

REKONESANSOWE BADANIA PODATNOŚCI MAGNETYCZNEJ UTWORÓW PRZYPOWIERZCHNIOWYCH NA WYBRANYCH OBSZARACH POŁUDNIOWEJ POLSKI

Reconnaissance investigations of magnetic susceptibility of subsoil formation in the selected areas in southern Poland

Anna WOJAS¹, Anna ROLIRAT² & Teresa GRABOWSKA¹

¹*Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska,
Katedra Geofizyki; al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;
e-mail: anna.Wojas@agh.edu.pl, tgrabow@geol.agh.edu.pl*

²*CGGVeritas; Oslo Processing Centre, O.H. Bangs vei, 1363 Sandvika, Bærum, Norway;
e-mail: anna_rolirat@wp.pl*

Treść: W artykule przedstawiono wyniki rekonesansowych badań podatności magnetycznej gleb i ochry na wybranych obszarach południowej Polski (Łąki Nowohuckie w Krakowie, okolice Trzebinia, Czerwonki Hermanowskie w pobliżu Rzeszowa). Pomiary podatności wykonywano w terenie i w warunkach laboratoryjnych. Zaobserwowano podwyższoną podatność gleb na terenach poddanych silnej antropopresji (Kraków, Trzebinia). Wykazano, że cząstki żelaza obecne w glebie pochodzą przede wszystkim z emisji miejsko-przemysłowych. Na Łąkach Nowohuckich stwierdzono wyższą podatność gleb w porównaniu z glebami w rejonie Trzebinia. Zróżnicowanie niewysokich podatności gleby w okolicy Trzebinia nie jest związane ze znajdującymi się w podłożu rudami Zn-Pb. Przeprowadzone badania podatności ochry w Czerwonkach Hermanowskich wykazały dość silne jej własności magnetyczne w porównaniu z własnościami otaczającej złoże gleby. Zaobserwowano duże zróżnicowanie podatności ochry związane najprawdopodobniej z jej składem mineralnym i procesami zachodzącymi w złożu. Wykonane na złożu zdjęcie mikromagnetyczne wykazało obecność niewielkich zakłóceń pola magnetycznego (mikroanomaliai).

Słowa kluczowe: podatność magnetyczna, zanieczyszczenie gleby, ochra karpacka, łąki nowohuckie, Trzebinia

Abstract: In the article, the reconnaissance investigations of the magnetic susceptibility of soils and ochre are presented. Field investigations have been performed in southern Poland; namely in the Łąki Nowohuckie area of Krakow, the eastern surroundings of the city of Trzebinia, and the hamlet of Czerwonki near Rzeszów. Laboratory magnetic analyses have been completed. An increase of soil susceptibility has been observed in the studied areas with high anthropopression (Krakow and Trzebinia). It has been proven that iron particles collected in the soil come from urban-industrial emissions. The higher susceptibility of soils in the Łąki Nowohuckie area, than in the vicinity of Trzebinia, has also been affirmed. The diversity of the low values of soil susceptibility in the Trzebinia area is not connected to the Zn-Pb ores which occurred there. The investigations of ochre susceptibility at Czerwonki Hermanowskie have confirmed its quite strong magnetic properties in comparison with properties of the soil situated in a nearby deposit. The large differentiation of ochre susceptibility has been observed. It is probably connected with the mineral composition of ochre and the processes that occurred in the deposit. The ochre deposit slightly disturbs the geomagnetic field (microanomalies) as is shown on the micromagnetic anomaly map.

Key words: magnetic susceptibility, soil pollution, Carpathian ochre, Łąki Nowohuckie, Trzebinia

WSTĘP

W pracy przedstawiono wyniki badań podatności magnetycznej utworów przypowierzchniowych, pochodzących z trzech regionów południowej Polski. Podatność magnetyczna, będąca podstawowym parametrem magnetycznym minerałów i skał, uważana jest za jeden ze wskaźników zanieczyszczenia gleby. Badaniami objęto obszary poddane silnej antropopresji, do których należy zaliczyć aglomerację krakowską i okolice Trzebini. Wykonano również pomiary podatności utworów przypowierzchniowych na obszarze pozbawionym zanieczyszczeń. Do takich miejsc należy zaliczyć rejon Czerwonek Hermanowskich, gdzie występuje złożo ochry. Przeprowadzono tam także pomiary pola magnetycznego Ziemi.

Pomiary podatności były prowadzone w terenie i w warunkach laboratoryjnych, przy użyciu powszechnie stosowanego urządzenia, jakim jest aparatura MS2 firmy Bartington. Wyniki badań zostały przedstawione w formie wykresów, tabel, map i zdjęć.

HISTORIA BADAŃ PODATNOŚCI MAGNETYCZNEJ GLEB

Badania podatności magnetycznej gleb zostały zapoczątkowane w drugiej połowie XX wieku. Ważną rolę w tym zakresie odegrały prace R. Thompsona i F. Oldfielda nad podatnością magnetyczną warstwy glebowej wokół ośrodków przemysłowych środkowej i północnej Anglii (Thompson & Oldfield 1986). Badania te udowodniły, że podatność magnetyczna może być ważnym wskaźnikiem zanieczyszczenia gleby, istotnym w ocenie stanu środowiska.

W Polsce pierwsze pomiary podatności magnetycznej gleb zostały wykonane w drugiej połowie lat 80. na obszarze Górnego Śląska. Prace przeprowadzone przez Z. Strzyszcza (Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska PAN w Zabrze) objęły oprócz aglomeracji Katowic rejony Opola, Bielska-Białej, Częstochowy (Strzyszc 1989, 1993, Heller *et al.* 1998) oraz rejony kilku parków narodowych, zlokalizowanych w różnych regionach Polski (Strzyszc 1991, Magiera & Strzyszc 2000). Przeprowadzone badania wykazały znaczący wpływ depozycji zanieczyszczeń przemysłowych na wartości podatności magnetycznej gleb. Podwyższone podatności obserwuje się w górnych partiach gleby, a mianowicie w podpoziomach fermentacyjnym O_f i humicznym O_h , penetrowanych przez korzenie roślin (Fig. 1). Jak wykazały analizy chemiczne próbek gleb pobranych z podpoziomów O_f i O_h , podwyższonej podatności magnetycznej towarzyszy wzrost zawartości metali ciężkich: cynku, ołowiu oraz kadmu (Strzyszc 1993).

Zanieczyszczenia przemysłowe emitowane do atmosfery (aerozole, pyły i popioły lotne) zawierają w swoim składzie mineralnym m.in. związki żelaza, takie jak: magnetyt, hematyt, wüstyt, melanteryt, syderyt, ilesyt i oliwin (Manecki & Marszałek 1993). Na podstawie przeprowadzonych badań geochemicznych popiołów lotnych stwierdzono, że metale ciężkie mogą być zarówno wprowadzane w obręb struktury krystalograficznej cząstek magnetytu, jak i adsorbowane na jego powierzchni (Magiera *et al.* 2002). Ze względu na fakt, że w cząstkach pyłów przemysłowych znajdują się ferromagnetyki i związane z nimi metale ciężkie, istnieje zależność pomiędzy podatnością magnetyczną gleb i metalami ciężkimi zawartymi w pyłach przemysłowych (Strzyszc 1993, Heller *et al.* 1998).

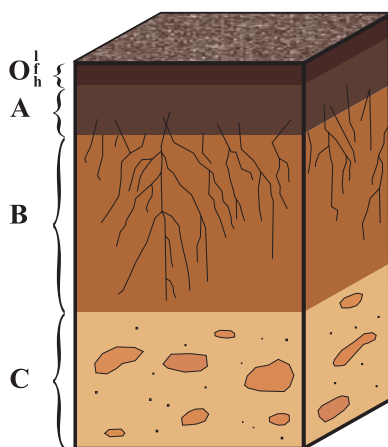


Fig. 1. Schemat profilu gleby brunatnej. Poziomy główne: O – poziom organiczny, A – poziom próchniczny, B – poziom wzbogacania, C – poziom skały macierzystej. Podpoziomy pierwszego horyzontu: O_l – ściółka, O_f – podpoziom fermentacyjny, O_h – podpoziom humiczny

Fig. 1. Scheme of brown soil profile. Master horizons: O – organic horizon, A – topsoil horizon, B – accumulation horizon, C – parent material. Sub-horizons in the first horizon: O_l – litter sub-horizon, O_f – fermentation sub-horizon, O_h – humic sub-horizon

Na uwagę zasługują badania podatności magnetycznej próbek gleb pobranych z początkiem lat 90. do badań geochemicznych (Lis & Pasiczna 1995). Opróbowanie przeprowadzono na obszarach rolniczo-leśnych w siatce 5 × 5 km i 2 × 2 km na terenach aglomeracji miejskich i przemysłowych. Próbki gleby pochodziły z przedziału głębokości od 0 do 20 cm. Wykonane badania podatności magnetycznej próbek gleb pozwoliły na skonstruowanie pierwszej mapy podatności magnetycznej (mapy kappametrycznej) gleb Polski (Magiera *et al.* 2002).

Ważną rolę należy również przypisać badaniom magnetycznym gleby przeprowadzonym w latach 1999–2000 w ramach międzynarodowego projektu MAGPROX. Przeprowadzone wówczas pomiary umożliwiły wykonanie mapy kappametrycznej obrazującej m.in. obszar południowo-zachodniej Polski. Pomiary podatności magnetycznej były wykonywane w tym przypadku *in situ*, przy użyciu aparatury MS2 angielskiej firmy Bartington, w sieci punktów pomiarowych 10 × 10 km, a także na rdzeniach obejmujących przekrój gleby do głębokości 30 cm. Wyniki badań potwierdziły wzrost podatności magnetycznej górnych partii gleby oraz związek między podatnością gleby i zanieczyszczeniem metalami ciężkimi (Zn, Pb) (Magiera *et al.* 2006).

KRÓTKA CHARAKTERYSTYKA WŁASNOŚCI MAGNETYCZNYCH GLEBY

Gleba powstaje w strefie hipergenezy – wierzchniej części skorupy, w której pod wpływem procesów egzogenicznych (takich, jak wietrzenie, erozja, transport, denudacja, rekrytalizacja minerałów na powierzchni skał itp.) następują fizykochemiczne zmiany

w minerałach i skałach. Tworzenie się gleby zachodzi w wyniku wietrzenia skał macierzystych, a następnie w efekcie przekształcania się utworzonej zwietrzliny przy aktywnym udziale roślinności i pozostałych czynników glebotwórczych. Gleba jest więc produktem wzajemnego oddziaływania lito-, atmo-, hydro- i biosfery (Bednarek & Prusinkiewicz 1999).

Własności magnetyczne gleby są źródłem zazwyczaj bardzo słabych anomalii magnetycznych (mikroanomalii), rzędu 2–5 nT. Bardzo ważnym czynnikiem decydującym o własnościach magnetycznych gleby jest rodzaj skały macierzystej. Gleby powstające w wyniku wietrzenia skał magmowych mają wyższą podatność magnetyczną niż gleby powstałe z piaskowców, wapieni, łupków itp.

Podatność magnetyczna utworów przypowierzchniowych zależy od obecności minerałów ferrimagnetycznych, np. magnetytu, maghemitu, greigitu. Obecność w glebie tych minerałów, zwanych minerałami środowiskowymi (Evans & Heller 2003), może być z jednej strony wynikiem działalności człowieka (wypalanie traw, emisje przemysłowe, emisje z palenisk domowych, spaliny samochodowe itd.), a z drugiej strony – wynikiem naturalnych procesów fizykochemicznych zachodzących w glebie (takich, jak naturalne pożary lasów i torfowisk, wietrzenie minerałów zawierających żelazo, bakterie).

W południowej Polsce, w której znajdują się obszary niżej zaprezentowanych badań podatności magnetycznej, występują przede wszystkim gleby brunatnoziemne (gleby brunatne właściwe, gleby brunatne kwaśne i gleby płowe) rozwinięte na utworach akumulacji eolicznej – lessach i utworach lessopodobnych (Musierowicz 1961, Bednarek & Prusinkiewicz 1999). Lokalnie pojawiają się strefy koncentracji ochr, które mogą być związane z powstawaniem hydrohematytu i goethytu bądź z drobnookruchowymi domieszkami pochodzącymi z wietrzenia serii fliszowych (Kicińska-Świdarska & Łasak 2005).

APARATURA DO POMIARU PODATNOŚCI MAGNETYCZNEJ

Podatność magnetyczna jest podstawowym parametrem określającym własności magnetyczne materii, odgrywającym obecnie bardzo ważną rolę w badaniach środowiska naturalnego.

Badania podatności magnetycznej prowadzone dla celów środowiskowych można wykonywać *in situ* lub metodą laboratoryjną. W obu przypadkach najczęściej stosowanym urządzeniem jest aparatura MS2 firmy angielskiej Bartington.

Przy pomiarach podatności *in situ* mierzona jest tzw. pozorna podatność magnetyczna. W warunkach laboratoryjnych przy użyciu aparatury MS2 wykonuje się pomiary podatności magnetycznej objętościowej wyrażonej wzorem

$$\kappa = \frac{M}{V \cdot H} \quad (1)$$

gdzie:

- κ – objętościowa podatność magnetyczna [–],
- M – moment magnetyczny [$A \cdot m^2$],
- V – objętość [m^3],
- H – natężenie pola magnetycznego [$A \cdot m^{-1}$].

Objętościową podatność magnetyczną przelicza się na podatność magnetyczną masową określoną wzorem (2). Podatność masowa jest powszechnie wykorzystywana w praktyce do charakteryzowania własności magnetycznych próbek sypkich, w tym gleb

$$\chi = \frac{\kappa}{\rho} \quad (2)$$

gdzie:

χ – masowa podatność magnetyczna [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$],

κ – objętościowa podatność magnetyczna [-],

ρ – gęstość objętościowa próbki [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Pomiary podatności magnetycznej *in situ* aparaturą MS2 wykonuje się przy użyciu czujników (MS2D, MS2F – Fig. 1), które pozwalają na penetrację ośrodka (gleby) do głębokości ok. 6 cm (Bartington Instruments LTD 1999).

W warunkach laboratoryjnych do pomiarów podatności magnetycznej próbek wykorzystuje się czujnik MS2B, natomiast do pomiaru rdzeni o średnicach 45–160 mm czujnik MS2C (Fig. 2).

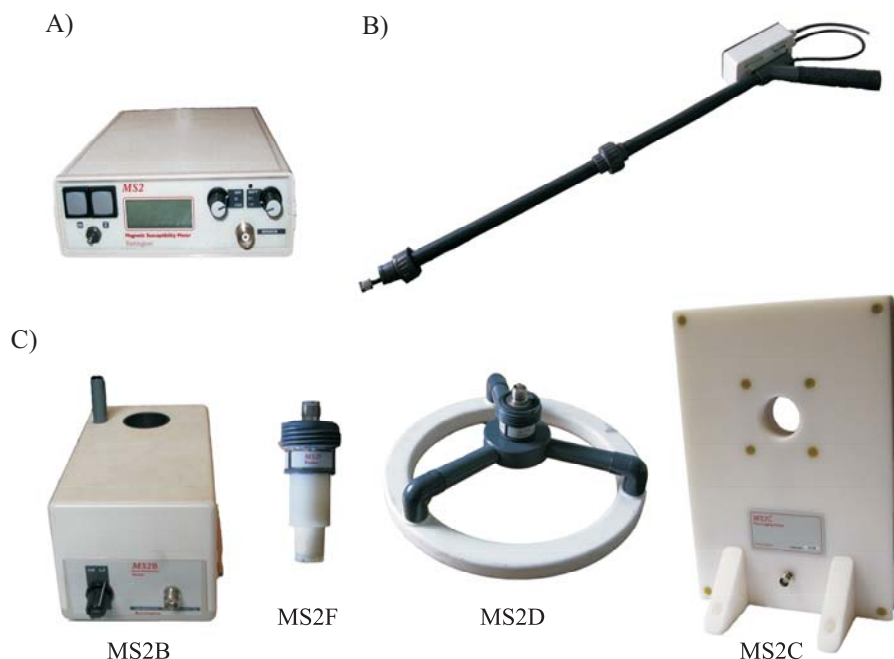


Fig. 2. Aparatura MS2 firmy Bartington: A) urządzenie pomiarowe; B) uchwyt przeznaczony do mocowania czujników MS2F i MS2D; C) czujniki (fot. A. Wojas)

Fig. 2. MS2 instrument (Magnetic Susceptibility System) produced by Bartington Company: A) measuring device; B) handle to MS2C and MS2F sensors; C) sensors (phot. A. Wojas)

Czujnik MS2B umożliwia pomiar podatności przy dwóch różnych częstotliwościach (4.65 i 0.465 kHz), co pozwala na obliczenie częstotliwościowej zależności podatności magnetycznej, zwanej również częstotliwościowym współczynnikiem podatności f_d

$$f_d = \frac{\kappa_{lf} - \kappa_{hf}}{\kappa_{lf}} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:

- κ_{lf} – objętościowa podatność magnetyczna mierzona przy niskiej częstotliwości,
- κ_{hf} – objętościowa podatność magnetyczna mierzona przy wysokiej częstotliwości.

Na podstawie współczynnika f_d można określić pochodzenie cząstek magnetycznych. Współczynnik f_d powyżej 3–6% oznacza, że w glebie mogą występować bardzo małe cząstki (poniżej 0.01 μm) pochodzenia naturalnego o bardzo silnych właściwościach magnetycznych, zwane superparamagnetykami (Magiera *et al.* 2002, Evans & Heller 2003, Jeleńska *et al.* 2008). W przypadku magnetytu i hematytu w normalnej temperaturze są to ziarna o średnicy poniżej 0.03 μm (Lowrie 1997, Magiera 2004). Natomiast kiedy wartość współczynnika f_d jest niższa od 3–6%, przyjmuje się, że cząstki magnetyczne są pochodzenia antropogenicznego (Magiera *et al.* 2002, Evans & Heller 2003).

REKONESANSOWE BADANIA PODATNOŚCI MAGNETYCZNEJ GLEB NA WYBRANYCH OBSZARACH POŁUDNIOWEJ POLSKI

Prezentowana praca jest wynikiem rekonesansowych badań podatności magnetycznej gleb, przeprowadzonych w rejonach poddanych silnej antropopresji (Kraków i okolice Trzebini) oraz na obszarze, gdzie można się spodziewać minimalnych zanieczyszczeń pochodzenia antropogenicznego.

Przykładem obszaru poddanego silnej antropopresji jest aglomeracja krakowska. Pomiar podatności magnetycznej gleb wykonano w tym przypadku na obszarze Łąk Nowohuckich, znajdujących się w odległości ok. 1 km na południe od centrum Nowej Huty. Według badań przeprowadzonych dla Wydziału Gospodarki Komunalnej i Ochrony Środowiska Urzędu Miasta Krakowa (Walasz 2004) w rejonie tym występują gleby bagienne i pobagienne, zwane glebami hydrogenicznymi. Tworzyły się one w wilgotnej dolinie z ilów piaszczystych, mułów i namułów organiczno-gliniastych, zalegających na wodonosnych piaskach i żwirach, przy udziale roślinności torfowiskowej i bagiennej (Walasz 2004).

Drugim obszarem, na którym wykonano pomiary podatności magnetycznej gleb, są wschodnie okolice Trzebini. Badaniami objęto występujące tam gleby brunatnoziemne znajdujące się na terenach dawnej eksploatacji rud Zn-Pb.

Trzecim obszarem, na którym przeprowadzono badania podatności magnetycznej, był rejon Czerwonek Hermanowskich. Hermanowa znajduje się 12 km na południe od Rzeszowa. W tym przypadku badania podatności dotyczyły pokrywy ochronnej, utworzonej z wietrzenia trzeciorzędowych skał osadowych (łupki, rogowce, margle, piaskowce, mułowce), należących do jednostki skolskiej (Kotlarczyk & Ratajczak 2002).

Gleby hydrogeniczne na terenach użytku ekologicznego „Łąki Nowohuckie” w Krakowie

W glebach aglomeracji krakowskiej występują podwyższone zawartości cynku, ołowiu, a miejscami również miedzi, kadmu i rtęci (Lis & Pasieczna 1995, Pasieczna 2003). Obserwuje się tutaj także dość wysokie wartości podatności magnetycznej gleb (powyżej $100 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) (Magiera *et al.* 2002, Magiera 2004).

Badania podatności magnetycznej przeprowadzono w rejonie Nowej Huty, na terenie użytku ekologicznego „Łąki Nowohuckie”, znajdującego się w odległości 7 km na wschód od centrum Krakowa.

Występują tam gleby glejowo-mułowe, glejowe, torfowe, gleby torfowisk niskich nadrzecznych, murszowe i mady rzeczne (Walasz 2004), zaliczane do gleb hydrogenicznych. Zostały one wykształcone na niemagnetycznym podłożu zbudowanym z holocenijskich mułków, glin i piasków.

Profil glebowy na obszarze Łąg Nowohuckich jest nienaruszony z powodu braku planu zagospodarowania tego terenu i obowiązującej od 2003 r. ochrony prawnej. Dzięki temu zanieczyszczenia pochodzące z ostatnich deponycji pyłów znajdują się w najbardziej przypowierzchniowym horyzoncie gleby.

Gleby omawianego obszaru, według badań geochemicznych wykonanych przez Pasieczną (2003), są w dużym stopniu pozbawione zanieczyszczeń. Przeprowadzone analizy nie wykryły przekroczenia progowych wartości zawartości metali ciężkich. Natomiast w niewielkiej odległości od terenu Łąg, w okolicach dawnej Huty im. T. Sendzimira (obecnie firma Mittal Steel Poland), występuje obszar o koncentracji cynku w glebach do 3664 mg/kg, wyrażonej poprzez silną anomalię geochemiczną (Fig. 3).

Na podatność gleb Łąg Nowohuckich może wpływać nie tylko opad pyłów pochodzących z emisji huty Mittal. Ważną rolę również mogą pełnić emisje pyłów z elektrociepłowni (EC Kraków), znajdującej się na południowy zachód od Łąg oraz zanieczyszczenia miejskie (tj. kotłownie, paleniska domowe, ruch drogowy itp.).

Na obszarze tym może zachodzić również deponycja pyłów przemysłowych pochodzących z Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego (Pasieczna 2003).

Badania podatności magnetycznej gleb na Łągach Nowohuckich przeprowadzono czujnikiem MS2D („pętla”) (Fig. 2). Pomiaru pozornej podatności wykonano na 630-metrowym profilu o kierunku SSW-NNE, stosując 10-metrowy krok pomiarowy. Wyniki pomiarów przedstawiono na wykresie (Fig. 4).

Wyraźny wzrost podatności magnetycznej gleb obserwuje się w miarę zbliżania się do placu Centralnego w Nowej Hucie (Fig. 4). Pomierzone wartości podatności mieszczą się w granicach $(27-138) \cdot 10^{-5} \text{ SI}$.

Oprócz badań *in situ*, w Pracowni Petrofizyki Katedry Geofizyki (WGGiOŚ AGH) wykonano pomiary laboratoryjne 10 próbek gleb, pobranych w wybranych miejscach na profilu, z głębokości 0–5 cm i 15–20 cm.

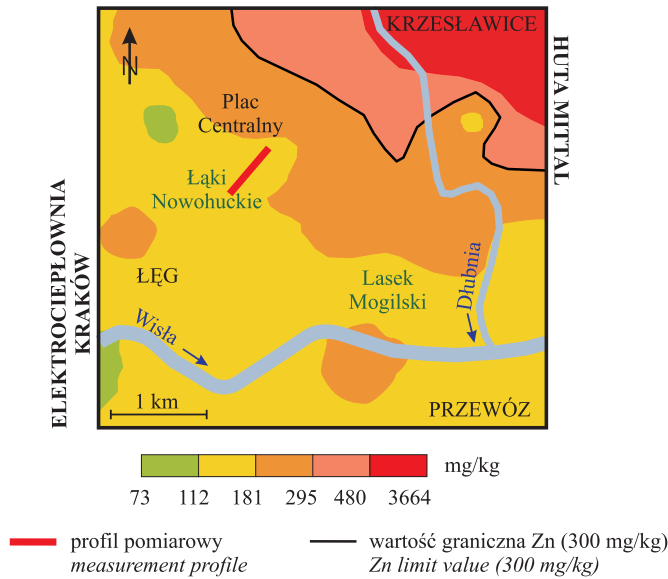


Fig. 3. Profil pomiarowy na tle mapy geochemicznej zawartości cynku w glebach (Pasiczna 2003, zmodyfikowane)

Fig. 3. Measurement profile on geochemical map of zinc content in soils (Pasiczna 2003, modified)

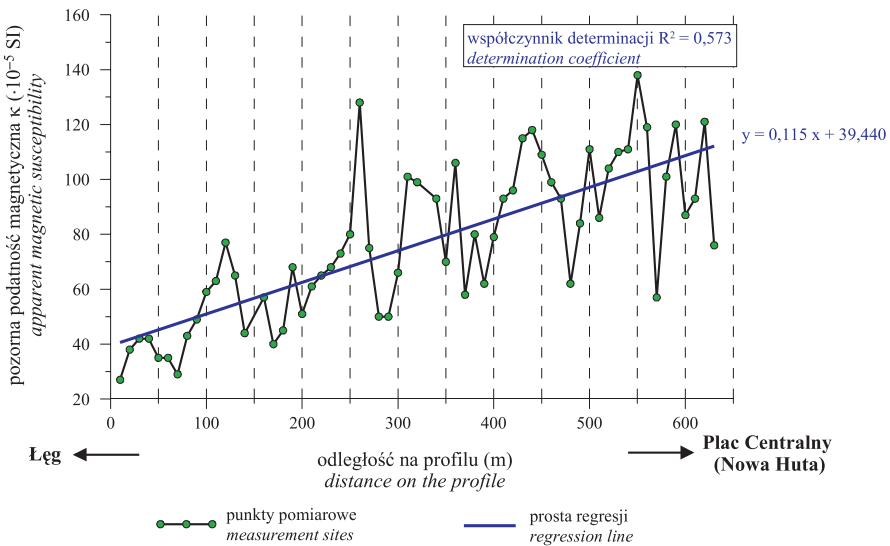


Fig. 4. Wykres pozornej podatności magnetycznej gleb wzdłuż profilu pomiarowego na Łąkach Nowohuckich (Zagrodzka 2008)

Fig. 4. Apparent magnetic susceptibility of soils along measurement profile in Łąki Nowohuckie area (Zagrodzka 2008)

Otrzymane wyniki pomiarów, wykonanych przy zastosowaniu dwuczęstotliwościowego czujnika MS2B, poprawiono według wzoru (4) (Dearing 1994, zmodyfikowany), a następnie przeliczono na podatność magnetyczną masową

$$\kappa_{popr} = \kappa_p - \frac{(\kappa_{pp} + \kappa_{hdp})}{2} \quad (4)$$

gdzie:

- κ_{popr} – poprawiona wartość podatności magnetycznej,
- κ_p – pomierzona podatność magnetyczna próbki gleby,
- κ_{pp} – podatność magnetyczna pustego czujnika, przed pomiarem podatności próbki,
- κ_{dp} – podatność magnetyczna pustego czujnika, po pomiarze podatności próbki.

Próbki gleb pochodzące z przypowierzchniowej warstwy gleby w porównaniu z próbkami pobranymi na większej głębokości mają wyższą podatność magnetyczną (Tab. 1). Masowa podatność magnetyczna próbek gleb pochodzących spod korzeni roślin wynosi ok. $(80-420) \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, a próbek gleb z głębokości 15–20 cm mieści się w granicach $(70-250) \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$.

Tabela (Table) 1

Masowa podatność magnetyczna próbek gleb pobranych na obszarze Łąki Nowohuckich

Mass magnetic susceptibility of soil samples collected in Łąki Nowohuckie area

Nr próbki Sample no.	Masowa podatność magnetyczna próbek gleb χ ($\cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) <i>Mass magnetic susceptibility of the soil samples</i>	
	z głębokości 0–5 cm (A) <i>from 0–5 cm depth (A)</i>	z głębokości 15–20 cm (B) <i>from 15–20 cm depth (B)</i>
1	350	168
2	414	248
3	322	215
4	83	74
5	121	93

Wartości podatności magnetycznej masowej próbek gleb wskazują na zanieczyszczenie gleb Łąki Nowohuckich (Tab. 2).

Tabela (Table) 2

Masowa podatność magnetyczna (Magiera *et al.* 2002)

Mass magnetic susceptibility (Magiera et al. 2002)

Masowa podatność magnetyczna / <i>Mass magnetic susceptibility</i>	
wartości niskie / <i>low values</i>	$\chi < 20 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
wartości podwyższone / <i>increased values</i>	$20 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} < \chi < 100 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
wartości wysokie / <i>high values</i>	$\chi > 100 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$

Obliczone wartości częstotliwościowego współczynnika podatności f_d próbek gleb są niskie i mieszczą się w granicach 0–1%, co może świadczyć o występowaniu w glebie cząstek magnetycznych pochodzenia antropogenicznego. Przykładem takich cząstek mogą być cząstki magnetytu powstającego w wyniku złożonego procesu, którego schemat został przedstawiony na figurze 5. Mianowicie w trakcie spalania węgla obecny w nim piryt (FeS_2) ulega dysocjacji, tworząc pirotyn (Fe_7S_8) i gaz siarkowy. W temperaturze ponad ok. 1350 K pirotyn się rozkłada, co powoduje pojawienie się siarki i cząstek żelaza, które następnie ulegają utlenianiu i przechodzą w magnetyt (Fe_3O_4). Cząstki magnetytu mają kształt kulisty i zwane są sferulami (Evans & Heller 2003).

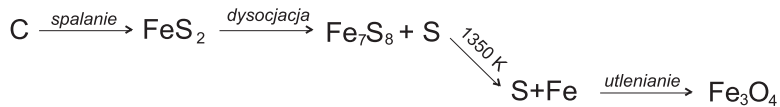


Fig. 5. Schemat powstawania magnetytu pochodzenia antropogenicznego

Fig. 5. Scheme of anthropogenic magnetite formation

Duże prawdopodobieństwo występowania w próbkach gleb cząstek magnetytu stwierdzono również na podstawie przeprowadzonych badań pozostałości magnetycznej (izotermicznej IRM i bezhisterezowej ARM) oraz analiz termomagnetycznych. Obecność tego minerału potwierdziły również zdjęcia skaningowym mikroskopem elektronowym (SEM), na których ziarna magnetytu występują w formie sferul (Fig. 6). Sferule żelaziste powstające głównie w procesie spalania paliw stałych (Strzyszc *et al.* 1998) wskazują na antropogeniczne pochodzenie magnetytu w glebie.

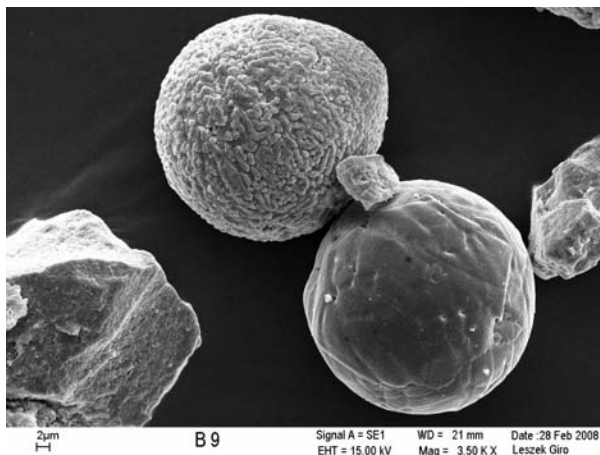


Fig. 6. Zdjęcie separatu magnetycznego próbki 2B zrobione przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) (fot. L. Giro)

Fig. 6. The SEM (scanning electron microscope) image of magnetic extract come from sample 2B (phot. L. Giro)

Gleby brunatnoziemne na obszarach eksploatacji rud Zn-Pb w rejonie Trzebini

Gleby okolic Trzebini są w poważnym stopniu zanieczyszczone metalami ciężkimi (Sass-Gustkiewicz *et al.* 2001). Alarmujące wyniki badań przeprowadzonych na tym obszarze są przedstawione w licznych pracach, obejmujących zarówno badania geochemiczne, jak i magnetyczne. Skazanie gleb metalami ciężkimi widoczne jest m.in. na mapach geochemicznych gleb Górnego Śląska (Lis & Pasieczna 1995), a także na mapie kappametrycznej gleb Polski (Magiera *et al.* 2002).

Badania geochemiczne gleb w rejonie olkuskim i chrzanowskim, przeprowadzone w ramach polsko-amerykańskiego projektu badawczego, w siatce punktów pomiarowych 1×1 km, wykazały znaczne przekroczenie dopuszczalnych zawartości w glebach metali ciężkich, m.in.: Zn, Pb, Cd, As i Tl (Sass-Gustkiewicz *et al.* 2001). Zauważono, że metale dostają się do gleb w wyniku procesu wietrzenia podścielających skał (wychodni płonnych i zmineralizowanych dolomitów kruszczośnych, hałd pogórnicych). Są to pierwiastki główne i pierwiastki towarzyszące górnos Śląskich rud siarczkowych, w których występują m.in. markasyt i piryt (siarczki żelaza), sfaleryt oraz galena. Stwierdzono również (Sass-Gustkiewicz *et al.* 2001), że podwyższone zawartości metali ciężkich w warstwie przypowierzchniowej tego rejonu spowodowane są nie tylko zachodzącymi w niej naturalnymi procesami glebotwórczymi, ale także związane są z depozycją zanieczyszczeń pochodzących z zakładów przemysłowych, osadników, hałd metalurgicznych i górniczych.

Badania podatności magnetycznej gleb przeprowadzono na wschód od Trzebini, na terenie historycznych miejsc eksploatacji i przeróbki rud Zn-Pb: Nowej Góry, Ostreżnicy, Lgoty, Góry Galman, Płoków, Myślachowic i Psarów (Fig. 7). Na obszarze tym w podłożu znajdują się dolomity kruszczośne, wapienie triasowe i jurajskie.

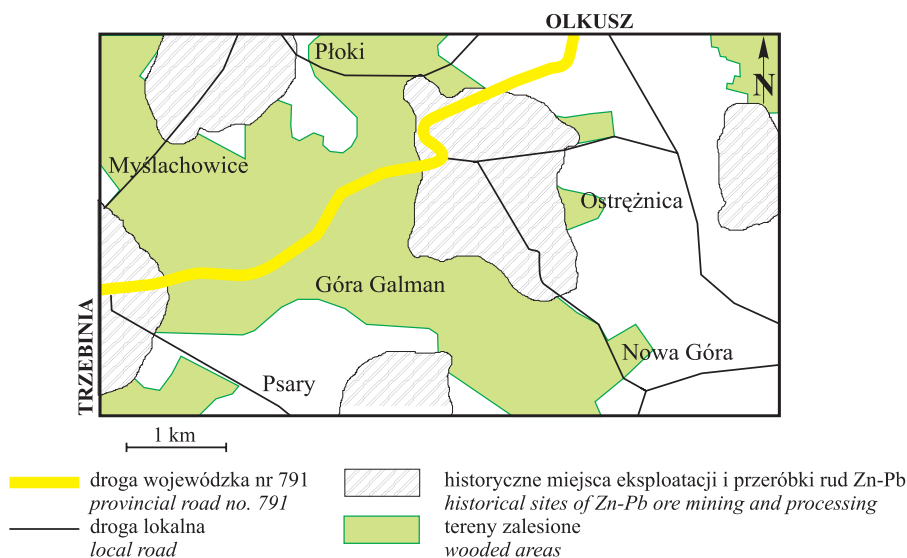


Fig. 7. Mapa lokalizacji badanego obszaru

Fig. 7. Location map of the studied area

Wyniki pomiarów wykonanych przy użyciu czujnika MS2D przedstawiono w formie mapy kappametrycznej (Fig. 8A na wklejce). Pomierzone wartości podatności mieszczą się w granicach $(16\text{--}127)\cdot 10^{-5}$ SI. Obserwuje się wzrost podatności magnetycznej gleby w miarę przesuwanie się w kierunku zachodnim, tj. w stronę Trzebinia.

Przedstawiona na figurze 8C mapa współczynnika degradacji gleb głębszego poziomu, tj. poziomu wzbogacania B, wskazuje na znacząco podwyższoną zawartość metali ciężkich (w tym przypadku Zn, Pb, Cd, As i Tl), która prawdopodobnie związana jest z procesami fizykochemicznymi obejmującymi występujące poniżej rudy siarczkowe.

Przeprowadzone pomiary kappametryczne na tym obszarze nie wykazują podwyższonej podatności magnetycznej gleby. Brak skażenia utworów przypowierzchniowych znajduje potwierdzenie na mapie współczynnika degradacji gleb poziomu A (Fig. 8B). Dokładniejsza analiza danych pomiarowych pozwala stwierdzić, że podwyższona podatność magnetyczna prawdopodobnie jest efektem depozycji zanieczyszczeń pochodzących z zakładów przemysłowych i palenisk domowych z miasta Trzebinia.

Wykonano również badania laboratoryjne (Pracownia Petrofizyki Katedry Geofizyki, WGGiOŚ AGH) podatności magnetycznej próbek gleb, pobranych z głębokości ok. 5 cm w miejscach przedstawionych na figurze 9. Wyznaczona masowa podatność magnetyczna próbek gleb waha się w granicach $(13\text{--}76)\cdot 10^{-8}$ $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ (Fig. 9).

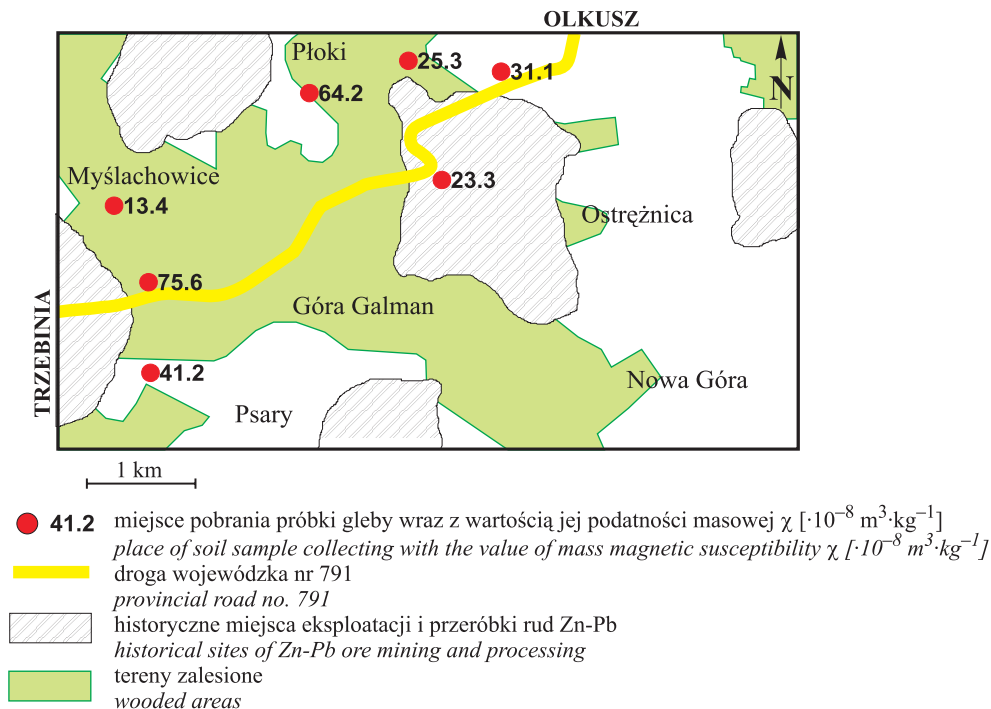


Fig. 9. Miejsca pobrania próbek gleb wraz z ich podatnością magnetyczną masową

Fig. 9. Samples area with the mass magnetic susceptibility values of soil samples

Obliczone wartości współczynnika f_d dla większości badanych próbek są niskie i wynoszą poniżej 4%, co może wskazywać na antropogeniczne pochodzenie zawartych w glebie cząstek magnetycznych.

Złoże ochry w Czerwonkach Hermanowskich koło Rzeszowa

Ochry są ziemistymi odmianami tlenkowych i wodorotlenkowych minerałów żelaza (Bolewski & Manecki 1993). Barwa ochry zależy od minerału występującego w niej w przeważającej ilości. Przykładowo goethyt barwi ochrę na żółto, hematyt na czerwono, natomiast tlenki manganu powodują ciemne zabarwienie ochry (Kotlarczyk & Ratajczak 2002).

Złoże ochry występujące w Czerwonkach Hermanowskich (Fig. 10) zostało rozpoznane przez J. Kotlarczyka i T. Ratajczaka w latach 1996, 2002 (Kotlarczyk & Ratajczak 2002). Ochra karpacka tworzyła się tam w strefie hipergenezy obejmującej warstwy menilitowe bogate w siarczki żelaza, a niekiedy także w glaukonit. Powstanie złoża nastąpiło w wyniku nagromadzenia, przyniesionych przez wody w formie roztworów i soli, wodorotlenków żelaza i siarczanów – minerałów wtórnych siarczków żelaza, które powstały w procesie wietrzenia wyżej występujących skał.



Fig. 10. Fragment stoku wzgórza z pokrywą ochrową w Czerwonkach Hermanowskich (fot. A. Rolirat)

Fig. 10. Part of the hill slope with ochre cover at Czerwonki Hermanowskie (phot. A. Rolirat)

Na mapie geologicznej obszaru badań (Kotlarczyk & Ratajczak 2002) (Fig. 11B) zostały wydzielone strefy występowania różnych odmian kolorystycznych ochry – od żółtej, poprzez żółtobrazową, rdzawą, ciemnobrazową do czerwonej.

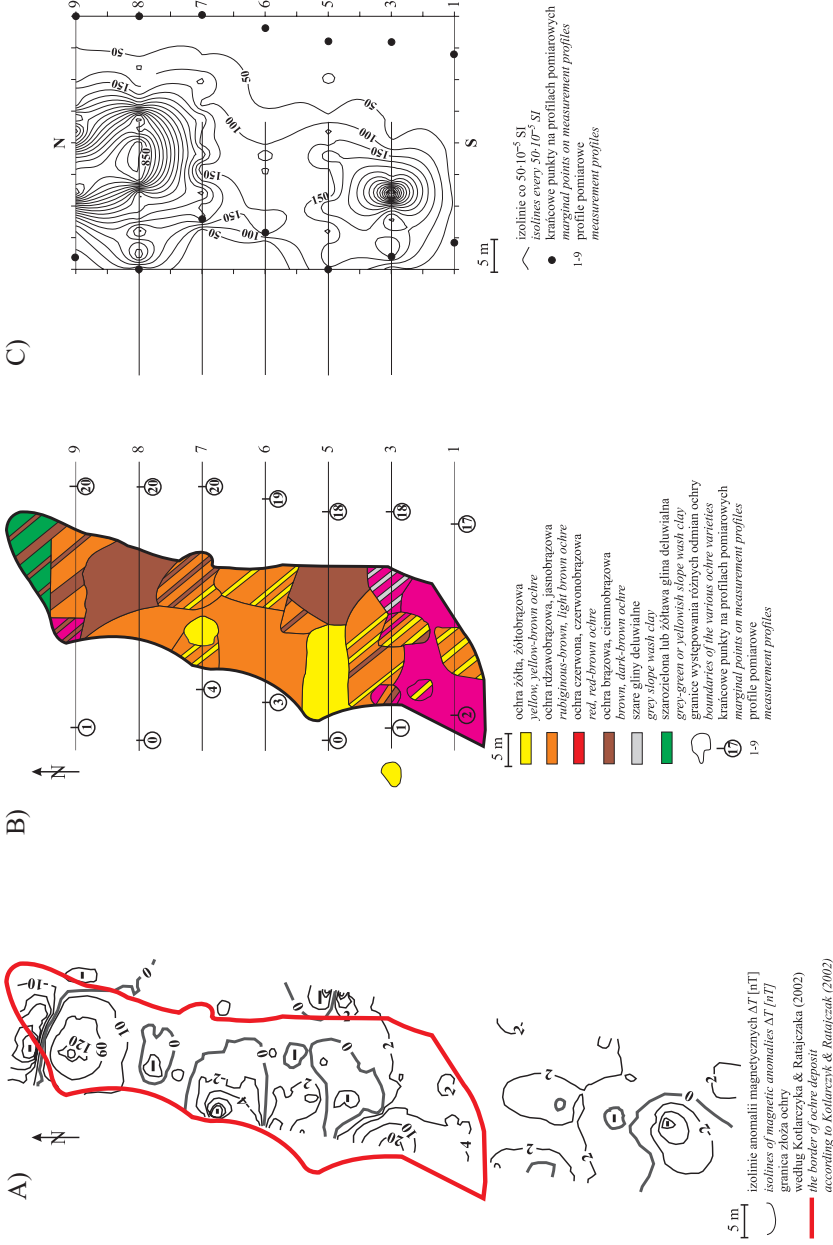


Fig. 11. Mapa anomalii magnetycznych ΔT badanego obszaru (Rolirat 2006, zmodyfikowane) (A); mapa rozmieszczenia odmian ochry (Kotlarczyk & Ratajczak 2002, zmodyfikowane) (B); mapa kappametryczna złoża ochry (Rolirat 2006, zmodyfikowane) (C)

Fig. 11. The map of magnetic anomalies ΔT in studied area (Rolirat 2006, modified) (A); the map of places with different ochre varieties (Kotlarczyk & Ratajczak 2002, modified) (B); the kappametric map of the ochre deposit (Rolirat 2006, modified) (C)

W miejscu występowania ochry wykonano pomiary całkowitego pola magnetycznego Ziemi (T) przy użyciu magnetometru protonowego ENVI MAG (firma Scintrex, Kanada). Stwierdzono obecność mikroanomalii o wartościach nieprzekraczających 30 nT (Fig. 11A).

Wyjątkiem jest tutaj silna anomalia magnetyczna dochodząca do 150 nT, występująca w północnej części badanego obszaru (Fig. 11A). Źródła tej anomalii nie są znane. Może być ona wynikiem działalności ludzkiej (zakopane przedmioty żelazne?) lub posiadać związek z obiektem pochodzenia naturalnego.

Do pomiarów pozornej podatności magnetycznej *in situ* użyto czujnika MS2F, który umożliwia bezpośredni kontakt przyrządu z badanym ośrodkiem. Pomiarów dokonano wzdłuż siedmiu linii przekrojów geologicznych zamieszczonych w pracy Kotlarczyka & Ratajczaka (2002). Odległość między punktami pomiarowymi na profilach wynosiła 2 m. Profile o średniej długości 40 m przebiegały ze wschodu na zachód w odległości 10 m od siebie.

Na podstawie pomierzonej w terenie pozornej podatności magnetycznej skonstruowano mapę kappametryczną (Fig. 11C). Jak wynika z porównania map geologicznej i kappametrycznej (Fig. 11B, C) największe wartości podatności odpowiadają ochrze brązowej (ok. $(200-900) \cdot 10^{-5}$ SI) (północno-zachodnia część złoża). W przypadku ochry żółtej i rdzawej wartości podatności magnetycznej są niższe i mieszczą się w przedziale od 60 do $200 \cdot 10^{-5}$ SI. Duże zróżnicowanie podatności magnetycznej ochry obok jej składu chemicznego (wg Kotlarczyka & Ratajczaka (2002) ochra brązowa ma najwięcej Fe_2O_3) jest spowodowane również procesami fizykochemicznymi, do których należy zaliczyć m.in. proces zaglinienia obniżający podatność magnetyczną.

Zestawiono również profile kappametryczne wraz z przekrojami geologicznymi (jeden z nich przedstawiono na figurze 12). Na tle niskich podatności, rzędu $(40-60) \cdot 10^{-5}$ SI, charakteryzujących glebę pozbawioną pokrywy ochrowej, pojawiają się podwyższone podatności magnetyczne, odpowiadające miejscom występowania ochry (Fig. 11C, 12).

Oprócz wykonania badań *in situ* pomierzono objętościową podatność magnetyczną 31 próbek ochry, pobranych bezpośrednio spod ściółki. Pomiary te wykonano w Pracowni Petrofizyki Katedry Geofizyki WGGiOŚ AGH, przy użyciu dwuczęstotliwościowego czujnika MS2B.

W przypadku większości badanych próbek otrzymano wysokie wartości częstotliwościowego współczynnika podatności f_d , sięgające 11% (Tab. 3). Tak duża wartość współczynnika może świadczyć o obecności w próbkach superparamagnetyków posiadających istotny wpływ na wartość podatności próbek.

Ponadto została wyznaczona masowa podatność magnetyczna wszystkich badanych próbek (Tab. 3), która mieści się w bardzo szerokim przedziale $(13-1016) \cdot 10^{-8}$ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$. Podobnie jak w przypadku podatności pozornej, najwyższa podatność masowa charakteryzuje ochrę o barwie brązowej, nieco niższa ochrę żółtą i rdzawą.

Niewątpliwym wpływem na podwyższenie podatności magnetycznej mają występujące w ochrze tlenki żelaza, które stanowią jeden z najważniejszych składników różnych odmian ochry i żelu hydroferytowego (Kotlarczyk & Ratajczak 2002).

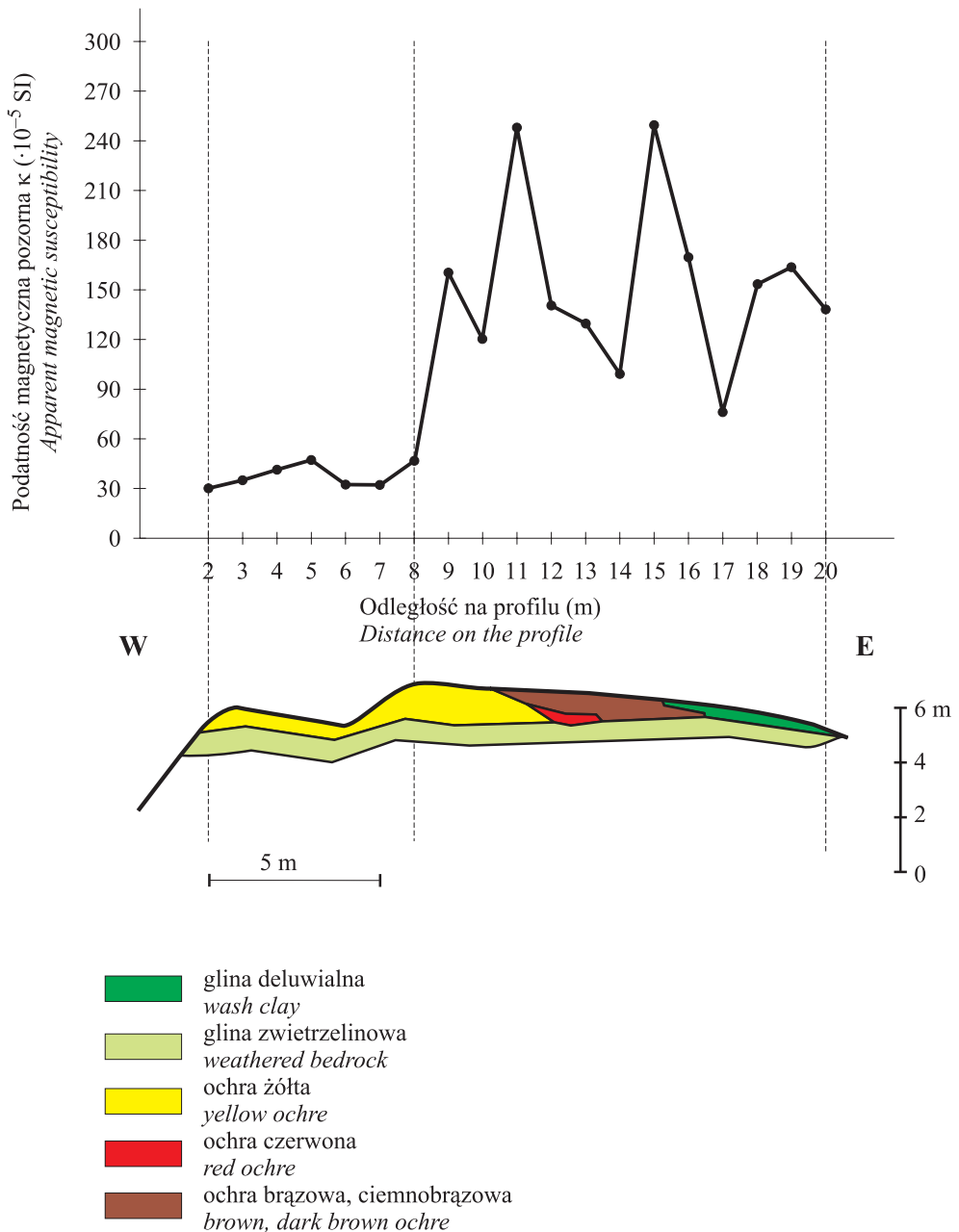


Fig. 12. Zestawienie pozornej podatności magnetycznej i przekroju geologicznego pokrywy ochrowej w Czerwonkach Hermanowskich wzdłuż profilu „5” (Rolirat 2006, zmodyfikowane)

Fig. 12. The apparent magnetic susceptibility and geologic section of ochre cover at Czerwonki Hermanowskie along profile “5” (Rolirat 2006, modified)

Tabela (Table) 3

Masowa podatność magnetyczna próbek gleb oraz obliczony współczynnik f_d
Mass magnetic susceptibility of the soil samples with calculated coefficient f_d

Nr No.	Barwa próbki <i>Sample colour</i>	χ [$\cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]	f_d [%]	Nr No.	χ [$\cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]	f_d [%]
1	rdzawa <i>rubiginous</i>	69	5	P6/5	19	4
2	rdzawa <i>rubiginous</i>	37	1	P6/6	13	4
3	rdzawa <i>rubiginous</i>	108	6	P6/7	17	3
4	żółta <i>yellow</i>	65	3	P6/8	35	4
5	żółta <i>yellow</i>	74	5	P6/9	32	5
6	rdzawa <i>rubiginous</i>	61	3	P6/10	38	6
7	brązowa <i>brown</i>	97	6	P6/11	49	4
8	rdzawa <i>rubiginous</i>	116	6	P6/12	54	4
9	żółta <i>yellow</i>	64	6	P6/13	95	6
10	rdzawa <i>rubiginous</i>	190	7	P6/14	63	4
11	brązowa <i>brown</i>	180	7	P6/15	82	4
12	brązowa <i>brown</i>	1016	5	P6/16	99	5
13	rdzawa <i>rubiginous</i>	237	5	P6/17	138	7
14	rdzawa <i>rubiginous</i>	196	7			
15	rdzawa <i>rubiginous</i>	227	-3			
16	rdzawa <i>rubiginous</i>	153	5			
17	rdzawa <i>rubiginous</i>	279	8			
18	brązowa <i>brown</i>	986	11			

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wskazały na wyraźne zróżnicowanie podatności magnetycznej utworów tworzących przypowierzchniową warstwę ziemi. Różnice te mogą być wynikiem zachodzących w strefie hipergenezy procesów, wpływu podłoża, jak również czynników antropogenicznych.

Zwiększone podatności gleby są związane z depozycją pyłów przemysłowo-miejskich, które często obok żelaza zawierają inne metale ciężkie, stanowiące poważne zagrożenie dla zdrowia człowieka.

Przykładem mogą tu służyć gleby **Łąk Nowohuckich**, będących użytkiem ekologicznym Krakowa. Pomiary podatności magnetycznej gleby w tym rejonie wykazały, że wielkość tego parametru waha się w granicach $(74\text{--}414)\cdot 10^{-8} \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ (zwiększając się w kierunku centrum Nowej Huty), co pozwala gleby Łąk Nowohuckich zakwalifikować do gleb zanieczyszczonych. Zanieczyszczenie tego rejonu może wiązać się z emisją pyłów i popiołów, pochodzących z Elektrociepłowni Kraków, zlokalizowanej na południowy zachód od obszaru badań. Dodatkowo zanieczyszczenia mogą pochodzić z huty Mittal, a także być wynikiem ruchu drogowego. Dowodem związku zanieczyszczenia gleby z działalnością człowieka jest obniżony współczynnik f_d (0–1%) próbek gleb i obecność sferul w glebie badanego obszaru.

Na terenach historycznych ośrodków przemysłowych **rejonu Trzebini** (kopalnie cynku i ołowiu) wartości podatności magnetycznej wierzchniej warstwy gleby (do 5 cm) są niższe. Mimo jakościowej zgodności mapy kappametrycznej z mapą współczynnika degradacji gleb poziomu B, wzrostu podatności nie można wiązać ze wzrostem zawartości w glebie metali, np. Zn, Pb, Cd, As, które mają bardzo słabe własności magnetyczne. Podwyższenie podatności magnetycznej gleby w rejonie północno-zachodnim badanego obszaru należy łączyć z działalnością zakładów przemysłowych Trzebini oraz spalaniem węgla w gospodarstwach domowych. Za antropogenicznym pochodzeniem zanieczyszczeń na tym obszarze przemawiają niskie wartości częstotliwościowego współczynnika podatności magnetycznej próbek gleb (poniżej 4%).

Najwyższą podatność magnetyczną utworów przypowierzchniowych obserwuje się na złożu ochry w **Czerwonkach Hermanowskich koło Rzeszowa**. Wzrost ten może być wynikiem zachodzących w strefie hipergenezy procesów, a także mieć związek z podłożem. Podatność magnetyczna ochry jest silnie zróżnicowana, a jej własności magnetyczne znacznie odbiegają od własności magnetycznych gleb i są zbliżone do własności magnetycznych kwaśnych skał krystalicznych. Duże zróżnicowanie własności magnetycznych ochry może mieć związek z występującymi minerałami, a także z zachodzącymi w strefie hipergenezy procesami, takimi jak np. proces zaglinienia prowadzący do obniżenia podatności.

Złoże ochry wywołuje niewielkie zakłócenia pola magnetycznego. Wyjątek stanowi anomalia dochodząca do 150 nT, zlokalizowana w północnej części złoża, gdzie równocześnie obserwuje się podwyższone wartości podatności magnetycznej. Przeprowadzone obliczenia wskazują, że przyczyną tej anomalii nie można wiązać ze zwiększoną podatnością magnetyczną ochry w tym rejonie.

LITERATURA

- Bartington Instruments LTD, 1999. *Operation manual for MS2 magnetic susceptibility system*. Oxford OX8 7GE England, OM0408 Issue 32.
- Bednarek R. & Prusinkiewicz Z., 1999. *Geografia gleb*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 8, 210.
- Bolewski A. & Manecki A., 1993. *Mineralogia szczegółowa*. Polska Agencja Ekologiczna, Warszawa.
- Dearing J., 1999. *Environmental Magnetic Susceptibility. Using the Bartington MS2 System*. Chi Publishing, Bartington Instruments Ltd., Oxford.
- Evans M.E. & Heller F., 2003. *Environmental Magnetism*. Academic Press Elsevier.
- Heller F., Strzyszczyk Z. & Magiera T., 1998. Magnetic record of industrial pollution in forests of Upper Silesia, Poland. *Journal of Geophysical Research*, vol. 103 (B8), 17764–17774.
- Jeleńska M., Hasso-Agopsowicz A., Kądziałko-Hofmokr M., Sukhorada A., Bondar K. & Matviishina Zh., 2008. Magnetic iron occurring in chernozem soil from Ukraine and Poland as indicators of pedogenic processes. *Studia Geophysica Geodaetica*, vol. 52, 255–270.
- Kicińska-Świdarska A. & Łasak M., 2005. Trasa geoturystyczna w dolinie potoku Złockiego. *Geoturystyka*, 2, 1, 33–42.
- Kotlarczyk J. & Ratajczak T., 2002. *Ochra karpacka z Czerwonek Hermanowskich koło Tyczyna*. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.
- Lis J. & Pasieczna A., 1995. *Atlas geochemiczny Polski*. PIG, Warszawa.
- Lis J. & Pasieczna A., 1995. *Atlas geochemiczny Górnego Śląska 1:200 000*. PIG, Warszawa.
- Lis J. & Pasieczna A., 1995. *Atlas geochemiczny Krakowa i okolic 1:100 000*. PIG, Warszawa.
- Lowrie W., 1997. *Fundamentals of Geophysics*. Cambridge University Press.
- Magiera T., 2004. *Wykorzystanie magnetometrii do oceny zanieczyszczenia gleb i osadów jeziornych*. Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska PAN, Zabrze.
- Magiera T., Lis J., Nawrocki J. & Strzyszczyk Z., 2002. *Podatność magnetyczna gleb Polski*. PIG, Warszawa.
- Magiera T. & Strzyszczyk Z., 2000. Ferrimagnetic minerals of anthropogenic origin in soils of some Polish national parks. *Water Air and Soil Pollution*, 124, 37–48.
- Magiera T., Strzyszczyk Z., Kapicka A. & Petrovsky E., 2006. Discrimination of lithogenic influences on topsoil magnetic susceptibility in Central Europe. *Geoderma*, 130, 299–311.
- Maneck M. & Marszałek M., 1993. Zanieczyszczenia atmosfery w Krakowie. W: *Problemy Ekologiczne Krakowa*, 16, *Globalne, kontynentalne i lokalne zanieczyszczenia atmosfery*, Polski Klub Ekologiczny, AGH, Kraków, 23–36.
- Musierowicz A., 1961. *Mapa gleb Polski 1:300 000*. Instytut Upraw, Nawożenia i Gleboznawstwa, Warszawa.

- Pasieczna A., 2003. *Atlas zanieczyszczeń gleb miejskich w Polsce*. PIG, Warszawa.
- Rolirat A. 2006. *Badanie podatności magnetycznej ochry karpackiej w rejonie Czerwonek Hermanowskich*. Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH, Kraków (manuskrypt – praca magisterska).
- Sass-Gustkiewicz M., Mayer W., Góralski M. & Leach D.L., 2001. Zawartości metali ciężkich w glebach na obszarach eksploatacji rud Zn-Pb w rejonach olkuskim i chrzanowskim. *Warsztaty 2001 „Przywracanie wartości użytkowych terenom górniczym”*, 189–208.
- Strzyszczyński Z., 1989. Ferromagnetic properties of forest soil being under influence of industrial pollution. Air pollution and forest decline. *Proceedings of 14th International Meeting for Specialist in Air Pollution Effects on Forest Ecosystems*, IUFRO, Interlaken, Switzerland, 201–207.
- Strzyszczyński Z., 1991. Ferromagnetism of soils in some Polish National Parks. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 66, 1119–1122.
- Strzyszczyński Z., 1993. Magnetic susceptibility of soils in the areas influenced by industrial emissions. *Soil Monitoring*, Monte Verità, Birkhäuser Verlag, Basel, 255–269.
- Thompson R. & Oldfield F., 1986. *Environmental magnetism*. Allen and Unwin, London.
- Walasz K., 2004. Charakterystyka przyrodnicza Łąk Nowohuckich. W: *Plan ochrony użytku ekologicznego Łąki Nowohuckie*, Archiwum Wydziału Gospodarki Komunalnej i Ochrony Środowiska Urzędu Miasta Krakowa.
- Zagrodzka A., 2008. *Podatność magnetyczna gleb w okolicy Elektrociepłowni Łęg w Krakowie*. Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH, Kraków (manuskrypt – praca magisterska).
- <http://soillab.ifas.ufl.edu/SOS%203022/Lectures%20pdf/Lecture%2022%20Soil%20Morphology%20and%20Classification.pdf>

Summary

The article presents the magnetic susceptibility research of soils. Magnetic susceptibility, which is the basic magnetic parameter of minerals and rocks, is often used as a soil contamination indicator. Increased values of magnetic susceptibility are observed in topsoil layers: fermentation sub-horizon (O_f) and humic sub-horizon (O_h) (Fig. 1). In soil samples collected from these areas, the larger values of magnetic susceptibility have been observed with an increase in the content of heavy metals (Strzyszczyński 1993). Magnetic properties of bedrock, processes that occur in the hypergenesis zone, and the presence of magnetic minerals (magnetite, maghemite, greigite) of natural or anthropogenic origins, are the main influences on soil magnetic properties. Magnetic properties of soil can slightly disturb the magnetic field of the Earth, thereby causing micromagnetic anomalies in the order of 2–5 nT.

The research was conducted in the areas with high anthropopression (Krakow, Trzebinia surroundings) and in the unpolluted area (ochre deposit in Polish Outer Carpathians, the vicinity of Hermanowa near Rzeszów). In the second case, measurements of the geomagnetic field were also conducted.

Field investigations of the apparent magnetic susceptibility were performed using sensors MS2D and MS2F of the MS2 System (Fig. 2), produced by Bartington Company (UK). The magnetic field of the Earth was measured by means of the proton magnetometer system (Scintrex Company, Canada).

The volume susceptibility was measured using an MS2B sensor (Fig. 2) in laboratory conditions. Afterwards the mass susceptibility and the magnetic susceptibility frequency dependence f_d of the soils samples were calculated.

The hydrogenic soils occurring on non-magnetic bedrock, in the Łąki Nowohuckie area of Krakow, are not very polluted by heavy metals (Fig. 3). Field investigations of soil magnetic susceptibility in this region showed that magnetic susceptibility ranges $(27-138) \cdot 10^{-5}$ SI (Fig. 4) and it increases towards the centre of Nowa Huta. In the table (1) the mass susceptibility of the soil samples is presented. The obtained values $(74-414) \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ show that the soil is contaminated (Tab. 2). The soil contamination in this area can be connected with the emission of dusts and ashes coming from the “Krakow” power plant, which is situated in the south-west region of the studied area. Additionally, pollution can emanate from “Mittal” steelworks and by nearby traffic movements. The low values (0–1%) of coefficient f_d and the spherules presence (Fig. 6) prove that pollutions are related to human activity. The presence of magnetite in spherules has been confirmed by remanent magnetization (IRM, ARM) studies and thermomagnetic analyses.

The second polluted area is located to the east of Trzebinia and includes the historical sites of Zn-Pb ore mining and dressing (Fig. 7). Soil magnetic susceptibility – from $16 \cdot 10^{-5}$ SI to $127 \cdot 10^{-5}$ SI – in comparison with the first studied area is lower. The results are presented on the kappametric map (Fig. 8A), which is compared with the geochemical maps of the soil contamination index (Fig. 8B, C). In spite of the qualitative agreement between the kappametric map (Fig. 8A) and the geochemical map of soil horizon B (Fig. 8C), the increase of magnetic susceptibility is not connected with the increase in metal content in the soil. The enhancement of magnetic susceptibility in the north-west region of the studied area is caused by industrial activity in Trzebinia and the coal burning in households.

The soil samples were taken from a 5 cm depth. Mass susceptibility ranged from $13 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ to $76 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (Fig. 9). The low values of the susceptibility frequency coefficient (below 4%) show the anthropogenic origin of magnetic particles in this area.

The third studied area was the ochre deposit (Fig. 10) located in an unpolluted region, to the south of Rzeszów (Czerwonki Hermanowskie). The deposit consists of different varieties of ochre (Fig. 11B) (Kotlarczyk & Ratajczak 2002).

Field investigations of apparent magnetic susceptibility were performed along seven geological profiles. Low magnetic susceptibility requires soils which are devoid of ochre cover. Higher values of magnetic susceptibility characterize the ochre deposit (Figs 11C, 12). It can be connected with physics-chemical processes in the hypergenesis zone and with the magnetic properties of weathered bedrock.

Results of the field investigations are similar to the results of laboratory studies. The highest values of magnetic susceptibility (similar to the magnetic susceptibility of acid crystalline rocks) possess brown ochre. The susceptibility of yellow and rubiginous ochre is

lower (Tab. 3). The large differentiation of the ochre magnetic properties can be caused by the various mineral composition and physics-chemical processes occurring in the hypergenesis zone, for example gleization, which decreases the magnetic susceptibility.

The majority of studied samples have high f_d values, reaching 11% (Tab. 3), which can be connected with the presence of superparamagnetic particles in the samples of ochre soil.

Measurements of the geomagnetic field were taken on the site of the ochre deposit and to the south of it. The deposit of ochre slightly disturbs the magnetic field of the Earth (Fig. 11A). The maximum values of magnetic microanomalies amount to 30 nT. The exception is a strong magnetic anomaly (150 nT), situated in the northern part of the deposit (Fig. 11A), the sources of which are not known. Calculations (Rolirat 2006) show that the anomaly is not related to the enhancement of ochre magnetic susceptibility in this region.

The research has shown a large differentiation in terms of the magnetic properties of soils. In the case of the nearby towns (Krakow, Trzebinia), the enhancement of soil magnetic susceptibility is connected with the deposition of industrial and urban dusts which contain, beside iron, other heavy metals, that are deemed very dangerous for man's health. The high values of magnetic susceptibility in the unpolluted area (Czerwonki Hermanowkie) are connected with magnetic properties of soils, containing magnetic minerals which have a natural origin.

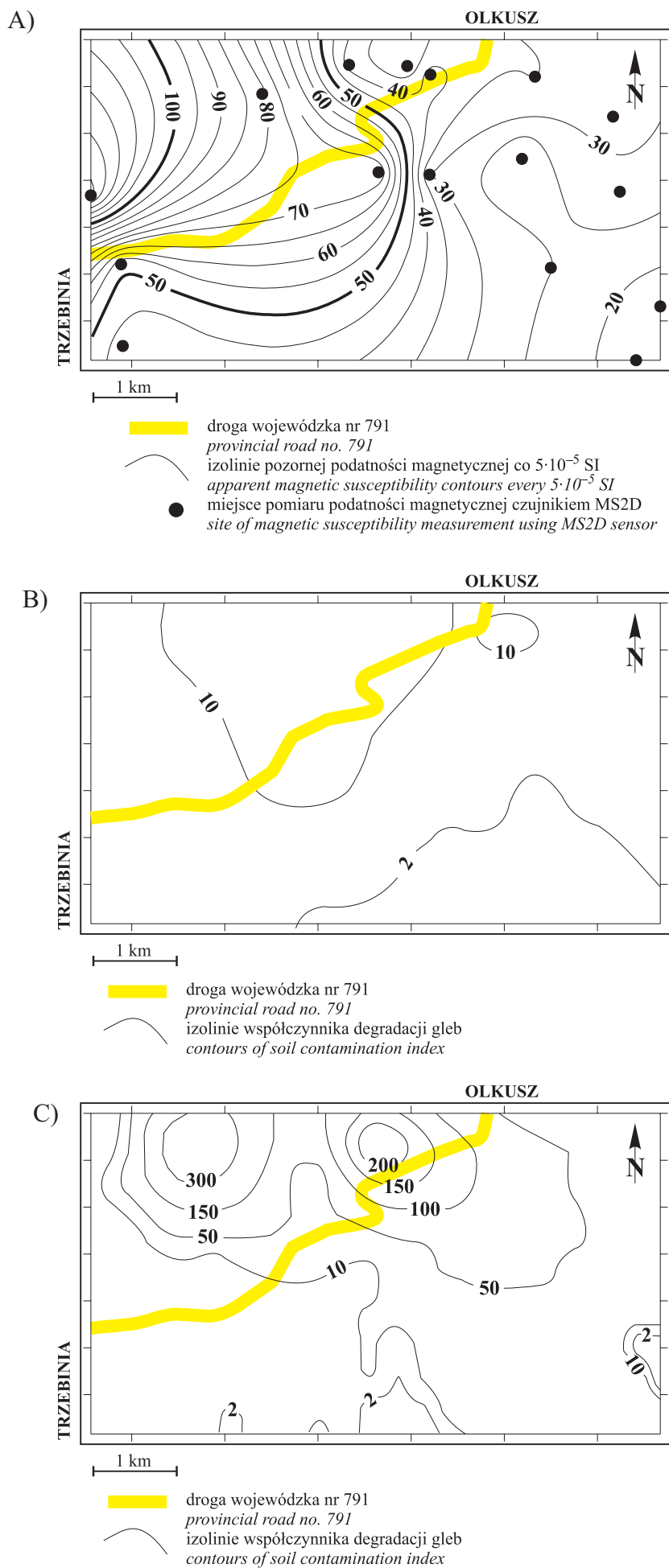


Fig. 8. Zestawienie mapy kappametrycznej (A) i map geochemicznych współczynnika degradacji gleb (Sass-Gustkiewicz *et al.* 2001, zmodyfikowane) – poziomu glebowego A (B) i poziomu glebowego B (C) – rejonu Trzebini

Fig. 8. Kappametric map (A) and geochemical maps of soil contamination index (Sass-Gustkiewicz *et al.* 2001, modified) – soil horizon A (B) and soil horizon B (C) – of the Trzebinia town region