

**Agata HASSO-AGOPSOWICZ¹, Maria JELEŃSKA¹,
Bogumił WICIK²**

¹Instituto Geofizyki, Polska Akademia Nauk
Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences

²Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Uniwersytet Warszawski
Faculty of Geography and Regional Studies, Warsaw University

Wpływ zanieczyszczeń metalurgicznych na charakterystyki magnetyczne czarnoziemów

The influence of metallurgical contaminants on magnetic characteristics of chernozems

Słowa kluczowe: magnetyzm środowiskowy, podatność magnetyczna, zanieczyszczenie gleby, czarnoziem

Key words: environmental magnetism, magnetic susceptibility, soil pollution, chernozem

Wprowadzenie

Pomiary właściwości magnetycznych stanowią istotne i efektywne narzędzie analizy wpływu człowieka na środowisko naturalne (Hoffmann i in. 1999, Petrovský i in. 2001, Goddu i in. 2004), jako że zanieczyszczenia emitowane przez zakłady przemysłowe (huty, koksownie, elektrocieplownie) oraz środki transportu drogowego mają charakter silnie magnetyczny. Największy stopień akumulacji pyłów opadających na powierzchnię gruntu występuje w powierzchniowej warstwie gleby, co wiąże się ze znaczącym wzrostem podatności magnetycznej w górnej części profilu glebowego. Podatność magne-

tyczna jest również bardzo czuła na różnice warunków i procesów pedogenicznych (Jordanova i Petersen 1999, Xihao i Zhisheng 2001, Maher i in. 2002). Z tego względu jej wartość nie może być w sposób bezpośredni, bez uwzględnienia czynników środowiskowych, interpretowana jako wyznacznik antropopresji. Celem niniejszej pracy było wskazanie parametrów magnetycznych pozwalających określić skalę i zasięg zmian właściwości magnetycznych czarnoziemów wywołanych imisją pyłów z przemysłu metalurgicznego.

Badaniami objęte zostały czarnoziemy – gleby o dużej miąższości poziomu próchnicznego, zasobne w humus, wytworzone w klimacie umiarkowanym, na lessach, przy udziale roślinności stepowej. Obszar występowania czarnoziemów charakteryzuje się nieznaczną zmiennością stosunku rocznego opadu do parowania, z nadwyżką opadów w przypadku czarnoziemów północnych oraz nieznacznym deficytem

wilgoci na południu. Porównanie wartości i rozkładów parametrów magnetycznych w profilach niezanieczyszczonych z centralnej Polski (Młodzawy k. Pińczowa) oraz południowo-wschodniej Ukrainy pozwala określić wpływ warunków klimatycznych na przebieg procesów pedogenicznych. Z kolei porównanie charakterystyk magnetycznych czarnoziemów zanieczyszczonych z czarnoziemami wykształconymi w sposób naturalny w tej samej strefie klimatycznej pozwala wyodrębnić parametry magnetyczne, w najlepszy sposób opisujące efekt przekształceń antropogenicznych.

Obszar i materiał badawczy

Badania przeprowadzone zostały na dwóch profilach czarnoziemów północnych. Profil MD, pobrany w Młodzawach na terenie Zespołu Parków Krajo-
brazowych Poniżnia z między pokrytej wieloletnią roślinnością trawiastą, jest przykładem czarnoziemów niezdegradowanego, płytkiego, o miąższości poziomu próchnicznego ok. 40 cm. Węglany wapnia występują poniżej 70 cm. Drugi profil K10, pobrany w sąsiedztwie Nowej Huty k. Krakowa z gleby ornej, jest przykładem czarnoziemów zdegradowanego. Poniżej poziomu próchnicznego o miąższości 50 cm zaznaczyły się procesy iluwialne. Węglany wapnia obecne są dopiero poniżej 140 cm. Polskie profile porównane zostały z czarnoziemami południowymi, dla których wyniki zostały częściowo opublikowane (Jeleńska i in. 2004). Profil H1 z Rezerwatu Homutovski Step, pokryty roślinnością stepu ostni-

cowego i ostnicowo-kostrzewowego nieprzekształcaną od ponad 120 lat, zawiera węglany wapnia już od głębokości 40 cm. Intensywna działalność drobnej fauny glebowej wpłynęła na przenikanie próchnicy na znaczne głębokości. Profil M1 z przedmieść Mariupola (ośrodka przemysłowego przetwórstwa rudy żelaza) reprezentuje glebę silnie zanieczyszczoną. Obecność węglanów zaznacza się poniżej 80 cm.

Do badań parametrów magnetycznych profile opróbowane zostały co 10 cm do głębokości: MD – 140 cm, K10 – 170 cm, H1 – 190 cm. W przypadku profilu M1 próby odebrano z głębokości 0–10 cm, 30–40 cm, 60–70 cm, 70–110 cm i 120–130 cm.

Metody i pomiary

Pomiary parametrów magnetycznych, za wyjątkiem zmian podatności w niskiej temperaturze $\kappa(T)$, wykonane zostały dla wszystkich prób. Pomiary podatności magnetycznej w niskim polu, przypadającej na jednostkę masy χ , wykonano na AGICO Kappabridge KLY-2 (Brno, Czechy). Parametry histerezy (maksymalną pozostałość magnetyczną SIRM i koercję pozostałości H_{cr}) dla małych prób zmierzono w polu magnetycznym do 1T przy użyciu Molspin Vibrating Sample Magnetometer (VSM). Bezhisterezową pozostałość magnetyczną ARM nałożono na próbę umieszczoną w polu zmiennym malejącym od 100 mT, przy jednoczesnym działaniu stałego pola magnetycznego 100 μ T, wykorzystując LDA-3 AF Demagnetiser i AMU-1 Anhysteretic Magnetiser, a następnie mierzono na AGI-

CO JR-4 Spinner Magnetometer. Rozmagnesowanie termiczne maksymalnej pozostałości magnetycznej SIRM(T), nałożonej w wysokim polu (4–7 T) w MMPM10, podczas grzania do temperatury 700°C, mierzono z wykorzystaniem urządzenia wykonanego przez TUS-Warszawa. Zmiany całkowitej objętościowej podatności magnetycznej w niskim polu $\kappa(T)$, w niskiej temperaturze (od –196°C do temperatury pokojowej) zmierzono dla prób z powierzchni gleby i poziomu lessu każdego z profili przy użyciu KLY-3 Kappa-bridge z przyłączonym piecem CS-3, AGICO.

W wybranych próbach w glebie powietrznie suchej określono: zawartość węgla organicznego (Corg) – metodą Tiurina poprzez utlenianie z dwuchromianem potasu, żelazo (Fe) – jodometrycznie w próbach wyprażonych, gotowanych w 10% HCl oraz obecność węglanu wapnia przy użyciu 10% HCl.

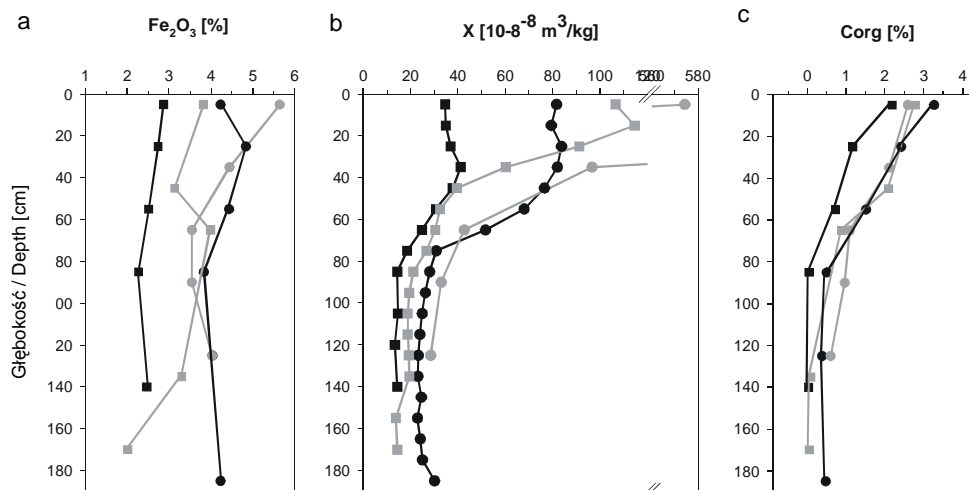
Dyskusja wyników

Podatność magnetyczna a zawartość żelaza i substancji organicznej. Żelazo zawarte w glebie wchodzi między innymi w skład minerałów magnetycznych, zarówno pierwotnych, jak i wtórnych. W badanych profilach gleb niezanieczyszczonych zawartość żelaza (rys. 1a) jest niezależna od głębokości (2,27–2,87% w MD i 3,83–4,83% w H1). Zanieczyszczony profil M1 wykazuje rozkład żelaza podobny jak w profilu H1, za wyjątkiem warstwy powierzchniowej, gdzie widoczny jest znaczny wzrost zawartości żelaza do 5,64%. Profil K10, w stosunku do nie-

zanieczyszczonego profilu MD, wykazuje podwyższoną zawartość żelaza na wszystkich głębokościach, jak również inny rozkład z głębokością: wzbogaconą wierzchnią warstwę (3,82%), spadek na głębokości około 50 cm oraz maksimum (3,99%) w poziomie iluwialnym na głębokości 60–70 cm. Żelazo w poziomie lessu stanowi około 50% zawartości żelaza w poziomie iluwialnym.

Forma, w jakiej żelazo występuje w glebie, zależy od różnych czynników środowiskowych, przede wszystkim od rodzaju skały macierzystej, aeracji, wilgotności, substancji organicznej (Maher 1986). Tym samym skład frakcji magnetycznej odzwierciedla procesy zachodzące w profilu glebowym. Podatność magnetyczna (χ) jest parametrem najczęściej wykorzystywanym w badaniach magnetycznych gleb. Jej wartość silnie zależy od zawartości tlenków żelaza jak również mineralogii i granulometrii frakcji magnetycznej. Zmiany podatności z głębokością w przybliżeniu odzwierciedlają rozkład minerałów magnetycznych w profilu glebowym.

Największe wartości χ w badanych czarnoziemach (rys. 1b) występują w poziomach próchnicznych, gdzie zachodzą intensywne procesy biochemiczne, a najmniejsze – w węglanowych lessach, tworzących skałę macierzystą. Taki rozkład podatności jest charakterystyczny dla czarnoziemów (Babanin i in. 1995). W przypadku czarnoziemów ukraińskiego wartości podatności w całym profilu są większe aniżeli w profilu polskim. Różnicę tę można tłumaczyć większą zawartością żelaza w profilu H1 aniżeli w profilach polskich. Mimo to stosunek podatności



RYSUNEK 1. Rozkład pionowy: a – zawartości żelaza, b – podatności magnetycznej, c – zawartości węgla organicznego w profilach glebowych: MD – czarne kwadraty, H1 – czarne kropki, K10 – szare kwadraty, M1 – szare kropki

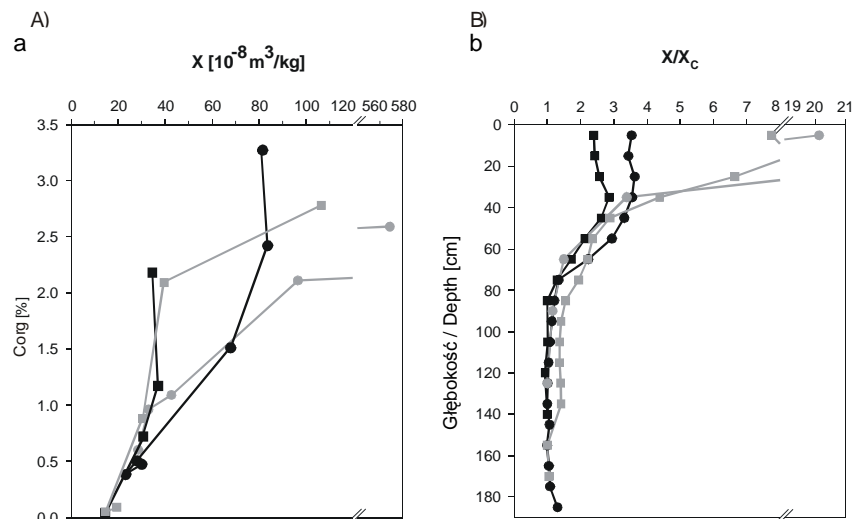
FIGURE. 1. Vertical distribution of: a – iron content, b – magnetic susceptibility and c – organic carbon content in the soil profiles: MD – black squares, H1 – black dots, K10 – grey squares, M1 – grey dots

gleby do podatności lessu (χ/χ_c), odpowiadający stopniowi wzbogacenia gleby we frakcję ferrimagnetyczną, wykazuje niewielkie różnice i wynosi 2,4 i 3,5 dla wierzchniej warstwy profili MD i H1 (rys. 2b).

W profilach zanieczyszczonych K10 i M1 do głębokości około 40 cm wartości χ znacznie przewyższają wartości obserwowane w odpowiadających im profilach gleb niezanieczyszczonych. Gleby zanieczyszczone cechuje znacznie większa wartość χ/χ_c i na powierzchni osiąga 7,75 w profilu K10 i 20,13 w profilu M1. Wyraźnie zaznaczony wzrost stosunku χ/χ_c w glebie skażonej odpowiada udziałowi frakcji magnetycznej pochodzenia antropogenicznego. W głębszych poziomach profili zanieczyszczonych podatność jest nieznacznie większa aniżeli w profilach

gleb czystych. Również zawartość węgla organicznego (rys. 1c) w głębszych warstwach profili K10 i M1 przewyższa wartości obserwowane w odpowiadających im profilach MD i H1. Sugeruje to penetrację substancji organicznej w głąb profili zanieczyszczonych na skutek silnej degradacji poziomu próchnicznego.

Rozkład podatności w profilach glebowych wykazuje zależność od zawartości węgla organicznego, jako że materia organiczna bierze udział w procesach rozpadu niemagnetycznych krzemianów i tworzenia, na bazie żelaza w nich zawartego, silnie magnetycznych ziaren ferromagnetycznych. Na rysunku 2a dla zawartości węgla organicznego poniżej 1,1% s.m. widoczna jest niemal liniowa zależność χ od Corg. W poziomie próchnicznym gleb niezanieczyszczonych obserwuje się stosun-

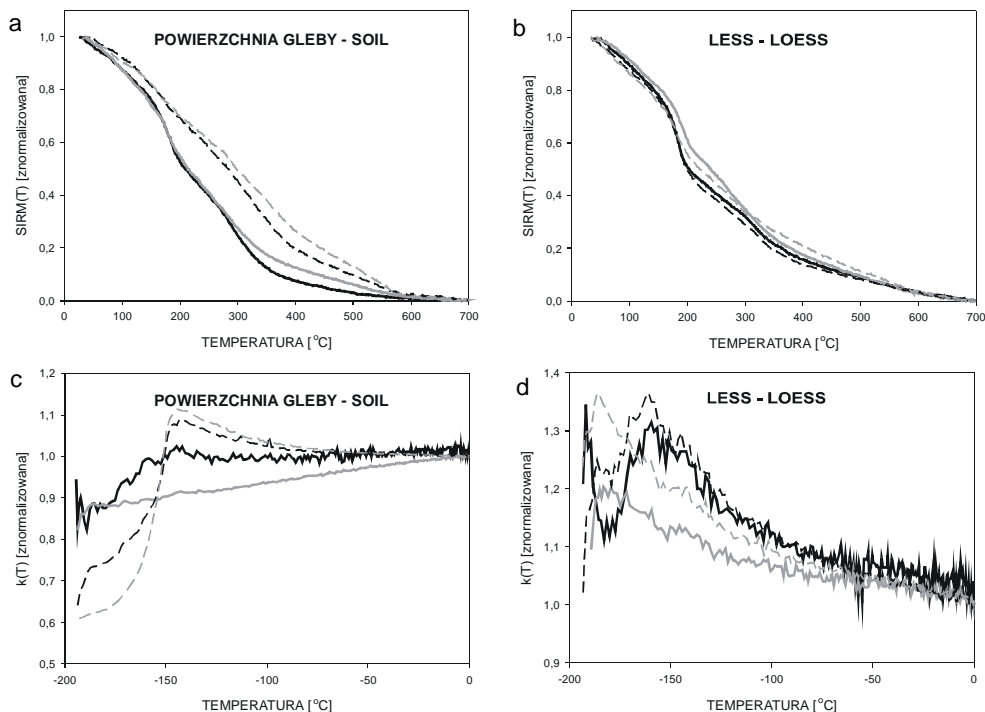


RYSUNEK 2. a – zależność podatności magnetycznej od zawartości węgla organicznego, b – zmiany stosunku podatności gleby do podatności lessu χ/χ_c z głębokością w profilach glebowych: MD – czarne kwadraty, H1 – czarne kropki, K10 – szare kwadraty, M1 – szare kropki
 FIGURE 2. a – magnetic susceptibility versus the organic carbon content plot, b – changes of soil susceptibility to susceptibility of loess ratio χ/χ_c with depth, for the soil profiles: MD – black squares, H1 – black dots, K10 – grey squares, M1 – grey dots

kowo stałe wartości podatności, podczas gdy zawartość węgla organicznego spada wraz z głębokością niemalże dwukrotnie. W glebach zanieczyszczonych pyły pochodzenia przemysłowego powodują silny wzrost podatności, podczas gdy zawartość węgla organicznego utrzymuje się na poziomie obserwowanym w ich niezanieczyszczonych odpowiednikach.

Mineralogia i granulometria frakcji magnetycznej. Obserwowane w profilach czarnoziemów zmiany podatności wraz z głębokością, przy jednocześnie nieznacznych różnicach zawartości żelaza, świadczą o zmiennym udziale poszczególnych związków żelaza. W celu określenia minerałów magnetycznych występujących w glebie wykorzystano pomiary spadku maksymalnej pozostałości magnetycznej pod-

czas grzania do temperatury 700°C SIRM(T) oraz zmiany podatności w niskiej temperaturze $\kappa(T)$ (rys. 3). Krzywe SIRM(T) przedstawiają temperaturę blokującą (T_b) minerałów zdolnych do zachowywania pozostałości. Jako że przemiany mineralogiczne, zachodzące podczas grzania, nie wpływają na wartość pozostałości, krzywe SIRM(T) prezentują pierwotny skład mineralogiczny badanej próby w zakresie ww. frakcji. Z kolei niskotemperaturowe charakterystyki $\kappa(T)$ (od -194°C do 0°C) obrazują przemiany mineralogiczne i strukturalne zachodzące podczas grzania, charakterystyczne dla poszczególnych minerałów i wielkości ziaren magnetycznych (Thompson i Oldfield 1986). Paramagnetyki wykazują spadek podatności podczas grzania, zgodnie z prawem Curie (Stacey i Banerjee 1974). Ziarna jednodomenowe



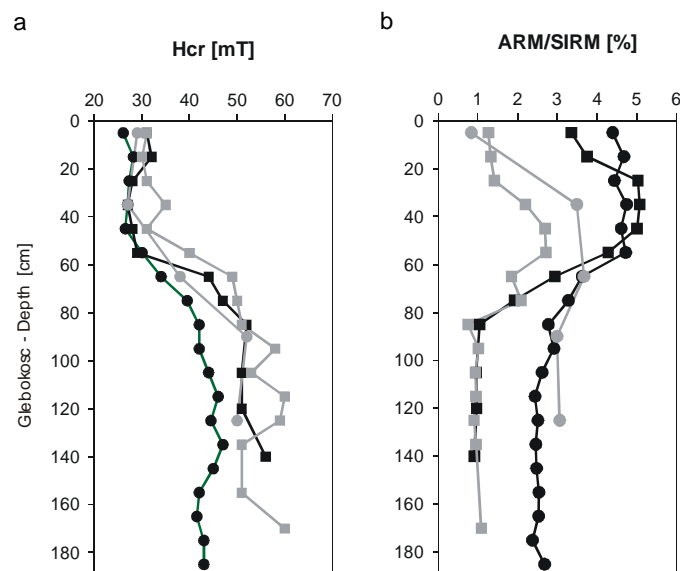
RYSUNEK 3. Zmiany maksymalnej pozostałości magnetycznej podczas grzania do temperatury 700°C SIRM(T) w próbach z: a – powierzchni i b – lessu, oraz zmiany podatności w niskiej temperaturze $\kappa(T)$ w próbach: c – z powierzchni i d – lessu, w profilach: MD – czarna gruba linia, K10 – czarna przerywana linia, M1 – szara przerywana linia

FIGURE 3. Thermomagnetic analysis saturation remanence SIRM(T) decay curves normalised by the maximum values: a – for the topsoil samples, b – for the loess samples, and low-temperature variations of magnetic susceptibility $\kappa(T)$ curves normalised to equivalent susceptibilities at 0°C: c – for the topsoil samples, d – for the loess samples, from the soil profiles: MD – black solid line, H1 – grey solid line, K10 – black dashed line, M1 – grey dashed line

magnetytu i maghemitu zachowują niemal stałą wartość podatności podczas grzania, a najdrobniejsze superparamagnetyczne ziarna charakteryzuje znaczny wzrost podatności wraz ze wzrostem temperatury. Obecność magnetytu obrazuje się jako charakterystyczny pik na krzywej podatności – przemiana Verwey'a (V_t). W przypadku stechiometrycznego magnetytu, V_t zachodzi w około -150°C , natomiast wraz ze wzrostem niestechiometryczności oraz stopnia utlenienia (maghemityzacji)

temperatura przejścia ulega obniżeniu (Özdemir i Dunlop 1993).

W przypadku prób z powierzchni profili MD i H1, SIRM(T) ulegają całkowitemu rozmagnesowaniu w temperaturze około 650°C , co wskazuje na obecność maghemitu w tych próbach. Widoczny w profilu MD silniejszy wzrost κ w temperaturze od -190°C do -150°C (V_t) świadczy o obecności niestechiometrycznej postaci magnetytu. W profilu H1 nie występuje magnetyt, co potwierdza analiza Mössbauera (Jeleńska i in. 2004). Obecne w tych



RYSUNEK 4. Rozkład pionowy: a – koercji pozostałości magnetycznej (Hcr), b – stosunku bezhisterezy pozostałości magnetycznej do pozostałości maksymalnej (ARM/SIRM), w profilach glebowych: MD – czarne kwadraty, H1 – czarne kropki, K10 – szare kwadraty, M1 – szare kropki
 FIGURE 4. Vertical distribution of: a – remanence coervity (Hcr), and b – anhysteretic remanence to saturation remanence ratio (ARM/SIRM), in the soil profiles: MD – black squares, H1 – black dots, K10 – grey squares, M1 – grey dots

poziomach minerały antyferromagnetyczne – hematyt i getyt, mają niewielki wpływ na wartości podatności, gdyż ich zdolność magnesowania się jest wielokrotnie mniejsza aniżeli ferrimagnetyków (magnetyt i/lub maghemit). Duże wartości podatności χ (rys. 1b) wskazują na wzbogacenie poziomów próchnicznych i podpróchnicznych we frakcję ferrimagnetyczną do głębokości około 80 cm. Ilość ferrimagnetyków maleje wraz z głębokością (spadek wartości χ). Jednak analiza zmian podatności w niskiej temperaturze $\kappa(T)$ potwierdziła występowanie magnetytu w czarnoziemach północnych nawet na głębokości 140 cm (przemiana Vervey'a). Od głębokości 60 cm podwyższone warto-

ści koercji pozostałości Hcr (rys. 4a) wskazują na wzrost zawartości hematytu i jego dominujący udział poniżej 80 cm. Próby z poziomu lessu wykazują ostateczne rozmagnesowanie SIRM(T) przy T_b około 675°C , właściwej dla hematytu. Opadający kształt krzywych $\kappa(T)$, obserwowany dla lessu ze wszystkich badanych profili glebowych, świadczy o dużym udziale frakcji paramagnetycznych w tym poziomie.

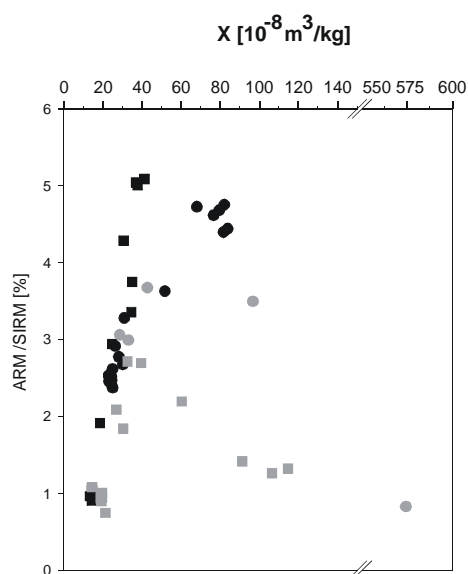
W profilach zanieczyszczonych K10 i M1 w górnej części poziomą próchnicznego zaznacza się znaczny wpływ czynnika antropogenicznego. W próbach z powierzchni wyraźne dwie temperatury blokujące: T_b około 585°C i T_b około 675°C , świadczą o zwięk-

szanej koncentracji odpowiednio magnetytu oraz hematytu. Znaczący wzrost podatności przy -150°C , widoczny na krzywych $\kappa(T)$, potwierdza obecność dobrze skryształizowanego stechiometrycznego multidomenowego magnetytu w tych próbach, charakterystycznego dla cząstek pochodzenia przemysłowego. Charakterystyki termomagnetyczne prób z profili K10 i M1, poniżej poziomu próchnicznego, przedstawiają skład mineralogiczny podobny do zaobserwowanego w odpowiadających im profilach niezanieczyszczonych.

Wraz z głębokością zmienia się wielkość ziaren magnetycznych. Współczynnik ARM/SIRM, proporcjonalny do udziału ziaren jednodomenowych we frakcji magnetycznej zachowującej pozostałość magnetyczną, w glebach niezanieczyszczonych przyjmuje zbliżone wartości do głębokości 60 cm (rys. 4b). Świadczy to o podobnej wielkości ziaren w poziomie próchnicznym czarnoziemów północnego i południowego. Nieznaczne obniżenie ARM/SIRM przy powierzchni profilu MD, w stosunku do profilu H1, sugeruje występowanie grubszych frakcji w warstwie ornej. Jest to zgodne z przebiegiem krzywych $\kappa(T)$ w próbach z powierzchni: stały wzrost $\kappa(T)$ dla profilu H1 świadczy o obecności bardzo drobnych ziaren superparamagnetycznych, natomiast stałe wartości κ powyżej -150°C dla profilu MD sugerują obecność większych ziaren jednodomenowych. Poniżej 80 cm w większym stopniu nośnikami magnetycznymi są ziarna wielodomenowe, charakterystyczne dla minerałów pierwotnych, przy czym ich udział jest większy w czarnoziemach północnych (mniejsze wartości

ARM/SIRM) aniżeli południowych. Sugeruje to bardziej intensywne procesy wietrzeniowe w glebach ukraińskich. Zmniejszone wartości ARM/SIRM w górnych częściach profili K10 i M1, w stosunku do ich niezanieczyszczonych odpowiedników, wynikają z większych rozmiarów ziaren frakcji magnetycznej zanieczyszczeń. Poniżej skład granulometryczny profili zanieczyszczonych zgodny jest z obserwowanym w glebach z ich strefy klimatycznej.

Jako że udział zanieczyszczeń wpływa na wyraźny wzrost podatności i spadek stosunku ARM/SIRM, wzajemna relacja tych parametrów pozwala rozróżnić próby gleby skażonej od nie-



RYSUNEK 5. Zależność współczynnika ARM/SIRM od podatności (χ) w profilach glebowych: MD – czarne kwadraty, H1 – czarne kropki, K10 – szare kwadraty, M1 – szare kropki

FIGURE 5. ARM/SIRM ratio versus susceptibility (χ) plot for the soil profiles: MD – black squares, H1 – black dots, K10 – grey squares, M1 – grey dots

zanieczyszczonych. Na wykresie zależności ARM/SIRM od χ (rys. 5) próby zanieczyszczone reprezentowane są przez punkty przesunięte w stronę prawego dolnego rogu w stosunku do prób niezanieczyszczonych.

Podsumowanie

Zmiany podatności magnetycznej w profilach glebowych pozwalają wyodrębnić część objętą intensywnymi procesami biochemicznymi oraz część mało zmienioną przez te procesy. Podobny przebieg zmian właściwości magnetycznych wraz z głębokością obserwowany w profilach naturalnie wykształconych czarnoziemów północnego (Polska) i południowego (Ukraina), zlokalizowanych obecnie w różnych strefach roślinno-klimatycznych, świadczy o podobnym składzie frakcji magnetycznej, a tym samym wskazuje na podobieństwo zarówno materiału macierzystego, jak i procesów pedogenicznych towarzyszących kształtowaniu się tych gleb. Pomimo różnic zawartości żelaza pomiędzy profilami, w obu przypadkach zaobserwowano zbliżone wartości stosunku χ/χ_c , odzwierciedlające pedogeniczny wzrost podatności w poziomie próchnicznym.

Analizy zmian podatności w niskiej temperaturze $\kappa(T)$ wykazały, że zachodzące w cieplejszym klimacie zaawansowane procesy glebowe skutkują powstawaniem bardzo drobnych ziaren magnetycznych w górnej części czarnoziemiu południowego, podczas gdy chłodniejszy i wilgotniejszy klimat powoduje powstawanie większych ziaren i mniej utlenionych form minerałów

magnetycznych w czarnoziemie północnym.

Wpływ zanieczyszczeń zaznaczył się do głębokości około 40 cm, zarówno w czarnoziemie północnym, jak i południowym, poprzez większe aniżeli w przypadku gleb czystych wartości podatności oraz stosunku χ/χ_c . W próbach z silnie zanieczyszczonej warstwy powierzchniowej zaobserwowano zwiększoną zawartość magnetytu i hematytu (krzywe SIRM(T)). Analizy termomagnetyczne wskazały na obecność ziaren wielodomenowych stechiometrycznego magnetytu (wyraźnie zaznaczone przejście Vervey'a), charakterystycznych dla antropogenicznych minerałów magnetycznych.

O znacznym udziale frakcji wielodomenowych w wierzchnich warstwach gleb zanieczyszczonych świadczą zmniejszone wartości stosunku bezhisterezowej pozostałości magnetycznej do pozostałości maksymalnej (ARM/SIRM < 1,5%). Zależność ARM/SIRM od χ pozwala wyróżnić próby gleby skażonej przemysłowo na podstawie dużej zawartości w nich minerałów magnetycznych oraz dużych rozmiarów ziaren frakcji magnetycznej zanieczyszczeń.

Uzyskane w toku badań wyniki wskazują na możliwość szerszego wykorzystania analiz magnetycznych dla celów monitoringu zmian zachodzących na powierzchni oraz w całych profilach glebowych, zarówno pod wpływem różnych czynników środowiskowych, jak i na skutek zanieczyszczenia środowiska związanego z intensywnym rozwojem gospodarki. Pomiarów parametrów magnetycznych są stosunkowo szybkie i tanie. Uzyskane wyniki mogą

posłużyć jako metody wstępnej oceny zanieczyszczenia gleb przed określeniem zakresu dalszych badań.

Literatura

- BABANIN V.F., TRUKHIN V.J., KARPATCHEVSKII L.O., IVANOV A.V., MOROZOV V.V. 1995: Soil Magnetism. Yaroslavl State University Press, Moskva.
- BEDNAREK R., DZIADOWIEC H., POKOJSKA U., PRUSINKIEWICZ Z. 2004: Badania ekologiczno-gleboznawcze. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- GODDU S.R., APPEL E., JORDANOVA D., WEHLAND F. 2004: Magnetic properties of road dust from Visakhapatnam (India) – relationship to industrial pollution and road traffic. *Physics and Chemistry of the Earth* 29: 985–995.
- HOFFMANN V., KNAB M., APPEL E. 1999: Magnetic susceptibility mapping of roadside pollution. *Journal of Geochemical Exploration* 66: 313–326.
- JELEŃSKA M., HASSO-AGOPSOWICZ A., KOPCEWICZ B., SUKHORADA A., TYAMINA K., KADZIAŁKO-HOFMOKL M., MATVIISHINA Z. 2004: Magnetic properties of the profiles of polluted and non-polluted soils. A case study from Ukraine. *Geophys. J. Int.* 159: 104–116.
- JORDANOVA D., PETERSEN N. 1999: Paleomagnetic record from a loess-soil profile in northeastern Bulgaria – II. Correlation with global climatic events during the Pleistocene. *Geophys. J. Int.* 138: 533–540.
- MAHER B.A. 1986: Characterization of soils by mineral magnetic measurements. *Physics of the Planetary Interiors*. 42: 76–92.
- MAHER B.A., ALEKSEEV A., ALEKSEEVA T. 2002: Variation of soil magnetism across the Russian steppe: its significance for use of soil magnetism as a palaeorainfall proxy. *Quaternary Science Reviews* 21: 1571–1576.
- MULLINS C.E. 1977: Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science: a review. *J. Soil Sci.* 28: 223–246.
- ÖZDEMİR Ö., DUNLOP D.J. 1993: The effect of oxidation on the Vervey transition in magnetite. *Geophysical Research Letters* 20, 16: 1671–1674.
- PETROVSKÝ E., KAPIČKA A., JORDANOVA N., BORŮVKA L. 2001: Magnetic properties of alluvial soils contaminated with lead, zink and cadium. *Journal of Applied Geophysics* 48: 127–136.
- STACEY F.D., BANERJEE S.K. 1974: The physical principles of rock magnetism. Elsevier, Amsterdam.
- STRZYSZCZ Z., MAGIERA T., HELLER F. 1996: The influence of industrial emission on the magnetic susceptibility of soils in Upper Silesia. *Studia Geophysica et Geodetica* 40: 276–286.
- THOMPSON R., OLDFIELD F. 1986: Environmental Magnetism. Allen & Unwin, Winchester.
- XIHAO W., ZHISHENG A. 2001: Dependence of near-surface magnetic susceptibility on dust accumulation rate and precipitation on the Chinese loess plateau. *Quaternary Research* 55: 271–283.

Summary

The influence of metallurgical contaminants on magnetic characteristics of chernozems. The pollutants, that are widely emitted to the environment by metallurgy, energetic industry or transport, are strongly magnetic. In consequence, magnetic measurements can be applied to investigate soil contamination. This study takes into consideration the influence of pedogenic processes on values and distribution of magnetic parameters along northern (Polish) and southern (Ukrainian) chernozem profiles, developed in different climatic zones. The impact of metallurgical dust on the soil contamination was evaluated in polluted chernozem profiles by the comparison to their unpolluted counterparts. Magnetic investigations were complemented by chemical analysis of iron and organic carbon content.

Magnetic characteristics of unpolluted profiles reveal the similarity of pedogenic processes accompanying the development of investigated soils. In both areas, the

ferrimagnetic fraction (magnetite and/or maghemite) dominates in the surface soil and reflects in the elevated susceptibility (χ) and suppressed remanence coercivity (H_{cr}) values in comparison to those observed in loess, where antiferromagnetic hematite and paramagnetic minerals prevail. Although, due to the lower iron content in northern chernozems, the Polish chernozem is about half as magnetic as its Ukrainian counterpart, the ratios of soil susceptibility to the susceptibility of loess, χ/χ_c , representing their natural enrichment in ferrimagnetic fraction with respect to the available Fe supply, varies in a narrow range. Low temperature susceptibility changes $\kappa(T)$ demonstrate the difference in granularity of magnetic fraction: presence of strongly magnetic superparamagnetic fraction in the surface soil of southern chernozem, and the single domain grains in the surface 10 cm layer and superparamagnetic fraction at a depth of 40 cm in northern chernozem. The non-stoichiometric magnetite occurs all along the Polish profile, whereas in the Ukrainian soil the maghemite is observed. These differences can be ascribed to the impaired aeration and increased precipitation in Polish climate.

Contaminated profiles display significant increase of susceptibility in the uppermost 40-cm layer that express in considerably increased χ/χ_c ratio. Thermomagnetic analyses reveal the dominance of stoichiometric multidomain magnetite in this layer, characteristic for the industrially-derived magnetic minerals. Also the significant decrease of the anhysteretic remanence

to saturation remanence ratio (ARM/SIRM < 1,5%) confirms the substantial share of coarse-grained magnetic fraction in the upper soil of polluted profiles. Slightly increased χ values (and organic matter content) to a depth of about 140 cm, in comparison to unpolluted counterparts, suggest the penetration of Fe-humic complexes into the depth of soil caused by the soil degradation process.

The results demonstrate that magnetic parameters reflect processes occurring in the surface as well as in whole soil profiles. Therefore, magnetic analysis can be successfully implemented to monitor the changes in soil under the influence of various environmental factors, including pollution, and to assess the impact of rapid and unsustainable industrialization on the environment.

Authors' addresses:

Agata Hasso-Agopsowicz¹, Maria Jeleńska¹,
Bogumił Wicik²

¹Instytut Geofizyki
Polska Akademia Nauk
01-452 Warszawa, ul. Ks. Janusza 64
Poland

e-mail: agataha@igf.edu.pl

²Uniwersytet Warszawski
Wydział Geografii i Studiów Regionalnych
ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa
Poland