

Właściwości elektryczne i magnetyczne skał

Electrical and magnetic properties of rocks

Istnienie magnetyzmu znane było ludziom od dawien dawna. Zwracano uwagę na dziwne kamienie przyciągające żelazo. Były to, jak się później okazało, rudy magnetytu. Przed czterema czy pięcioma tysiącami lat w Chinach przy pomocy magnetytu sporządzono pierwszy kompas. W Europie prymitywnymi kompasami zaczęli posługiwać się Wenecjanie w XII wieku. W niespełna sto lat później żeglarze zwrócili uwagę na fakt, iż namagnesowana igła nie wskazuje dokładnie kierunku północnego bieguna geograficznego. W 1492 roku Krzysztof Kolumb podczas swej podróży przez Ocean Atlantycki stwierdził, że odchylenia te są niejednakowe dla różnych punktów globu ziemskiego. Wielu żeglarzy w miarę posuwania się na północ obserwowało coraz większą różnicę między wskazaniami igły kompasu a kierunkiem bieguna północnego.

Pole geomagnetyczne Ziemi

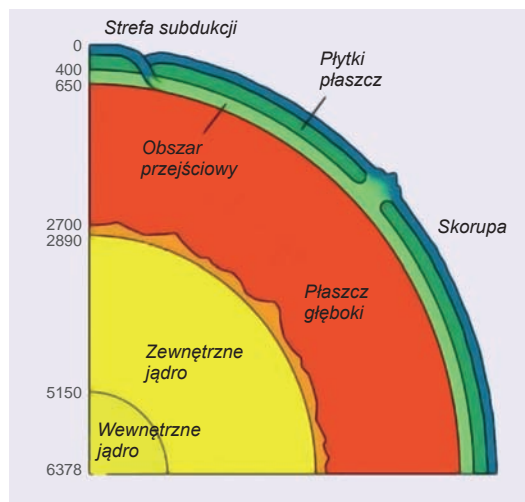
Jeśli igłę magnetyczną zawiesić na osi poziomej, ustawi się ona pod pewnym kątem do horyzontu, zwanym inklinacją. Im dalej będziemy się przesuwać na północ, tym inklinacja będzie większa. Miejsce, w którym igła ustawi się prostopadle do powierzchni Ziemi, nazwano biegunem magnetycznym.

Pole magnetyczne Ziemi wytwarzane jest przez prąd wirowy płynący w jej płynnym jądrze. Teoria ta, oparta o dynamo magnetohydrodynamiczne, działa na zasadzie prądnicy przekształcającej energię kinetyczną ruchomych części w pole magnetyczne i elektryczne. W prądnicy ruchomymi częściami są wirujące zwoje drutu, zaś w przypadku planety jest to przewodzący, płynny ośrodek. Taką funkcję w jądrze ziemi spełniają przestrzenie roztopionego żelaza.

Struktura wewnętrzna Ziemi składa się z trzech elementów: skorupy, płaszcza i jądra. **Skorupa** jest ciekłą twardą powłoką zewnętrzną, na której żyjemy. Grubość skorupy ziemskiej sięga do głębokości 10 km pod oceanami i ok. 30 km pod kontynentami. Pod skorupą znajduje się **płaszcz** Ziemi o grubości ok. 2900 km. Skały płaszcza różnią się od skał skorupy większą gęstością. Pod wpływem znacznych ciśnień minerały zmieniają swą strukturę w krystaliczną. **Jądro** Ziemi jest kulą o promieniu 3470 km i gęstości 9,6-18,5 g/cm³. Tworzą ją głównie stopy niklu i żelaza, będące dobrym przewodnikiem elektryczności. Część zewnętrzna jądra Ziemi o grubości około 2100 km jest płynna, a jego temperaturę szacuje się na 5500-6500°C. W jądrze płynnym, o dużej przewodności elektrycznej, występują prądy konwekcyjne, unoszące od środka

rozgrzaną materię w stronę płaszcza. Powstające uporządkowane wiry substancji przewodzącej prąd przyczyniają się do powstawania pola magnetycznego Ziemi. W odróżnieniu od płynnego jądra zewnętrznego, jądro wewnętrzne o grubości 1250 km jest lite, a obie warstwy wspólnie wytwarzają pole magnetyczne Ziemi.

Źródłem energii geodynamiki jest ciepło i reakcje chemiczne. W płynnym jądrze zewnętrznym generują one zmiany ciśnienia i turbulentne ruchy konwekcyjne. Zalegające bliżej środka gorące żelazo, o niższej gęstości, przemieszcza się. Gdy gorący strumień dociera do granicy z płaszczem, oddaje mu część ciepła. Schłodzone żelazo staje się gęstsze od otoczenia i spływa z powrotem. Aby pole magnetyczne planety samo się podtrzymywało, potrzebna jest rotacja. W wyniku ruchu obrotowego Ziemi na płynne żelazo w jądrze działa siła Coriolisa.



Rys. 1. Budowa wnętrza Ziemi

Natężenie pola magnetycznego jest znacznie większe w jądrze Ziemi niż na jego powierzchni. Szacuje się, że natężenie pola magnetycznego w jądrze zewnętrznym jest 50 razy większe niż na powierzchni Ziemi. Wartość natężenia pola magnetycznego w różnych punktach powierzchni Ziemi zmienia się. Na obszarze zbudowanym z bazaltów odchylenie to jest większe niż w rejonach występowania granitów. Obecnie indukcja ziemskiego pola magnetycznego przy powierzchni Ziemi zawiera się w granicach od 30 μT do 46 μT . Największa jest w okolicy biegunów – około 60 μT , a najniższa na równiku – około 25 μT .

Właściwości magnetyczne skał

Właściwości magnetyczne skał uwarunkowane są zawartymi w nich minerałami skałotwórczymi. Istotną rolę odgrywają właściwości magnetyczne pierwiastków chemicznych wchodzących w ich skład oraz rodzaj wiązań i struktury kryształów. Na właściwości magnetyczne wpływają momenty magnetyczne elektronów tworzących atomy pierwiastka skałotwórczego. Momenty magnetyczne protonów i neutronów atomu pierwiastka są kilkakrotnie mniejsze i nie odgrywają znaczącej roli. Krążący elektron wykonuje ruch po orbicie dodatnio naładowanego jądra atomu tworząc moment magnetyczny. Jeżeli momenty magnetyczne wszystkich elektronów się kompensują, to przy braku zewnętrznego pola magnetycznego atom nie jest namagnesowany. Występuje to w **diamagnetykach**. Substancje, w których poszczególne atomy posiadają moment magnetyczny, a nie wykazują stanu namagnesowania, są **paramagnetykami**. W **ferromagnetykach** współdziałanie między atomami jest tak silne, że momenty magnetyczne wszystkich atomów, nawet przy braku zewnętrznego pola magnetycznego, wykazują stan namagnesowania.

Magnetyczne właściwości skał charakteryzuje wielkość zwaną podatnością magnetyczną, która określa zdolność danej substancji do zmian namagnesowania pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego. Podatność magnetyczna χ określa związek między namagnesowaniem i natężeniem pola magnetycznego.

$$M = \chi H$$

$$\chi = \mu_r - 1$$

gdzie:

M – namagnesowanie,

H – natężenie pola magnetycznego,

χ – podatność magnetyczna,

μ_r – przenikalność magnetyczna względna.

Materiały magnetyczne mogą zostać namagnesowane i wytwarzać własne pole magnetyczne. Zależnie od podatności magnetycznej wszystkie skały można podzielić na trzy rodzaje: diamagnetyki, paramagnetyki oraz ferromagnetyki.

Diamagnetyki – $\chi < 0$ – po przyłożeniu pola magnetycznego ich namagnesowanie jest minimalne, o kierunku przeciwnym do przyłożonego pola. Wartość podatności magnetycznej jest ujemna. Należą do nich m.in.: kwarc, korund, kalcyt, dolomit, baryt, magnezyt, sfaleryt, galena, chalkozyn, cyrkon, rutyl, anhydryt, gips, skalenie – np. ortoklaz lub albit – oraz węgiel.

Paramagnetyki – $\chi > 0$ – są słabo przyciągane przez magnesy. Reagują na pole magnetyczne, jednak wartość podatności magnetycznej jest niska, a po odjęciu zewnętrznego pola magnetycznego momenty magnetyczne ulegają rozproszeniu kierunków. Należą do nich minerały skałotwórcze: krzemiany i glinokrzemiany, piryt, markasyt, chalkopiryt, ilmenit, almandyn, oliwiny, pirokseny, amfibole i biotyt, minerały ilaste oraz wszystkie metale rodzime, oprócz żelaza. Właściwości paramagnetyczne posiada większość skał osadowych (wapienie, dolomity, piaskowce, ity), wiele skał magmowych i metamorficznych (granit, gnejs, hornfels). Skały paramagnetyczne nie posiadają spontanicznego namagnesowania.

Ferromagnetyki – $\chi \gg 0$ – reagują na zadane pole magnetyczne i ulegają namagnesowaniu, aż do momentu osiągnięcia stopnia nasycenia. Po odjęciu zewnętrznego pola magnetycznego namagnesowanie pozostaje i zachowuje zwrot zgodny z wcześniej przyłożonym polem. Ferromagnetyczne minerały w skałach występują w postaci tlenków, przede wszystkim żelaza i tytanu, lub w postaci siarczków tych metali. Należą do nich m.in.: hematyt, syderyt, monacyt, turmalin, piroluzyt, magnetyt, maghemit, pirotyt.

Wśród skał magmowych skały zasadowe wykazują większą podatność magnetyczną od skał kwaśnych. Skały osadowe wykazują mniejszą podatność magnetyczną od skał magmowych, przy czym podatność ta wzrasta od piaskowców do łowców.

Właściwości elektryczne skał

Główne minerały skałotwórcze są złymi przewodnikami elektrycznymi. Podwyższona przewodność elektryczna niektórych skał wynika z obecności w nich dobrze przewodzących prąd elektryczny minerałów akcesorycznych, albo z dobrej przewodności elektrolitycznej roztworów wodnych, wypełniających ich szczeliny. Duże wartości rezystywności występują w skałach litych, małoporowatych. Małe wartości rezystywności mają skały porowate, w pełni nasycone wodą mocno zmineralizowaną i z dużą ilością rozpuszczonych soli.

Skały zawierające wytrącenia minerałów rudnych, w kształcie żyłek lub pasemek, posiadają zwiększoną przewodność elektryczną. Odnosi się to na przykład do skał zawierających chalkopiryt i pirotyt. Skały takie są pod względem przewodności elektrycznej anizotropowe, przy czym ich przewodność w kierunku równoległym do osi tych wtrąceń jest większa od przewodności w kierunku prostopadłym.

Tabela 1

Właściwości magnetyczne minerałów skałotwórczych

Rodzaj materiału magnetycznego	Przenikalność magnetyczna względna μ_r	Podatność magnetyczna χ	Minerały skałotwórcze
Diamagnetyk	0,999836 – 1,0	$-2 \times 10^{-4} - 0$	apatyt, plagioklaz, halit, kalcyt, kwarc, korund, węgiel, rutyl
Paramagnetyk	1,0 – 1,0064	$0 - 10^{-3}$	ilmenit, magnezyt, muskowit, oliwin, piroksen, porfiry, chromit, dolomit
Ferromagnetyk	1,0064 – 5,0	$10 - 4 \times 10^6$	hematyt, magnetyt, pirotyt, jakobsyt, tytanomagnetyt

Tabela 2

Własności elektryczne niektórych skał

Grupa skał	Skała	Rezystywność, Ωm	Przenikalność dielektryczna względna
Magmowe	granit	$10^2 - 10^7$	5 - 9
	sjenit	$10^2 - 10^5$	7 - 14
	dioryt	$10^2 - 10^8$	8 - 9
	gabro	$10^2 - 10^5$	18
	bazalt	$10^3 - 10^6$	12
	perydotyt	$10^2 - 10^3$	7
Metamorficzne	kwarcyt	$10 - 10^5$	7
	gnejs	$10^2 - 10^7$	8 - 15
	marmur	$10^2 - 10^5$	8
Osadowe	wapień	$10^2 - 10^3$	8 - 15
	dolomit	$10^2 - 10^6$	-
	piaskowiec	$10 - 10^6$	9 - 11
	piasek	$10 - 10^{10}$	4 - 6
	gлина	$10 - 10^6$	7 - 12
	tupek	$10 - 10^2$	6 - 8
	węgiel kamienny	$10^2 - 10^3$	3 - 15
węgiel brunatny	$10 - 10^5$	4 - 5	

Tabela 3

Własności elektryczne niektórych minerałów i innych składników skał

Grupa	Minerał	Rezystywność, Ωm	Przenikalność elektryczna względna
Pierwiastki rodzime	grafit	$10^{-6} - 10^{-3}$	15 - 40
	siarka	$10^{12} - 10^{15}$	3 - 4
Siarczki	sfaleryt	$10^5 - 10^7$	6 - 12
	piryt	$10^{-4} - 10^{-1}$	33 - 81
	galenit	$10^{-6} - 10^{-1}$	81
	chalkopiryt	$10^{-3} - 10^{-1}$	81
Tlenki	hematyt	$10^{-2} - 10^2$	25 - 140
	magnetyt	$10^{-2} - 10^5$	34 - 81
	rutyl	$10^{-2} - 10^3$	80 - 150
	kwarc	$10^{12} - 10^{14}$	4 - 5
Węglany	kalcyt	$10^7 - 10^{12}$	7 - 9
	dolomit	10^8	6,8
	syderyt	$10 - 10^5$	5 - 7
Siarczany	anhydryt	$10^7 - 10^{10}$	6,5
	gips	10^{10}	7,0
Halogenki	halit	$10^{14} - 10^{15}$	5 - 7
	sylwin	$10^{13} - 10^{15}$	4 - 7
	fluoryt	10^{14}	6 - 9
Krzemiany	oliwin	10^5	6 - 8
	biotyt	$10^{13} - 10^{15}$	10 - 12
	muskowit	$10^{13} - 10^{15}$	5-7
	ortoklaz	$10^{11} - 10^{12}$	4 - 6
	albit	$10^{11} - 10^{12}$	5 - 6
	anortyt	$10^{11} - 10^{12}$	7 - 8
	skalenie	10^{12}	4 - 6
labrador	10^{11}	6 - 7	
Inne	lód	$6,7 \cdot 10^5$	90
	woda	$10 - 10^5$	80
	ropa naftowa	10^{10}	2

Przewodność elektryczna skał osadowych jest na ogół mała, gdyż substancjami wiążącymi są minerały o niskiej przewodności, takie jak: kwarc, gips, kalcyt i inne. Skały osadowe drobnoziarniste, zwłaszcza zawierające cząstki koloidalne, mają większą przewodność elektryczną niż skały gruboziarniste. Wśród skał osadowych, niezawierających minerałów rudnych, największą przewodność elektryczną mają it i glina. Rezystywność pokładów **węgla kopalnych** związana jest z zawartością w nich pierwiastka węgla, co prowadzi do zwiększania ich wartości.

Pod względem elektrycznym, substancje skalne zależnie od wartości ich rezystywności dzieli się na przewodniki, półprzewodniki i dielektryki:

- przewodniki elektryczne, których przewodnictwo związane jest z obecnością w nich swobodnie poruszających się elektronów; do tej grupy należą metale o rezystywność $\rho \sim 10^{-8} \Omega\text{m}$ oraz grafit z wartością $\rho = 10^{-6} \Omega\text{m}$;
- półprzewodniki elektroniczne o wartości rezystywności ρ od 10^{-6} do $10^4 \Omega\text{m}$; do których należą siarczki, tlenki, arseniki i telurki;
- dielektryki; nie zawierają one żadnych swobodnych nośników ładunków elektrycznych, a pod działaniem pola elektrycznego występuje w nich przesunięcie ładunków wywołujące polaryzację dielektryka.

W grupie przewodników obserwuje się wzrost ich oporu elektrycznego przy wzroście temperatury, a w półprzewodnikach opór elektryczny maleje przy wzroście temperatury. Domieszki substancji zanieczyszczających w przewodnikach zawsze zwiększają ich rezystancję, w półprzewodnikach natomiast ją zmniejszają.

W warunkach niskich temperatur skały zachowują się jak izolatory, tzn. ich pasmo walencyjne jest wypełnione, a pasmo przewodnictwa oddzielone od pasma walencyjnego przerwą energetyczną.

Przenikalność elektryczna względna ϵ_r skał jest istotna tylko w odniesieniu do materiałów słabo przewodzących prąd elektryczny. Jest to stosunek przenikalności elektrycznej danej skały do przenikalności próżni wyrażony wielkością bezwymiarową, większą od jedności. Wartość ϵ_r suchej skały porowatej jest znacznie mniejsza niż skały bez porów.

Przenikalność dielektryczna ϵ_r skał zależy w głównej mierze od składu chemicznego oraz od ich struktury krystalicznej, która określa rodzaj polaryzacji elektrycznej. Przy niedużych częstotliwościach pola elektrycznego wartości ϵ_r większości minerałów mieszczą się w przedziale od 3 do 25. Najmniejsze wartości ϵ_r –około od 3 do 5 – mają minerały, które podlegają głównie polaryzacji elektronowej, np. kwarc, ortoklaz, gips i siarka. Minerały, w których do polaryzacji elektronowej dołącza polaryzacja jonowa, mają zazwyczaj wyższe wartości przenikalności dielektrycznej. Przykładem jest halit i sylwin, dla których ϵ_r wynosi od 4,4 do 6,7. W minerałach o polaryzacji dipolowej przenikalność dielektryczna jest jeszcze większa. Właśnie tym efektem tłumaczy się wysoką wartość ϵ_r rutylu i innych tego typu minerałów oraz wody i lodu.

Innymi właściwościami elektrycznymi wyróżniającymi skały jest zjawisko piroelektryczności oraz piezoelektryczności.

Charakterystyczne właściwości elektryczne wybranych gruntów i skał

Materiał	Rezystywność, Ωm		Przenikalność elektryczna względna
	wartość średnia	zakres wartości spotykanych	
Iły	80	40 - 190	6-13
Piasek suchy	800	200-2 500	4
Piasek mokry	300	100-1 000	15
Żwir suchy	1500	500- 2 500	
Żwir zawodniony	300	100-500	5
Gliny	100	30-250	4
Czarnoziem	10	6 -70	
Grunt wapienny suchy	1000	500-4 000	5 -13
Grunty kamieniste	2000	1 000 – 5 000	
Grunt bagienny	40	30-50	
Grunt żwirowo - piaszczysty	500	480 -2 500	
Grunt piaszczysty wilgotny	250	80-800	
Grunt piaszczysty suchy	500	200-2 000	
Gleba leśna piaszczysto- ilasta	100	63- 270	
Gleba ilasto torfowa	80	63-170	
Torfy	20	15-250	
Pokład węgla suchy	50	38-113	
Pokład węgla mokry	10	7-13	
Łupek	100	50 - 300	
Bazalt	5000	3 000-7 000	
Granit, marmur, piaskowiec	7000	1 500 – 10 000	7-9
Beton	300	100 –8 000	4,5
Woda morska	3	1-5	
Woda gruntowa	50	40-70	78
Lód	$6,7 \cdot 10^5$		91

Piroelektryczność jest zjawiskiem powstawania ładunków elektrycznych na powierzchni kryształu pod wpływem ogrzewania lub studzenia. Ładunki elektryczne powstają na przeciwnych ściankach niektórych kryształów (np. turmalinu) pod wpływem zmiany jego temperatury. Zjawisko jest wykorzystywane m.in. w czujnikach temperaturowych.

Piezoelektryczność jest zjawiskiem powstawania ładunków elektrycznych na powierzchni kryształu pod wpływem nacisku lub rozciągania. Właściwości piezoelektryczne mają kryształy będące złymi przewodnikami elektrycznymi. Zachodzi też efekt odwrotny, jeżeli kryształ piezoelektryczny umieści się w zmiennym polu elektrycznym, to będzie on wykonywał drgania sprężyste, stając się źródłem fal elektromagnetycznych. Piezoelektryki zmieniają swoje wymiary pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego. Odształcenie powstaje na skutek rozsunienia jonów pod wpływem sił elektrostatycznych i jest proporcjonalne do przyłożonego pola. Odształcenia te znalazły ważne zastosowanie w technice fal ultradźwiękowych. Fale takie są wytwarzane poprzez drgania piezokwarcu w takt drgań pola elektrycznego o odpowiedniej częstotliwości.

Wśród najczęściej stosowanych piezoelektryków znajdują się kryształy kwarcu oraz turmaliny. Występującym w naturze minerałem piezoelektrycznym jest kryształ górski, który jest powszechnie używany w elektronice. Obecnie kryształy

kwarcu wytwarza się również sztucznie metodą hydrotermalną. Turmaliny – to występujące w naturze borokrzemiany kilku metali. Były jednymi z pierwszych stosowanych praktycznie piezoelektryków.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Gierlotka S., *Magnetyzm i materiały magnetyczne*. „Wiadomości Elektrotechniczne” 2013, nr 4.
- [2] Halliday D., Resnick R., *Fizyka*, tom 2. PWN, Warszawa 2001.
- [3] Westphal M., *Paleomagnetyzm i własności magnetyczne skał*. PWN, Warszawa 1993.
- [4] Rawa H., *Elektryczność i magnetyzm w technice*. PWN, Warszawa 2001.
- [5] Ryncarz T., *Zarys fizyki górotworu*. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1993.
- [6] Ryka W., Maliszewska A., *Słownik petrograficzny*. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1991.
- [7] *Poradnik górnika*, tom 1. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1972.
- [8] *Poradnik górnika*, tom 5. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1976.
- [9] *Encyklopedia Fizyki Współczesnej*. PWN, Warszawa 1983.

