

Krystyna MIZERACKA, Henryk KURBIEL

Związek właściwości magnetycznych ze składem skał suwalskiego intruzywu anortozytowego

WSTĘP

Przy poszukiwaniu i rozpoznawaniu różnych kopalin użytecznych oraz przy badaniu budowy geologicznej powszechnie stosowana jest metoda magnetyczna — jako jedna z najtańszych i bardzo efektywnych. Ze względu na dużą liczbę wykonywanych interpretacji anomalii magnetycznych szczególnego znaczenia nabiera znajomość parametrów magnetycznych skał.

Znajomość namagnesowania indukcyjnego I_i oraz wielkości i kierunku naturalnej pozostałości magnetycznej I_n w przypadku skał o znacznej zawartości minerałów rudnych daje możliwość bardziej jednoznacznej interpretacji anomalii magnetycznych.

Badanie właściwości magnetycznych skał prowadzi Pracownia Parametrów Fizycznych Skał Przedsiębiorstwa Poszukiwań Geofizycznych w Warszawie na zlecenie Instytutu Geologicznego. Materiałem badań są rdzenie wiertnicze i próbki skał pobrane z rdzeni.

W latach 1963—1970 w ramach prac planowanych przez Zakład Złóż Rud Żelaza IG przeprowadzono badania parametrów magnetycznych skał z rdzeni odwiertów wykonanych w rejonie suwalskim. Celem badań było wyznaczenie podstawowych parametrów magnetycznych skał dla przeprowadzenia interpretacji anomalii magnetycznych oraz znalezienie związku pomiędzy właściwościami magnetycznymi skał a ich składem mineralnym w celu wyjaśnienia niektórych zjawisk fizyczno-chemicznych zachodzących w badanych skałach.

Pomiary podatności magnetycznej wykonano na wszystkich rdzeniach uzyskanych z otworów odwierconych w podłożu krystalicznym rejonu suwalskiego. Z wytypowanych interwałów rdzeni wyznaczono — oprócz podatności magnetycznej — naturalną pozostałość magnetyczną, a także dla niektórych próbek przeprowadzono badania stabilności magnetycznej, analizę termomagnetyczną oraz badania mikroskopowe.

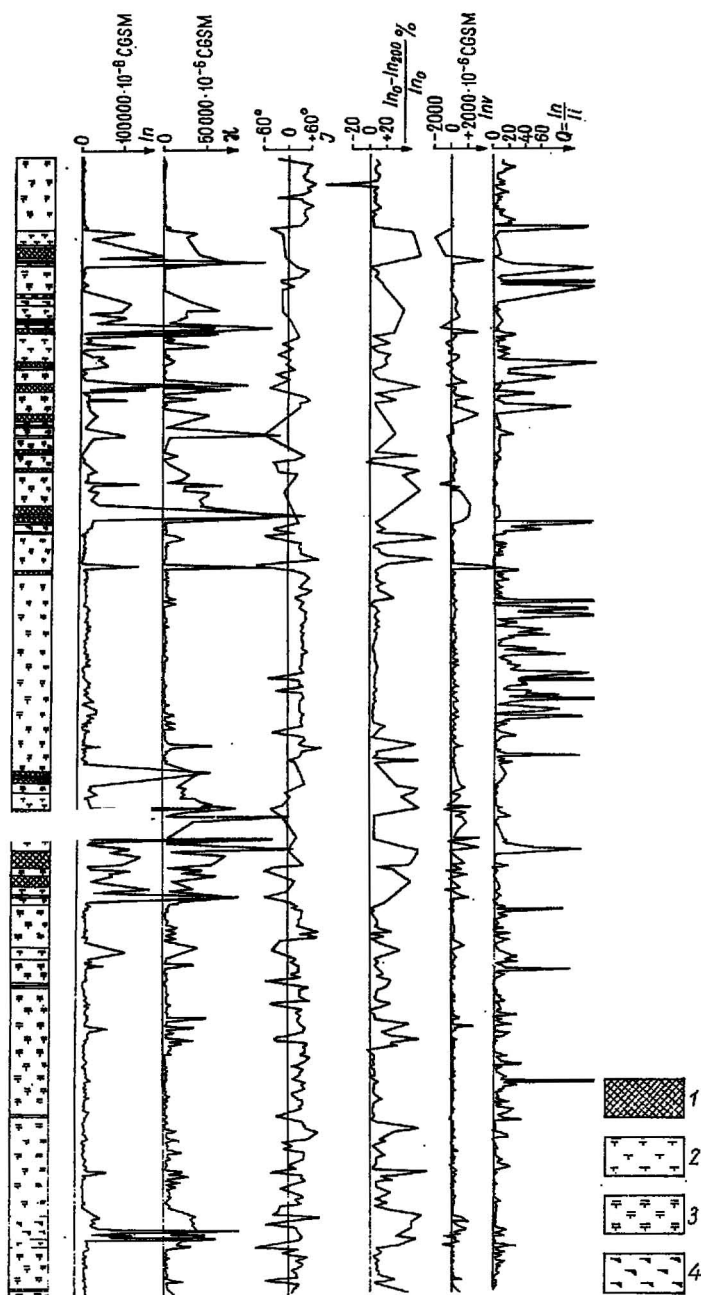


Fig. 1. Zestawienie wykresów parametrów magnetycznych skał z badanego otworu
 Comparison of the diagrams of magnetic parameters of rocks from bore hole

W oparciu o przeprowadzone badania w niniejszym artykule omówiono związek właściwości magnetycznych anortozytów, norytów i rud ilmenitowo-magnetytowych z ich składem mineralnym.

METODYKA BADAŃ

Pomiary podatności magnetycznej κ wykonano kappametrem na wszystkich rdzeniach. Wielkość i inklinację naturalnej pozostałości magnetycznej (I_n, J) określono magnetometrem astatycznym lub rockgeneratorem na próbkach wyciętych w kształcie kostki sześcienniej o boku 3 cm lub 2,4 cm. Próbki do tych badań pobierano w odstępach co 1 m z wytypowanych interwałów rdzeni.

Wyniki przedstawiono w formie wykresów odnoszących się do poszczególnych odwiertów (fig. 1). Dla różnych rodzajów nawierconych skał sporządzono także histogramy wartości $\kappa, I_n, J, Q = \frac{I_n}{H}$ oraz zestawiono

(w tabelach) średnie wartości tych parametrów. Dane te posłużyły do określenia właściwości magnetycznych poszczególnych rodzajów skał.

Ponadto na próbkach anortozytów, norytów i rud ilmenitowo-magnetytowych wykonano badania stabilności magnetycznej, a mianowicie: oczyszczanie termiczne, rozmagnesowanie polem zmiennym oraz pomiar lepkiej pozostałości magnetycznej. Do badań tych wybierano odcinki rdzenia jednorodne pod względem litologicznym i magnetycznym, ażeby badane próbki były typowe dla danego rodzaju skały, a jednocześnie wybierano próbki z różnych wierceń, by uwzględnione zostały wszystkie odmiany danego rodzaju skały.

Przy wyborze materiału skalnego do tych badań korzystano z opisu petrograficznego wykonanego przez St. Kubickiego i J. Siemiątkowskiego oraz z wyników pomiarów κ i I_n wykonanych wcześniej przez K. Mizeracką dla poszczególnych wierceń.

Taki dobór materiału do badań pozwala na wyciągnięcie wniosków dotyczących całego kompleksu skalnego na podstawie wyników analizy termomagnetycznej i badań mikroskopowych tylko kilku próbek.

Oczyszczanie termiczne w zakresie temperatur 50°—400° C przeprowadzono w następujący sposób: próbki skał nagrzewano w piecu syliowym w ekranie magnetycznym do określonej temperatury, a po ostudzeniu do temperatury pokojowej, mierzono magnetometrem astatycznym I_n oraz κ . W zakresie temperatur 400°—600° C próbki skał nagrzewane były w piecu syliowym w azbestie, a studzone w ekranie magnetycznym na zewnątrz pieca.

Uzyskane wyniki przedstawiono w formie krzywych $\frac{I_n}{I_{n0}} (T)$. W zestawieniach nie podano wszystkich otrzymanych krzywych, ale wybrano jedną charakterystyczną dla danego typu. Krzywe rozmagnesowania ter-

- 1 — ruda ilmenitowo-magnetytowa, 2 — noryt, 3 — anortozyt, 4 — noryty i anortozyty magnetytowe
 1 — ilmenite-magnetite ore, 2 — norite, 3 — anorthosite, 4 — norites and magnetite anorthosites

micznego zestawiono z krzywymi termoanalizy wykonanej przez J. Kru-
czyk, M. Jeleńską i M. Hofmoka, a ponadto uzupełniono danymi z badań
mikroskopowych (tab. 1), które wykonał J. Siemiątkowski.

Tabela 1

Zestawienie wyników badań mikroskopowych z wartościami κ i In

Nr próbki i rodzaj skały	Wyniki badań mikroskopowych						Parametry magnetyczne		
	plagio- klaz % obj. % wag.	piro- kseny % obj. % wag.	ma- gne- tyt % obj. % wag.	ilme- nit % obj. % wag.	piro- tyn % obj. % wag.	spinel % obj. % wag.	Suma Fe %	κ 10 ⁶ CGSM	In 10 ⁶ CGSM
nr 354. ruda	9,2 5,2	3,1 2,3	61,4 66,1	21,1 21,3	3,0 3,0	2,5 2,1	57,0	142640	248100
nr 248 ruda	63,0 48,6	0,8 0,7	25,0 35,7	7,7 10,4	3,3 4,3	— —	31,8	70730	312800
nr 520 noryt rudny	58,8 48,2	21,6 22,9	11,2 17,0	6,7 9,6	1,2 1,7	0,3 0,4	21,0	73160	125100
nr 346 anortozyt rudny	73,6 61,8	3,8 4,1	13,3 20,7	7,5 11,0	1,6 2,4	— —	20,9	53960	32870
nr 165 anortozyt	97,1	2,65	0,11	0,15	—	—	.	980	7710
nr 267 anortozyt	kryszta- ły o \varnothing ok. 0,2 i 2 cm	—	hemoilmenit suma magne- tytu i ilmeni- tu 0,13%	—	—	—	.	10	69670
nr 212 anortozyt	kryształy o \varnothing ok. 4 mm	—	suma magne- tytu i ilme- nit 0,1%	—	piryt	—	.	200	6780
nr 416 anortozyt	kryształy o \varnothing ok. 5 mm	5,33	0,38	0,06	—	—	.	170	11570

. nie określono

Dla niektórych próbek skał wykonane zostały przez Główne Labora-
torium IG analizy chemiczne. Wyniki tych analiz zestawiono (tab. 2)
z parametrami magnetycznymi.

WYNIKI BADAŃ I ICH INTERPRETACJA

ANORTOZYTY

Anortozyty suwalskiego masywu charakteryzują się podatnością ma-
gnetyczną κ zawartą w przedziale 0—40 000 · 10⁻⁶ CGSM, naturalną pozos-
tałością magnetyczną In , mieszczącą się w przedziale 1000—50000 · 10⁻⁶

CGSM, oraz inklinacją naturalnej pozostałości magnetycznej o wartościach dodatnich, zawierających się w przedziale 20° — 60° (fig. 1).

Typowe jednak anortozyty tego masywu posiadają podatność magnetyczną poniżej $5000 \cdot 10^{-6}$ CGSM i średnią wartość naturalnej pozostałości magnetycznej ok. $10\,000 \cdot 10^{-8}$ CGSM. W anortozytach tych bardzo często występują duże wartości $Q = \frac{I_n}{\alpha \cdot 0,5}$, powyżej 50. Inklinacja natu-

ralnej pozostałości magnetycznej jest stała o wartościach dodatnich zawartych w przedziale 30° — 40° . Charakterystyczną cechą tych anortozytów, jak wykazały badania mikroskopowe J. Siemiątkowskiego, jest występowanie różnej wielkości kryształów plagioklazów, w których zawarte są cienkie blaszki minerałów rudnych.

Typowe anortozyty posiadają bardzo dużą stabilność magnetyczną w odniesieniu do nagrzewania (fig. 2). Dla większości próbek rozmagnesowywanych termicznie, w temp. 400° C, pozostaje jeszcze ok. 80% naturalnej pozostałości magnetycznej, a w całym procesie nagrzewania inklinacja naturalnej pozostałości magnetycznej pozostaje stała.

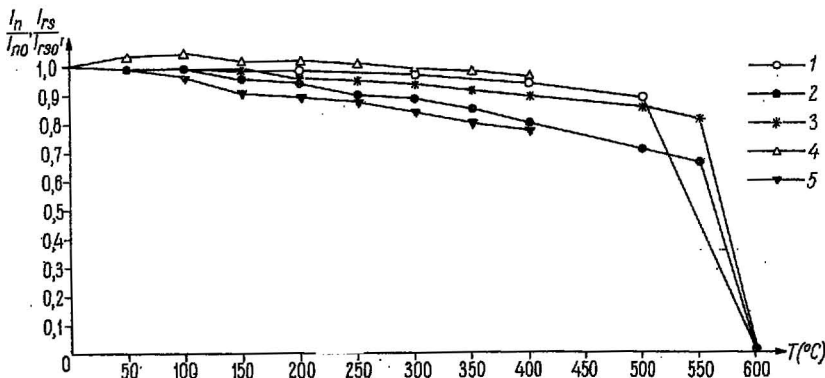


Fig. 2. Zestawienie krzywych rozmagnesowania termicznego próbek anortozytów (I typ)

Comparison of thermal demagnetization curves of anorthosite samples (I type)

1 — próbka plagioklazu; 2 — próbka nr 681; 3 — próbka nr 463; 4 — próbka nr 212; 5 — próbka nr 416

1 — plagioclase sample; 2 — sample No 681; 3 — sample No 463; 4 — sample No 212; 5 — sample No 416

Zestawiając wyniki badań magnetycznych z wynikami badań mikroskopowych (tab. 1, próbki nr 212, nr 267, nr 416) widać, że istnieje zależność między zawartością w próbce minerałów rudnych obserwowanych pod mikroskopem (jako oddzielne ziarna) a jej podatnością magnetyczną. Wielkość I_n nie zależy od ilości tych minerałów, ale od ilości zawartych w kryształach plagioklazów minerałów rudnych, występujących w formie cienkich blaszek. Przy zestawieniu wyników badań mikroskopowych i pomiarów magnetycznych α i I_n obserwuje się, że im większe są kryształy plagioklazów, w których zawarta jest większa liczba cienkich listewek minerałów rudnych, tym większa jest wartość I_n . I tak np. próbka wycięta z dużego kryształu plagioklazu posiada podatność magnetycz-

ną około zera, a naturalną pozostałość magnetyczną równą $135\,000 \cdot 10^{-6}$ CGSM. Okazało się też, że krzywa rozmagnesowania termicznego $\frac{I_n}{I_{n0}}(T)$ tej próbki jest podobna do krzywych rozmagnesowania próbek anortozytu, które posiadają podatność magnetyczną poniżej $5000 \cdot 10^{-6}$ CGSM (fig. 2).

Jeżeli wielkość I_n anortozytów zależy od ilości minerałów rudnych zawartych w kryształach plagioklazów, to kierunek namagnesowania tych minerałów określa kierunek naturalnej pozostałości magnetycznej anortozytów. Jeżeli przy tym kierunek I_n jest stały, a ułożenie kryształów plagioklazów w masie anortozytowej jest dowolne, to możemy powiedzieć, że namagnesowanie minerałów rudnych zawartych w plagioklazach i ich krystalizacja zachodziły po wykryształowaniu się kryształów plagioklazów.

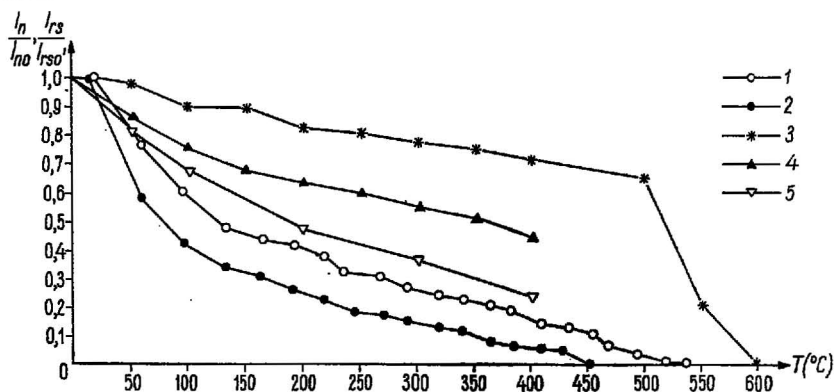


Fig. 3. Zestawienie krzywych rozmagnesowania termicznego i krzywych termoanalizy próbek anortozytów (II typ)

Comparison of thermal demagnetization curves and of thermoanalysis curves of anorthosite samples (II type)

krzywe termoanalizy: 1 — próbka nr 310; 2 — próbka nr 362; krzywe rozmagnesowania termicznego: 3 — próbka nr 215; 4 — próbka nr 189; 5 — próbka nr 390

thermoanalysis curves: 1 — sample No 310; 2 — sample No 362; curves of thermal demagnetization: 3 — sample No 215; 4 — sample No 189; 5 — sample No 390

Ze względu na dużą wartość podatności magnetycznej oraz stabilność magnetyczną wydzielić można drugi rodzaj anortozytów (fig. 3). Podatność magnetyczna tych anortozytów dochodzi do wartości $50\,000 \cdot 10^{-6}$ CGSM, a przebieg krzywych rozmagnesowania termicznego jest podobny do niektórych krzywych rozmagnesowania termicznego norytu (fig. 3 i 5). Podobne są również krzywe termoanalizy norytów i anortozytów.

Wspólną cechą niektórych anortozytów i norytów jest występowanie składników ferromagnetycznych, zaznaczających się na krzywych termoanalizy (fig. 3 i 5) w temperaturach 100° — 150° C i 250° — 300° C. Możemy przyjąć, że temperatury te są punktami Curie dwóch faz szeregu hematytowo-ilmenitowego. Trzecia faza występująca na wszystkich krzywych termoanalizy anortozytów i norytów z punktem Curie 450° — 500° C może być tytanomagnetytem, ale zawartość ulvospinelu w tytanomagnetycie jest różna w różnych próbkach.

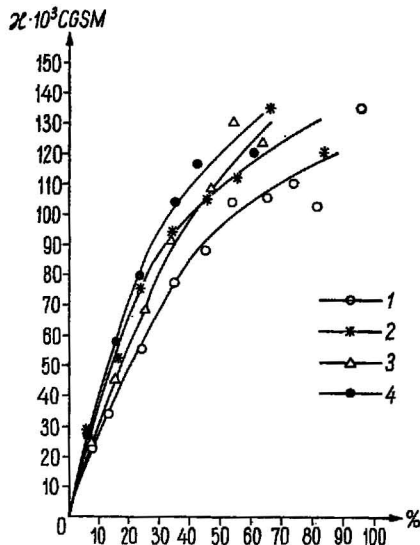
Kierunek naturalnej pozostałości magnetycznej anortozytów (II typ) jest wypadkową kierunków In ferromagnetycznych składników wchodzących w skład tych anortozytów.

NORYTY

Noryty charakteryzują się podatnością magnetyczną zawartą w przedziale $10\,000\text{--}100\,000 \cdot 10^{-6}$ CGSM, naturalną pozostałością magnetyczną zawartą w przedziale $3\,000\text{--}15\,000 \cdot 10^{-6}$ CGSM oraz na ogół dodatnią inklinacją naturalnej pozostałości magnetycznej, zawartą w przedziale $25^\circ\text{--}70^\circ$ (fig. 1).

Fig. 4. Zależność podatności magnetycznej od procentu objętościowego związków żelaza (1), procentu objętościowego magnetytu (2), procentu wagowego żelaza (3), procentu wagowego żelaza z magnetytu (4)

Dependence of magnetic susceptibility upon volume percentage of iron compounds (1), volume percentage of magnetite (2), weight percentage of iron (3), weight percentage of iron from magnetite (4)



Dolna granica podatności magnetycznej ($10\,000 \cdot 10^{-6}$ CGSM) zgodnie z wyznaczoną dla tego rejonu zależnością podatności magnetycznej od zawartości żelaza (fig. 4) odpowiada 3% zawartości objętościowej związków żelaza.

Krzywe rozmagnesowania termicznego $\frac{In}{Ino}$ (T) próbek norytu (fig. 5)

podzielić można na trzy grupy w zależności od stopnia stabilności magnetycznej. Do pierwszej grupy należą próbki norytu, dla których

$\frac{In(400^\circ C)}{Ino}$ wynosi 0,1—0,3, do drugiej grupy należą próbki, dla których

$\frac{In(400^\circ C)}{Ino}$ wynosi 0,3—0,5, oraz do trzeciej grupy należą próbki, dla

których $\frac{In(400^\circ C)}{Ino}$ wynosi 0,5—0,8.

Biorąc pod uwagę pomierzone dla tych próbek wartości χ i In można zauważyć, że próbki o największej stabilności magnetycznej (3-cia grupa) posiadają mniejsze wartości In i mniejszy rozrzut wartości χ niż pozo-

stałe próbki norytów, a ponadto stabilność magnetyczna nie zależy od wielkości podatności magnetycznej.

Zależność właściwości magnetycznych norytu od składu mineralnego wyjaśniają krzywe termooanalizy $\frac{I_{rs}}{I_{rso}}$ (fig. 5) wykonane dla próbek nr 53, nr 260 oraz nr 343. Podobnie jak w anortozytach kształt tych krzywych jest charakterystyczny dla stałych roztworów szeregu tytanomagnetytowego i hematytowo-ilmenitowego. Na krzywych termooanalizy $\frac{I_{rs}}{I_{rso}}$ próbek nr 53 i nr 260 zaznacza się przy tym głównie jeden składnik ferromagnetyczny o punkcie Curie około 475°C , jest nim tytanomagnetyt, a na krzywej termooanalizy próbki nr 343, oprócz głównego składnika ferromagnetycznego o punkcie Curie 475°C , zaznaczają się nieznacznie dwie fazy szeregu hematytowo-ilmenitowego o punktach Curie 130°C oraz 300°C .

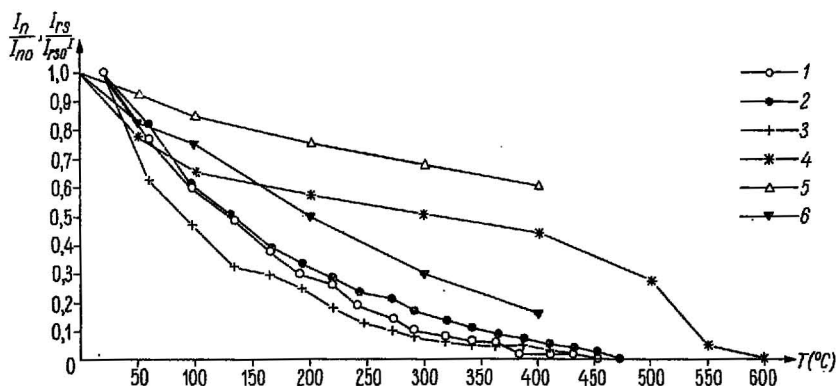


Fig. 5. Zestawienie krzywych rozmagnesowania termicznego i krzywych termooanalizy próbek norytów

Comparison of thermal demagnetization curves and of thermoanalysis curves of norite samples

krzywe termooanalizy: 1 — próbka nr 53; 2 — próbka nr 260; 3 — próbka nr 343; krzywe rozmagnesowania termicznego: 4 — próbka nr 115; 5 — próbka nr 168; 6 — próbka nr 478

thermoanalysis curves: 1 — sample No 53; 2 — sample No 260; 3 — sample No 343; curves of thermal demagnetization: 4 — sample No 115; 5 — sample No 168; 6 sample No 478

Biorąc pod uwagę występowanie w norytach faz szeregu hematytowo-ilmenitowego, o różnych temperaturach Curie, zmienność stabilności magnetycznej norytów tłumaczyć możemy zmiennością składu chemicznego szeregu hematytowo-ilmenitowego, a zmienność wartości κ i I_n — zmiennością zawartością składników ferromagnetycznych w próbkach norytu.

W przypadku występowania w norytach dużej koncentracji składników ferromagnetycznych właściwości magnetyczne norytów stają się podobne do właściwości magnetycznych rud ilmenitowo-magnetytowych rodzaju.

RUDY ILMENITOWO-MAGNETYTOWE

Rudy ilmenitowo-magnetytowe są najbardziej magnetycznymi skałami suwalskiego masywu anortozytowego. Charakteryzują się one podatnością magnetyczną zawartą w przedziale $70\,000\text{--}175\,000 \cdot 10^{-6}$ CGSM, naturalną pozostałością magnetyczną zawartą w przedziale $75\,000\text{--}945\,000 \cdot 10^{-6}$ CGSM oraz bardzo zmienną inklinacją naturalnej pozostałości magnetycznej, która w przypadku większości próbek posiada wartość ujemną (fig. 1).

Dolna granica podatności magnetycznej ($70\,000 \cdot 10^{-6}$ CGSM) zgodnie z wyznaczoną dla tego rejonu zależnością podatności magnetycznej od zawartości żelaza (fig. 4) odpowiada 30% zawartości objętościowej związków żelaza.

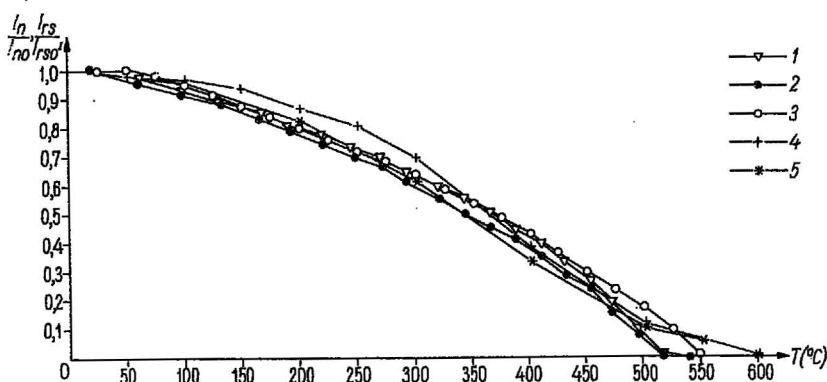


Fig. 6. Zestawienie krzywych rozmagnesowania termicznego i krzywych termooanalizy próbek rudy ilmenitowo-magnetytowej (I typ)

Comparison of thermal demagnetization curves and of thermoanalysis curves of ilmenite-magnetite ore samples (I type)

krzywe termooanalizy: 1 — próbka nr 648; 2 — próbka nr 739; 3 — próbka nr 664; krzywe rozmagnesowania termicznego: 4 — próbka nr 354; 5 — próbka nr 590

thermoanalysis curves: 1 — sample No 648; 2 — sample No 739; 3 — sample No 664; curves of thermal demagnetization: 4 — sample No 354; 5 — sample No 590

Ze względu na stabilność magnetyczną rudy ilmenitowo-magnetytowe podzielić można na dwa rodzaje. Pierwszy rodzaj rud, charakteryzujący się na ogół podatnością magnetyczną powyżej $100\,000 \cdot 10^{-6}$ CGSM, posiada wyższą stabilność magnetyczną w odniesieniu do nagrzewania niż drugi rodzaj rud charakteryzujący się na ogół podatnością magnetyczną poniżej $100\,000 \cdot 10^{-6}$ CGSM. Próbki rud pierwszego rodzaju połowę naturalnej pozostałości magnetycznej tracą przy rozmagnesowaniu w temp. $300\text{--}370^\circ\text{C}$, natomiast próbki rud drugiego rodzaju połowę naturalnej pozostałości magnetycznej tracą już w temp. $220^\circ\text{--}270^\circ\text{C}$ (fig. 6 i 7). Otrzymuje się również inny przebieg krzywych rozmagnesowania termicznego i krzywych termooanalizy (fig. 6 i 7).

Wydzielone rodzaje rud różnią się również składem mineralogicznym, co wykazały badania mikroskopowe (tab. 1, próbki nr 354 i nr 248) wykonane dla niektórych próbek termicznie rozmagnesowanych. Na przy-

kład próbka nr 354, należąca do pierwszego rodzaju rud i posiadająca podatność magnetyczną $142\,640 \cdot 10^{-6}$ CGSM oraz wyższą stabilność magnetyczną, zawiera 61,4% obj. magnetytu, 21,1% obj. ilmenitu, 2,5% obj. spineli oraz 3,0% pirotynu.

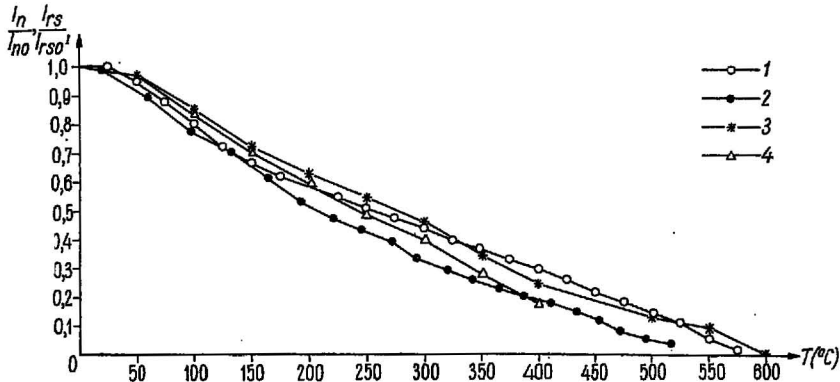


Fig. 7. Zestawienie krzywych rozmagnesowania termicznego i krzywych termoanalizy próbek rudy ilmenitowo-magnetytowej (II typ)
Comparison of thermal demagnetization curves and of thermoanalysis curves of ilmenite-magnetite ore samples (II type)

krzywe termoanalizy: 1 — próbka nr 134; 2 — próbka nr 512;
krzywe rozmagnesowania termicznego: 3 — próbka nr 247; 4 — próbka nr 248

thermoanalysis curves: 1 — sample No 134; 2 — sample No 512;
curves of thermal demagnetization: 3 — sample No 247; 4 — sample No 248.

Z analogii krzywych rozmagnesowania termicznego, z wartości α oraz z danych badań mikroskopowych wynika, że rudy pierwszego rodzaju zawierają powyżej 40% obj. magnetytu oraz dużą ilość ilmenitu. Magnetyt występujący w tych rudach posiada dużą ilość odmieszkań ilmenitu i spineli jako produktów rozpadu tytanomagnetytu (J. Siemiątkowski, 1970).

Ponieważ krzywe termoanalizy próbek rud pierwszego rodzaju (fig. 6) wskazują na występowanie tylko jednej fazy o punkcie Curie 500—550°C, można powiedzieć, że jest to punkt temperaturowy magnetytu, a występujący tu ilmenit i spinel są niemagnetyczne.

Występowanie w magnetycie dużej ilości odmieszkań ilmenitu i spineli w postaci licznych lametek i drobnych soczewek, a ponadto występowanie siarczków powoduje obniżenie wartości naturalnej pozostałości magnetycznej, bowiem jak można zauważyć, omawiany rodzaj rud w większości przypadków charakteryzuje się stosunkowo niskimi wartościami I_n , np. próbka nr 590 (fig. 6) posiada podatność magnetyczną równą $227\,700 \cdot 10^{-6}$ CGSM, natomiast I_n wynosi $53\,400 \cdot 10^{-6}$ CGSM.

Dla drugiego rodzaju rud krzywe termoanalizy (próbki nr 134, 512, fig. 7) wskazują na występowanie dwóch faz o punktach Curie zawartych w przedziałach temperatur 100°—200°C, 270°—320°C oraz trzeciej fazy o punkcie Curie ok. 500°C.

Jak wynika z interpretacji tych krzywych, wykonanej przez J. Kruczyk, M. Jeleńską i M. Hofmokr, ostatnia faza o temperaturze Curie ok.

500° C związana jest z występowaniem magnetytu lub tytanomagnetytu o małej zawartości ulvospinelu, natomiast punkty przegięcia zaznaczające się na krzywych termooanalizy (fig. 7) w przedziałach temperatur 100—200° C oraz 270—320° C związane są z występowaniem dwóch faz tytanohematytu.

Na podstawie badań mikroskopowych (tab. 1) próbki nr 248, należącej — jak wykazała krzywa rozmagnesowania termicznego — do drugiego rodzaju rud i posiadającej podatność magnetyczną równą $70\,730 \cdot 10^{-6}$ CGSM oraz I_n równą $312\,800 \cdot 10^{-6}$ CGSM stwierdzono 25,0% obj. magnetytu, 7,7% obj. ilmenitu, 3,3% obj. pirotynu, 6,3% obj. plagioklazę, oraz brak spineli. W innych próbkach, np. nr 406, nr 351, nr 350, należących do drugiego rodzaju rud, spinele również nie występują lub występują w bardzo małych ilościach, natomiast występuje duży procent siarczków (5—18%), głównie pirotynu. Z danych tych wynika, że próbki rud ilmenitowo-magnetytowych drugiego rodzaju charakteryzują się brakiem spineli lub występowaniem ich w bardzo małych ilościach. Ponadto w przypadku podanej próbki i większości przebadanych próbek można stwierdzić, że podatność magnetyczna jest proporcjonalna do zawartości obj. magnetytu, ale ilość magnetytu nie tłumaczy nieproporcjonalnie dużej wartości I_n .

Porównując z kolei wyniki analizy chemicznej z parametrami magnetycznymi (tab. 2) widać, że κ jest proporcjonalna do procentowej zawartości Fe_2O_3 , natomiast duże wartości I_n oraz duże wartości Q występują

Tabela 2

Zestawienie wartości I_n , κ , Q z wynikami analizy chemicznej

Nr próbki	rodzaj skały	$I_n \cdot 10^6$ CGSM	$\kappa \cdot 10^6$ CGSM	Fe_2O_3 %	FeO %	TiO_2 %	$\frac{Fe_2O_3}{FeO+TiO_2}$	$Q = \frac{I_n}{0,5 \cdot \kappa}$
652	Ruda ilmenitowo-magnetytowa	90320	136620	41,3	26,0	9,36	1,15	1,32
653		22220	134400	43,8	26,5	9,72	1,21	0,33
133		140500	107470	34,8	17,8	9,36	1,28	2,61
347		437600	97280	30,9	23,2	9,20	0,95	9,0
827		42270	76800	27,2	18,0	7,00	1,09	1,10
349		573700	65180	21,1	15,1	6,40	0,98	7,6
828		15190	61960	20,1	13,3	6,84	1,00	0,49
410		116800	30320	13,0	9,9	4,44	0,91	7,7
409		Noryt	4720	28020	11,4	7,3	2,94	1,12
291	4810		17660	9,4	5,4	3,78	1,02	0,54
290	2290		16660	8,6	5,7	3,32	0,86	0,27
252	Anortozyt	16020	4480	1,8	1,4	0,92	0,78	7,15
251		6880	3040	1,8	1,0	0,86	0,98	4,53
462		22880	1800	0,73	1,1	0,60	0,43	25,42
464		26110	1570	1,2	1,2	0,30	0,80	33,05

w tych próbkach (nr 347, nr 349, nr 410), dla których stosunek $\alpha = \frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{FeO} + \text{TiO}_2}$ jest mniejszy od jedności.

Jak wynika z przebiegu krzywych termooanalizy i krzywych rozmagnesowania termicznego, duże wartości I_n rud drugiego rodzaju związane są ze składnikiem ferromagnetycznym o niskiej temperaturze punktu Curie.

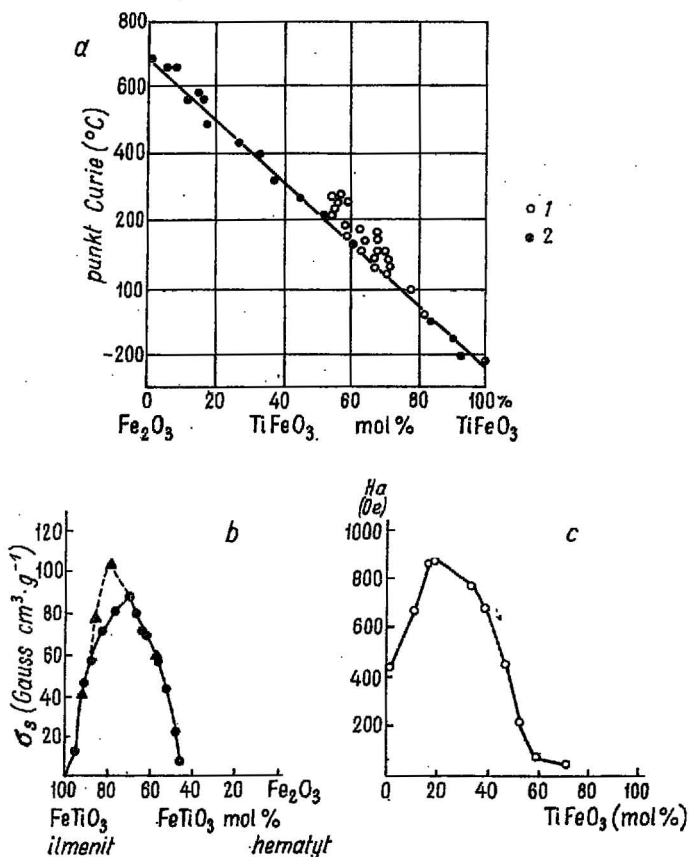


Fig. 8. Właściwości magnetyczne szeregu hematytowo-ilmenitowego według Nagaty

(Magnetic properties of the haematite — ilmenite series according to Nagata)

Zależności: a — punktu Curie, b — natężenia spontanicznego namagnesowania, c — siły koercji od chemicznego składu szeregu hematytowo-ilmenitowego; 1 — naturalne minerały; 2 — syntetyczne próbki
 Dependences: a — Curie's point, b — intensity of spontaneous magnetization, c — coercive force from chemical composition of the haematite-ilmenite series; 1 — natural minerals; 2 — synthetic samples

Jeśli weźmiemy pod uwagę właściwości magnetyczne stałego roztworu szeregu hematytowo-ilmenitowego $y \text{ FeTiO}_3 (1-y) \text{ Fe}_2\text{O}_3$, scharakteryzowane wykresami zależności punktu Curie, natężenia spontanicznego na-

magnesowania (δs) i siły koercji (H_c) od chemicznego składu szeregu hematytowo-ilmenitowego (fig. 8), to możemy powiedzieć, że składnikiem ferromagnetycznym powodującym duże namagnesowanie rud drugiego rodzaju jest faza szeregu hematytowo-ilmenitowego dla $0,55 < y < 0,75$. Ze względu na duże właściwości ferromagnetyczne i dużą zawartość ilmenitu faza ta nazwana została ferromagnetycznym ilmenitem (D. W. Collinson, K. M. Creer, S. K. Runcorn, 1967; T. Nagata, S. K. Akimoto, 1956).

Biorąc pod uwagę właściwości magnetyczne stałego rotworu szeregu hematytowo-ilmenitowego (fig. 8) możemy powiedzieć, że występująca na krzywych termooanalizy faza o punkcie Curcie $100^\circ - 200^\circ$ odpowiada występowaniu szeregu hematytowo-ilmenitowego ($0,55 < y < 0,75$), tzw. ferromagnetycznego ilmenitu, a faza o punkcie Curie $270^\circ - 320^\circ$ C występowaniu szeregu hematytowo-ilmenitowego z $y < 0,55$. Tak więc w rudach drugiego rodzaju oprócz magnetytu występuje drugi ferromagnetyczny składnik — szereg hematytowo-ilmenitowy.

Występowanie w rudach ilmenitowo-magnetytowych szeregu hematytowo-ilmenitowego, a w szczególności ferromagnetycznego ilmenitu może wyjaśnić pochodzenie odwrotnego kierunku pozostałości magnetycznej (ujemne wartości inklinacji) rud. Odwrotny kierunek I_n skał głębinowych zawierających minerały szeregu hematytowo-ilmenitowego oraz tytanomagnetytu był już zaobserwowany przez wielu badaczy (R. L. Wilson, 1966; T. Nagata, S. K. Akimoto, 1956; T. Nagata, 1965), w większości tych przypadków odwrotność I_n tłumaczona była mechanizmem samoodwrócenia (autoinwersji).

R. L. Wilson (1966) obserwując odwrotny kierunek I_n w wylewach bazaltowych różnego wieku stwierdza, że w próbkach skał o odwrotnym kierunku I_n występuje większa ilość ilmenitu i lametek ilmenitowych niż w próbkach namagnesowanych normalnie. R. L. Wilson sugeruje możliwość zachodzenia samoodwrócenia I_n , ale nie wyjaśnia tego mechanizmu. Należy zauważyć, że odwrotne namagnesowanie skał bazaltowych, jak i badanych rud ilmenitowo-magnetytowych związane jest z występowaniem w tych skałach dużej ilości ilmenitu i lametek ilmenitowych. Ilmenit ten nie jest magnetyczny, ale wskazuje na stan utlenienia i na występowanie procesów chemicznych, którym podlegały skały.

T. Nagata (1965) odwrotne namagnesowanie dacytów z góry Haruna tłumaczy mechanizmem samoodwrócenia faz szeregu hematytowo-ilmenitowego. Badając właściwości magnetyczne szeregu hematytowo-ilmenitowego dochodzi do wniosku, że fazy szeregu hematytowo-ilmenitowego ($0,45 \leq y \leq 0,6$), będące na pograniczu obszaru ferromagnetycznego i antyferromagnetycznego, posiadają zdolność do nabywania odwrotnego kierunku naturalnej pozostałości magnetycznej. Twierdzi on, że mechanizm samoodwrócenia I_n związany jest z przejściem ze stanu ferromagnetycznego w stan antyferromagnetyczny, przy czym przejście to interpretować można jako przejście jonów tytanu i żelaza ze stanu uporządkowanego w stan nie uporządkowany.

Zagadnienie mechanizmu samoodwrócenia nie jest ostatecznie opracowane i budzi wśród badaczy wiele zastrzeżeń. Wielu badaczy zgadza się jednak co do tego, że obecność ferromagnetycznej fazy szeregu hematytowo-ilmenitowego powoduje odwrócenie kierunku termicznej pozostałości magnetycznej niektórych skał.

Ze względu na właściwości magnetyczne szeregu hematytowo-ilmenitowego i jego występowanie w rudach ilmenitowo-magnetytowych wydaje się, że odwrotne namagnesowanie rud można tłumaczyć samoodwróceniem I_n , chociaż wyjaśnienie tego mechanizmu nastęcza, jak już wspomniano, jeszcze wiele trudności. Zagadnienie to wymaga dalszych szczegółowych badań.

WNIOSKI

1. Badane rodzaje skał — anortozyty, noryty i rudy ilmenitowo-magnetytowe różnią się właściwościami magnetycznymi, ale posiadają również wiele cech wspólnych. Z każdego rodzaju skały wyróżniono co najmniej dwie odmiany, z których jedna jest charakterystyczna dla danego rodzaju skały, a druga posiada cechy wspólne z innymi rodzajami skał.

2. Typowe anortozyty, mimo małej zawartości minerałów rudnych obserwowanych pod mikroskopem jako oddzielne ziarna, posiadają dużą termiczną pozostałość magnetyczną o dodatniej inklinacji zawartej w przedziale 30° — 40° . Wielkość naturalnej pozostałości magnetycznej anortozytów zależy od ilości cienkich blaszek minerałów rudnych zawartych w kryształach plagioklazów.

3. W zależności od koncentracji składników ferromagnetycznych — tytatomagnetytu i dwóch faz szeregu hematytowo-ilmenitowego — właściwości magnetyczne anortozytów stają się podobne do norytów lub rud ilmenitowo-magnetytowych drugiego rodzaju. Są to anortozyty okruszczone.

4. Noryty występują w trzech odmianach w zależności od stopnia stabilności magnetycznej, która zależy w dużej mierze od składu faz szeregu hematytowo-ilmenitowego. Głównym jednak składnikiem ferromagnetycznym, decydującym o właściwościach magnetycznych norytów jest tytanomagnetyt z punktem Curie 450° — 500° C. Duża koncentracja składników ferromagnetycznych w norytach upodabnia je do rud ilmenitowo-magnetytowych drugiego rodzaju.

5. Rudy ilmenitowo-magnetytowe ze względu na stabilność magnetyczną, skład i ilość minerałów rudnych podzielone zostały na dwa rodzaje. Podstawową cechą pierwszego rodzaju rud jest występowanie tylko jednego składnika ferromagnetycznego — magnetytu, podczas gdy w drugim rodzaju rud oprócz magnetytu występuje drugi główny składnik — ferromagnetyczny ilmenit.

6. Rudy ilmenitowo-magnetytowe, a w szczególności rudy pierwszego rodzaju są na ogół namagnesowane odwrotnie do współczesnego ziemskiego pola magnetycznego. Właściwości magnetyczne szeregu hematytowo-ilmenitowego sugerują możliwość wiązania odwrotnego namagnesowania z samoodwróceniem I_n . Mechanizm samoodwrócenia I_n w badanych rudach ilmenitowo-magnetytowych nie został wyjaśniony i wymaga dalszych szczegółowych badań.

7. Stwierdzenie odwrotnego namagnesowania złoża rud ilmenitowo-magnetytowych w masywie anortozytowym pozwoliło wyjaśnić przyczynę istnienia nad tym złożem niewielkiej anomalii magnetycznej.

Przedsiębiorstwo Poszukiwań Geofizycznych
Warszawa, ul. Stalingradzka 34
Zakład Geofizyki
Instytutu Geologicznego
Warszawa, ul. Rakowiecka 4

Nadesłano dnia 14 grudnia 1972 r.

PIŚMIENNICTWO

- COLLINSON D. W., CREER K. M. RUNCORN S. K. (1967) — *Methods in palaeomagnetism*. Amsterdam — London — New York.
- SIEMIĄTKOWSKI J. (1970) — Automorficzne wrostki tytanonośnych magnetytów w piroksenach skał masywu suwalskiego. *Kwart. geol.*, 14, p. 1—8, nr 1. Warszawa.
- WILSON R. L. (1966) — Further Correlations between the petrology and the natural magnetic polarity of basalts, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 10, p. 413—420, nr 4.
- NAGATA T., AKIMOTO S. K. (1956) — Magnetic properties of ferromagnetic ilmenites. *Geofisica Pure*, 34, p. 36—50.
- НАГАТА Т. (1965) — Магнетизм горных пород. Изд. МИР. Москва.

Крыстына МИЗЕРАЦКА, Хенрик КУРБЕЛЬ

СВЯЗЬ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ С СОСТАВОМ ПОРОД СУВАЛЬСКОЙ АНОРТОЗИТОВОЙ ИНТРУЗИИ

Резюме

Произведены детальные магнитные исследования пород сувальского анортозитового массива. Эти исследования включали измерение магнитной восприимчивости, величины и направления естественной остаточной намагниченности образцов пород и изучение магнитной стабильности.

Измерения магнитной восприимчивости образцов пород, отобранных из керна, позволили определить магнитную дифференциацию исследованных пород (фиг. 1), определить зависимость магнитной восприимчивости от концентрации рудных минералов в этих породах (фиг. 4), а также доставили количественные данные для интерпретации магнитных аномалий. Наличие на поверхности небольшой магнитной аномалии объясняется обратной направленностью естественной остаточной намагниченности ильменитово-магнетитовых руд.

Изучение магнитной стабильности, термомагнитный анализ, а также микроскопические исследования доставили более детальные данные о магнитных свойствах исследованных пород и позволили определить связь магнитных свойств анортозитов, норитов и ильменитово-магнетитовых руд с их минеральными составами.

На основании проведенных исследований установлено, что типичные анортозиты сувальского массива, несмотря на небольшое содержание рудных минералов, наблюдавшихся под микроскопом в виде отдельных зерен, обладают большой термической остаточной намагниченностью с положительным наклоном в границах 20°—40°, величина которого зависит от количества тонких пластинок рудных минералов, содержащихся в кристаллах плагиоклазов (фиг. 2, таб. 1).

Имеется и другой род анортозитов, содержащих большее количество рудных минералов. Магнитные свойства этих анортозитов близки некоторым родам норитов (фиг. 3 и 5).

В норитах главным ферромагнитным компонентом, от которого зависят их магнитные свойства, является магнетит или титаномангнетит с точкой Кюри 450°—500°C, но имеются также две фазы гематитово-ильменитового ряда с точками Кюри 60°—130°C, а также около 300°C (фиг. 5).

Ильменитово-магнетитовые руды делятся на два рода по магнитной стабильности, составу и количеству рудных минералов. Магнитные свойства первого рода руд определяются согласно содержанию только одного ферромагнитного компонента — магнетита, в то время, как в другом роде руд кроме магнетита имеется другой главный ферромагнитный компонент — ильменит (фиг. 6 и 7). Ильменитово-магнитные руды, а особенно руды первого рода, в основном намагничены обратно по отношению к существующему земному магнитному полю.

Приведены примеры обратной намагниченности пород и на их основании думается, что причиной обратной намагниченности исследуемых ильменитово-магнетитовых руд может являться самообращение остаточной намагниченности.

Krystyna MIZERACKA, Henryk KURBIEL

RELATION BETWEEN MAGNETIC PROPERTIES AND ROCK COMPOSITION OF THE SUWAŁKI ANORTHOSSITE INTRUSIVE

Summary

Detailed magnetic survey has been made for the rocks of the Suwałki anorthosite massif. The research comprised the measurements of magnetic susceptibility, magnitude and direction of natural magnetic remanence in rock samples, as well as the research of magnetic stability.

The measurements of the magnetic susceptibility of drill cores, and the measurements of magnetic susceptibility and natural magnetic remanence of rock samples taken from drill cores allowed the magnetic differentiation of the rocks in study to be determined (Fig. 1), and the dependence of magnetic susceptibility upon the ore mineral concentration in these rocks to be established (Fig. 4). Moreover, they yielded quantitative data for the interpretation of the magnetic anomalies. The reverse direction of the natural magnetic remanence of the ilmenite-magnetite ores explains the existence of a small magnetic anomaly on the surface.

The research of the magnetic stability, the thermomagnetic analysis, and the microscope examinations gave detailed data as concerns magnetic properties of the rocks under examination, as well as allowed the relation of the magnetic properties of anorthosites, norites and ilmenite-magnetite ores with their mineral composition to be determined.

The research is a basis to ascertain that apart from a low percentage of ore minerals, observed under the microscope as single grains, the type anorthosite of the Suwałki anorthosite massif reveals a considerable thermal magnetic remanence characterized by the positive inclination found to occur between 20° and 40° , the magnitude of which depends upon the amount of thin blades of ore minerals that are found in the plagioclase crystals (Fig. 2, Table 1).

There appears also another kind of anorthosites, distinguishing itself by the greater amount of ore minerals. The magnetic properties of these anorthosites are approximate to some kinds of norites (Fig. 3, Fig. 5).

Magnetite or titaniferous magnetite, characterized by Curie's point amounting to 450°—500°C, is in the norites the main ferromagnetic component deciding upon their magnetic properties. There occur here also two phases of the haematite — ilmenite series with the Curie's point 60°—130°C and approximately 300°C (Fig. 5).

Due to magnetic stability, composition and amount of ore minerals, the ilmenite-magnetite ores have been subdivided into two kinds. The magnetic properties of the first kind are determined by the occurrence of only one ferromagnetic component, i.e. magnetite, whereas the second kind of ores reveals, in addition to the magnetite, also another main ferromagnetic component, i.e. ilmenite (Figs 6 and 7). The ilmenite-magnetite ores, particularly, however, ores of the first kind, are as a rule magnetized contrary to the present-day Earth's magnetic field.

Examples of reverse magnetization of rocks are presented, and this is a basis to suggest that the reverse magnetization of the ilmenite-magnetite ores here examined can be due to the self-reversal of the magnetic remanence.