystuje się zaburzenie równomierności pola magnetycznego Ziemi wywołane przez różne właściwości ferromagnetyczne warstw Ziemi [6] (rys. 1).



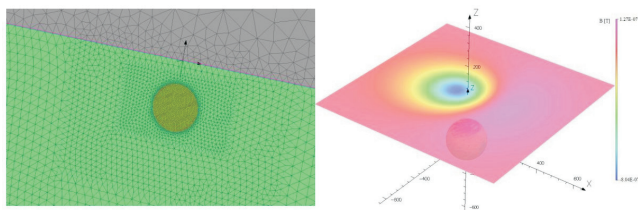
Rys. 1. Zaburzenie równomierności pola magnetycznego Ziemi wywołane przez różne właściwości ferromagnetyczne warstw Ziemi

Wypadkowe pole magnetyczne Ziemi \mathbf{B}_T jest superpozycją pola zewnętrznego \mathbf{B}_e i pola \mathbf{B}_o związanego z obszarem o polaryzacji magnetycznej \mathbf{M} [4]:

$$\mathbf{B}_T = \mathbf{B}_e + \nabla \int_V \mathbf{M}(\mathbf{r}) \cdot \nabla \left(\frac{1}{|\mathbf{r}_o - \mathbf{r}|} \right) dv. \quad (1)$$

Jeżeli w Ziemi o określonej względnej przenikalności magnetycznej znajduje się duże złożę np. wody czy ropy, wówczas rozkład pola magnetycznego nad powierzchnią Ziemi jest odmienny i bezpośrednio związany z tym złożem. Na podstawie wykonanej mapy magnetycznej badanego obszaru geolog może zlokalizować interesujące miejsca do dalszych dokładniejszych, ale i droższych badań sejsmicznych. Na rysunku 2 przedstawiono rozkład anomalii pola magnetycznego na wysokości $h_1 = H$ nad powierzchnią ziemi, o względnej przenikalności magnetycznej gruntu $\mu_1 = 2$ (żwir). Na głębokości $h_2 = 4H$ znajduje się zbiornik wody

$\mu_2 = 1$) w kształcie kuli o średnicy $D = 4H$. Maksymalne wartości zaburzenia pola magnetycznego Ziemi w rozpatrywanym układzie wynoszą około $0,8 \mu\text{T}$ (średnia wartość indukcji magnetycznej Ziemi wynosi $50 \mu\text{T}$). Obliczenia numeryczne dla podanego przykładu przeprowadzono w programie Opera3D.



Rys. 2. Rozkład anomalii pola magnetycznego na wysokości $h_1 = H$ nad powierzchnią Ziemi o względnej przenikalności magnetycznej gruntu $\mu_1 = 2$ (z lewej siatka rozpięta w badanym obszarze)

Pole magnetyczne Ziemi mierzone jest za pomocą precyzyjnych magnetometrów. W badaniach geologicznych stosowane są głównie magnetometry pompowane optycznie [3, 5, 6]. Są to tzw. magnetometry skalarne mierzące moduł indukcji magnetycznej o czułości rzędu 10^{-12}T . Rzadziej stosowane są magnetometry tzw. wektorowe typu SQUID o czułości rzędu 10^{-13}T [3]. Magnetometry te mierzą składowe wektora indukcji magnetycznej. W przypadku pomiarów pola magnetycznego z zastosowaniem czujników magnetycznych zainstalowanych na samolocie (rys. 3) konieczna jest kompensacja zakłóceń magnetycznych generowanych przez samolot [1, 7].



Rys. 3. System magnetometryczny TRIAX na samolocie typu Caravan (www.fugro.com)

Elementy stalowe samolotu ulegają namagnesowaniu stałemu oraz indukowanemu. Każda zmiana położenia samolotu względem wektora pola magnetycznego Ziemi powoduje zmianę pola magnetycznego mierzonego przez czujnik. W me-

talowych elementach samolotu (np. skrzydła, ogon samolotu) indukują się prądy wirowe, które również powodują zakłócenia w pomiarze indukcji magnetycznej. Zakłócenia tego rodzaju nie występują w przypadku pomiarów wykonywanych za pomocą czujników magnetycznych zamontowanych w tzw. gondolach ciągniętych na kablolinie przez śmigłowiec (rys. 4).



Rys. 4. Czujniki magnetyczne zamontowane w tzw. gondoli ciągniętej na kablolinie przez śmigłowiec

W ostatnich latach prowadzone są również intensywne prace nad budową bezpilotowych pojazdów UAV (Unmanned Airborne Vehicle) z systemami magnetometrycznymi. Na rysunku 5 przedstawiono bezpilotowy pojazd GEORANGER z tym właśnie systemem, który powstał w kooperacji firmy Fugro z Insitu Group Inc. Pojazd przemieszcza się z prędkością 100 km/h i może wykonywać lot do 15 h [9].



Rys. 5. Pojazd GEORANGER z systemem magnetometrycznym [9]

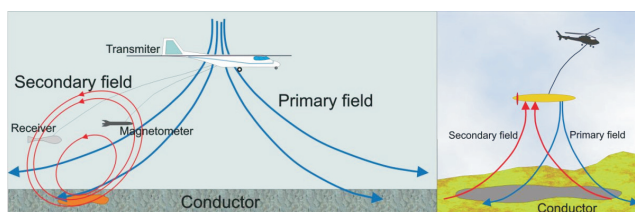


Metoda elektromagnetyczna

Złoża bogactw naturalnych wykrywa się również z zastosowaniem metody elektromagnetycznej. Pierwsze systemy pomiarowe wykorzystujące tę metodę pojawiły się i były rozwijane w Skandynawii, w USA oraz w Kanadzie w latach dwudziestych XX w. Metodę tę stosuje się do pomiaru rezystywności gruntu na dużych obszarach z zastosowaniem systemów pomiarowych zainstalowanych na samolotach i helikopterach. W cewce transmisyjnej unoszonej przez samolot lub helikopter generowany jest duży impuls prądowy, który wytwarza pole magnetyczne (pole pierwotne) przenikające przez warstwy Ziemi (rys. 6). Po wyłączeniu prądu w cewce transmisyjnej indukuje się siła elektromotoryczna w cewce odbiorczej wywołana przez zaindukowane w ziemi prądy wirowe. Pole elektromagnetyczne spełnia równania Maxwella:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}. \quad (3)$$



Rys. 6. System pomiarowy na samolocie i helikopterze

Wprowadzając magnetyczny potencjał wektorowy \mathbf{A} , po odpowiednich przekształceniach, równania (1, 2) można przedstawić w postaci [4]:

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla^2 \phi - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{\rho}{\epsilon}, \quad (5)$$

gdzie: μ — przenikalność magnetyczna;
 ϵ — przenikalność elektryczna;
 σ — przewodność elektryczna;
 ϕ — potencjał skalarny;
 ρ — gęstość ładunku elektrycznego.



Wartości pola wtórnego zależne są od przewodności elektrycznej σ i przenikalności magnetycznej μ warstw Ziemi w badanym obszarze. Pole wtórne mierzone jest za pomocą cewki odbiorczej, która znajduje się w gondoli ciągniętej za samolotem lub w samej cewce generującej pole pierwotne (w systemach na helikopterach). Zawansowane techniki pomiarowe oraz algorytmy syntezy pola elektromagnetycznego pozwalają na utworzenie mapy 3D rezystywności Ziemi. Metoda elektromagnetyczna stosowana jest m.in. w wykrywaniu:

- złóż ropy naftowej,
- gazu,
- wody,
- grubości i rozmiarów złóż gliny,
- żwiru.

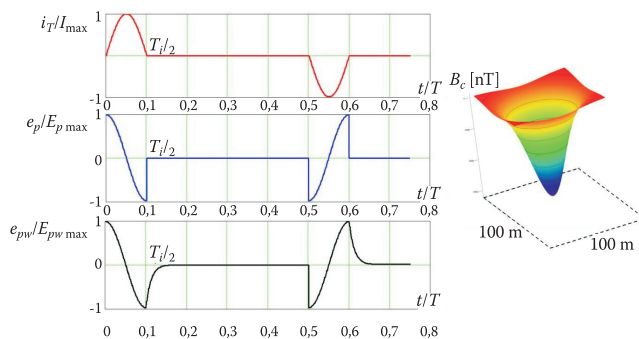
Pierwsze systemy elektromagnetyczne na platformach lotniczych do badań geologicznych pojawiły się w latach 50. XX w. (rys. 7). Obecnie stosowane systemy stwarzają ogromne możliwości badawcze. Firma Fugro dysponuje trzema systemami: GEOTEM, MEGATEM i TEMPEST, z których na uwagę zasługuje szczególnie system MEGATEM. System ten zainstalowany jest na dużym, czterosilnikowym samolocie Dash 7 i pozwala na wykrywanie złóż na dużej głębokości do ponad 300 m. Moment magnetyczny wytwarzany przez system wynosi aż $2,2 \times 10^6 \text{ Am}^2$. Dla porównania system INPUT stosowany w latach siedemdziesiątych XX w. wytwarzał moment magnetyczny dziesięciokrotnie mniejszy. Przyjmując, że cewka w systemie MEGATEM ma kształt koła o średnicy 20 m i 6 zwojów, można oszacować wartość amplitudy impulsu prądowego na około 1,1 kA. Typowe quasi-stacjonarne sygnały generowane w cewce transmisyjnej mają kształt połowy sinusoidy o różnych częstotliwościach z okresem sygnału wynoszącym kilkadziesiąt ms (rys. 8). Rozkład składowej normalnej B_c pola magnetycznego przy powierzchni Ziemi na obszarze 100 m^2 dla cewki o 6 zwo-



Rys. 7. System elektromagnetyczny zainstalowany na helikopterze

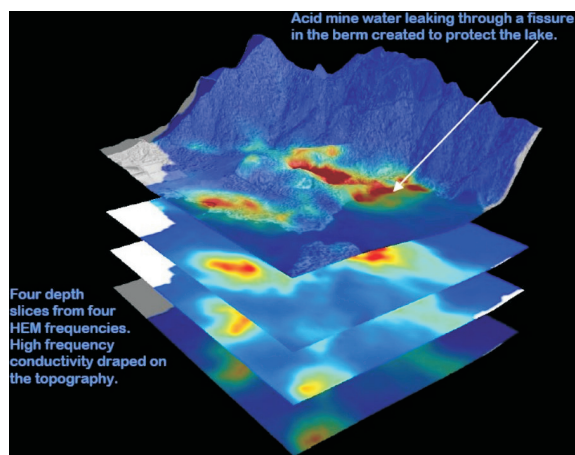


jach na wysokości 40 m i dla amplitudy impulsu prądowego 1,1 kA pokazano na rysunku 8. Maksymalna wartość pola wynosi około 6,2 μT .



Rys. 8. Sygnały cewki transmisyjnej i odbiorczej oraz rozkład pola magnetycznego przy powierzchni Ziemi: i_T — prąd cewki transmisyjnej; I_{\max} — amplituda prądu cewki transmisyjnej; e_p — sem. indukowana w cewce odbiorczej przez pole pierwotne; e_{pw} — sem. indukowana w cewce odbiorczej przez pole pierwotne i wtórne; $E_{p\max}$ — amplituda sem. indukowanej w cewce odbiorczej przez pole pierwotne; $E_{pw\max}$ — amplituda sem. indukowanej w cewce odbiorczej przez pole pierwotne i wtórne; T_i — okres sinusoidy prądu cewki transmisyjnej; t — czas; T — okres impulsów

Pole magnetyczne generowane w cewce transmisyjnej o mniejszej częstotliwości (większa wartość T_i) głębiej wnika w warstwy geologiczne Ziemi. Pomiary wykonane nad badanym obszarem dla różnych częstotliwości pola pierwotnego pozwalają na trójwymiarową analizę rezystywności gruntu. Na rysunku 9 przedstawiono mapy



Rys. 9. Mapy rezystywności gruntu dla czterech różnych wartości częstotliwości pola pierwotnego (www.fugro.com)



rezystywności gruntu dla czterech różnych wartości częstotliwości pola pierwotnego. Na rysunku 10 przedstawiono natomiast system elektromagnetyczny z cewką zainstalowaną na skrzydłach samolotu firmy Fugro [9]. Cewka składa się z sześciu zwojów rozciągniętych między skrzydłami, przodem i tyłem samolotu, tworząc cewkę płaską, generującą pole magnetyczne skierowane prostopadle do powierzchni Ziemi. Pole wtórne mierzone jest za pomocą czujnika pola magnetycznego umieszczonego w gondoli (rys. 10), która ciągnięta jest za samolotem na kablolinie.



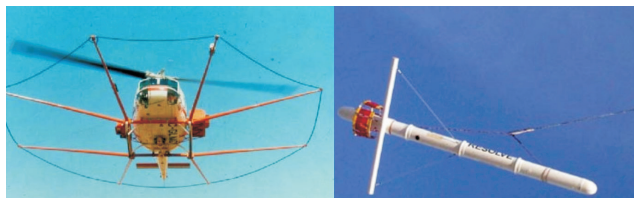
Rys. 10. System elektromagnetyczny GEOTEM z cewką zainstalowaną na skrzydłach samolotu Casa 212 firmy Fugro [9]

Na rysunku 11 przedstawiono system HeliGEOTEM firmy Fugro zainstalowany na śmigłowcu. System generuje pole magnetyczne o momencie magnetycznym $230\,000\text{ Am}^2$ w cewce o 2 zwojach i średnicy 11 m. Na rysunku 12 pokazano przykładowe dwa inne systemy elektromagnetyczne stosowane w badaniach geologicznych.



Rys. 11. System HeliGEOTEM firmy Fugro zainstalowany na śmigłowcu





Rys. 12. Przykłady rozwiązań systemów elektromagnetycznych na śmigłowcach

Metoda grawimetryczna

Wykrywanie złóż bogactw naturalnych przeprowadza się również za pomocą metody grawimetrycznej. Przyspieszenie ziemskie Ziemi wynosi:

$$\mathbf{g} = \frac{GM_E}{R_E^2} \mathbf{r}, \quad (6)$$

gdzie: G — stała grawitacji;
 M_E — masa Ziemi;
 R_E — promień Ziemi.

Przyspieszenie ziemskie po raz pierwszy zostało zmierzone przez Galileusza podczas słynnego eksperymentu w Pizie. Średnie przyspieszenie ziemskie na powierzchni Ziemi wynosi około $9,81 \text{ m/s}^2$. W geologii stosuje się jednostkę $1 \text{ Gal} = 10^{-2} \text{ m/s}^2$ na cześć Galileusza. W 1967 roku Międzynarodowa Organizacja Geologii i Geofizyki przyjęła formułę opisującą przyspieszenie ziemskie według formuły [4]:

$$g = 978031,846(1 + 0,005278895 \sin(\phi)^2 + 0,000023462 \sin(\phi)^4) \text{ [mGal]}, \quad (7)$$

gdzie: ϕ — szerokość geograficzna.

Przyspieszenie ziemskie mierzone jest za pomocą precyzyjnych grawimetrów. Komercyjne badania geologiczne z zastosowaniem grawimetrów zainstalowanych na samolotach rozpoczęły się pod koniec lat siedemdziesiątych XX wieku. Poważnym problemem w pomiarach jest minimalizacja wpływu przyspieszenia związanego z samolotem na pomiar zmian przyspieszenia związanego z geologią Ziemi. Rozwój technologiczny w ostatnich latach pozwolił osiągnąć bardzo dużą czułość pomiarową grawimetrów instalowanych na samolotach. Czułość przyrządu wynosi obecnie poniżej 1 mGal , co pozwala na pomiary zmian grawitacji na poziomie blisko 10^{-6} g . Jednym z czołowych producentów czułych grawimetrów jest



rosyjska firma Gravimetric Technologies Ltd. w Moskwie [8]. Metodę tę stosuje się do wykrywania [2]:

- gazu
- ropy
- złóż złota, platyny, miedzi.

Na rysunku 13 przedstawiono komercyjny grawimetr GT-1A zainstalowany na samolocie Cessna 404 [2]. Na rysunku 14 przedstawiono widok „dziury” geologicznej w okolicy Kalgoorlie w zachodniej Australii oraz obraz mapy grawitacyjnej tego regionu.



Rys. 13. Grawimetr GT-1A zainstalowany na samolocie Cessna 404 (www.canadianmicrogravity.com) fot. za zgodą firmy Canadian Micro Gravity



Rys. 14. Widok „dziury” geologicznej w okolicy Kalgoorlie w zachodniej Australii oraz obraz mapy grawitacyjnej tego regionu (www.canadianmicrogravity.com) fot. za zgodą firmy Canadian Micro Gravity

Na uwagę zasługuje duża precyzja pomiaru z samolotu, która jest zbliżona do pomiarów stacjonarnych na Ziemi. Mapa grawitacyjna badanego obszaru stanowi cenną informację dla geologów w poszukiwaniu bogactw naturalnych oraz w badaniach struktur geologicznych Ziemi.



Wnioski

W badaniach geologicznych Ziemi wykorzystuje się systemy pomiarowe za-
instalowane na platformach powietrznych. W systemach tych stosuje się metodę
magnetometryczną, elektromagnetyczną i grawimetryczną. Rozwój technologiczny
czujników pomiarowych oraz nowoczesne algorytmy syntezy pola magnetycznego,
elektromagnetycznego i grawitacyjnego, pozwalają na tworzenie trójwymiarowych map
warstw geologicznych badanych rejonów. Mapy te pozwalają geologom na lokalizację
interesujących obszarów, w których mogą znajdować się złoża bogactw naturalnych.

Podziękowanie

Autor pragnie podziękować panu Dougowi McConnellowi z firmy Fugro za udostępnienie cennych
materiałów do opracowania niniejszej pracy.

Artykuł wpłynął do redakcji 14.04.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w kwietniu
2008 r.

LITERATURA

- [1] T. CLEM, *Superconducting magnetic sensors operating from a moving platform*, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 5(2), 1995, 2124-2148.
- [2] A. GABELL, H. TUCKETT, D. OLSON, *The GT-1A mobile gravity system*, Abstract from the ASEG-PESA Airborne Gravity 2004 Workshop, Sydney, 2004, 55-62.
- [3] P. RIPKA, *Magnetic sensors and magnetometers*, Artech House, Norwood, 2001.
- [4] W. M. TELFORD, L. P. GELDART, R. E. SHERIFF, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, New York, 1990.
- [5] S. TUMAŃSKI, *Czujniki pola magnetycznego — stan obecny i kierunki rozwoju*, VII Krajowe Sympozjum Pomiarów Magnetycznych KSPM, Warszawa, 2003.
- [6] M. WOŁOSZYN, *Współczesne systemy magnetometryczne*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 1, 2007, 45-48.
- [7] M. WOŁOSZYN, *System magnetometryczny na samolocie*, Pomiary Automatyka Kontrola, nr 9 bis, 2006, 57-59.
- [8] www.canadianmigrogravity.com
- [9] www.fugro.com

M. WOŁOSZYN

Measurement methods in geological investigations using air platforms

Abstract. The measurement methods applied in the geology using air platforms like planes, helicopters and UAV are presented in this paper. The magnetometric, electromagnetic and gravity methods are used for mineral exploration.

Keywords: magnetometric, electromagnetic, gravity method, metrology, geology, airborne

Universal Decimal Classification: 550.8



