

**Beata Górka-Kostrubiec**

**Elżbieta Król**

**Maria Teisseyre-Jeleńska**

Polska Akademia Nauk, Instytut Geofizyki, Warszawa

e-mail: kostrub@igf.edu.pl

## **MAGNETOMETRIA JAKO NARZĘDZIE DO OCENY ZANIECZYSZCZEŃ ŚRODOWISKA**

### **Magnetometry as a tool to evaluate the environmental pollution**

**Abstract:** This paper presents the use of magnetometry to study pollution of soil and air. The magnetic method consists in determining the magnetic properties of pollution floating in the air and deposited in the soil, the leaves of trees or household dust in apartments. The method based on the fact that the magnetic particles present in the pollution are associated with heavy metals and toxic trace elements harmful to human health.

The study of traffic pollution was focused on the spatial distribution of pollution in soils along roads in relation to the distance from the edge of road, the area topography and the factors affecting the speed of motor transport (traffic lights, traffic jams, road narrowing, etc.).

The study of air pollution allowed to determine the seasonal correlation between pollution deposited on filters and meteorological parameters such as temperature, humidity and precipitation. Detailed analysis of magnetic susceptibility as an indicator of pollution revealed increasing trend with temperature and absolute humidity in the cold months of the year and the decreasing trend in the warm months. Similar correlations were not observed between the magnetic susceptibility and the precipitation.

The second part presents a study of indoor air pollution based on measurements of dust collected in apartments in different districts of Warsaw. It was found that floor on which dust was taken did not affect the amount and composition of pollution in opposite to vehicle traffic, housing density and way of ventilation. Study shows that the most polluted apartments are in the Center, in the district of Praga Południe, Mokotów and Ursynów located close to the narrow streets with the large vehicle traffic and poor ventilation. Correlation of the magnetic susceptibility with the concentration of heavy metals in household dust is the base for use of susceptibility for monitoring indoor air pollution.

**Słowa kluczowe:** podatność magnetyczna, zanieczyszczenia komunikacyjne, Warszawa

**Key words:** magnetic susceptibility, traffic pollution, Warsaw

## WSTĘP

W ostatnich 20-stu latach metody magnetyczne stosowane dotychczas w badaniach paleomagnetycznych są bardzo intensywnie rozwijane w magnetyzmie środowiskowym, który zajmuje się m.in. badaniami zanieczyszczeń środowiska. Magnetometria jest tanią, dokładną i szybką metodą, którą można wykorzystać do śledzenia zanieczyszczeń w glebach, powietrzu i w wodzie. Zastosowanie metody magnetycznej do oceny zanieczyszczenia środowiska opiera się na pomiarach parametrów magnetycznych zawartych w nim silnie magnetycznych tlenków żelaza, wodorotlenków i siarczków stwarzyszonych z metalami ciężkimi i innymi toksycznymi pierwiastkami lub związkami. Z dotychczasowych badań wiadomo, że podatność magnetyczna i namagnesowanie są dobrym wskaźnikiem poziomu zanieczyszczeń powietrza zewnętrznego i gleby, ponadto zawartość cząstek magnetycznych zanieczyszczeń ściśle koreluje z zawartością pierwiastków i związków szkodliwych dla zdrowia takich jak metale ciężkie czy poliaromatyczne węglowodory PAH (Jordanova i in. 2012).

Najczęściej badanym parametrem jest podatność magnetyczna, która jest czuła na zawartość magnetycznych cząstek w zanieczyszczeniach. Parametry histerezy magnetycznej ( $H_c$ ,  $H_{cr}$ ,  $M_s$ ,  $M_{rs}$ ), zależność podatności od częstotliwości pola magnetycznego ( $\chi_{fd}$ ), bezhisterezowa podatność magnetyczna  $\chi_{ARM}$  oraz pomiary w funkcji temperatury SIRM (T) i  $\kappa(T)$  umożliwiają określenie mineralogii, wielkości i stanu domenowego cząstek magnetycznych oraz na ich podstawie określenia źródeł pochodzenia zanieczyszczeń.

W zurbanizowanych ośrodkach miejskich czynnikiem decydującym o jakości życia mieszkańców jest czystość środowiska, a w szczególności powietrza i gleby. Z tego punktu widzenia ważna jest znajomość przestrzennego i czasowego rozkładu zanieczyszczeń antropogenicznych związanych z bytowaniem i działalnością człowieka. Badania prowadzone przez Hjortenkrans i in. (2007) na obszarze Sztokholmu wykazały, że przy obecnym tempie wzrostu transportu samochodowego w przyszłości ponad 50% całkowitej emisji metali ciężkich i innych pierwiastków toksycznych do powietrza i gleby będzie pochodziło z tzw. niespalinowej emisji zanieczyszczeń: ścieranie się opon samochodowych, klocków hamulcowych, nawierzchni asfaltowej i korozji metalowych części podwozi samochodowych. Wynikająca stąd potrzeba szybkiego monitorowania zanieczyszczeń środowiska miejskiego spowodowała, że pojawia się coraz więcej prac, w których magnetometria jest stosowana do badania zanieczyszczeń atmosferycznych:

- w glebach (Jeleńska i in. 2004, 2008, Magiera i in. 2006),
- na filtrach powietrza (Muxworthy i in. 2001, 2002, 2003, Spassov i in. 2004, Sagnotti i in. 2006, Górka-Kostrubiec i in. 2012b),
- na liściach roślin (Moreno i in. 2003, Szönyi i in. 2007, 2008, Maher i in. 2008, Mitchell i in. 2009),

- na drogach (Gautman i in. 2004, Goddu i in. 2004, Shilton i in. 2005, Bućko i in. 2010, Górka-Kostrubiec i in. 2012a),
- na śniegu (Bućko i in. 2011),
- w roślinach – mchu, porostach (Salo i in. 2012, Fabian i in. 2011)
- w kurzu domowym (Jeleńska i in. 2011, Jordanova i in. 2012, Król i in. 2013).

Celem pracy jest przedstawienie możliwości zastosowania metody magnetycznej do badania: (i) zanieczyszczeń gleby wzdłuż ulic o dużym natężeniu ruchu, (ii) powietrza atmosferycznego na podstawie pomiarów zanieczyszczeń akumulowanych na filtrach powietrza i na liściach drzew oraz (i) jakości powietrza w budynkach mieszkalnych na podstawie pomiarów kurzu domowego.

### **PODATNOŚĆ MAGNETYCZNA GLEBY, JAKO WSKAŹNIK ZANIECZYSZCZEŃ KOMUNIKACYJNYCH W WYBRANYCH LOKALIZACJACH W WARSZAWIE**

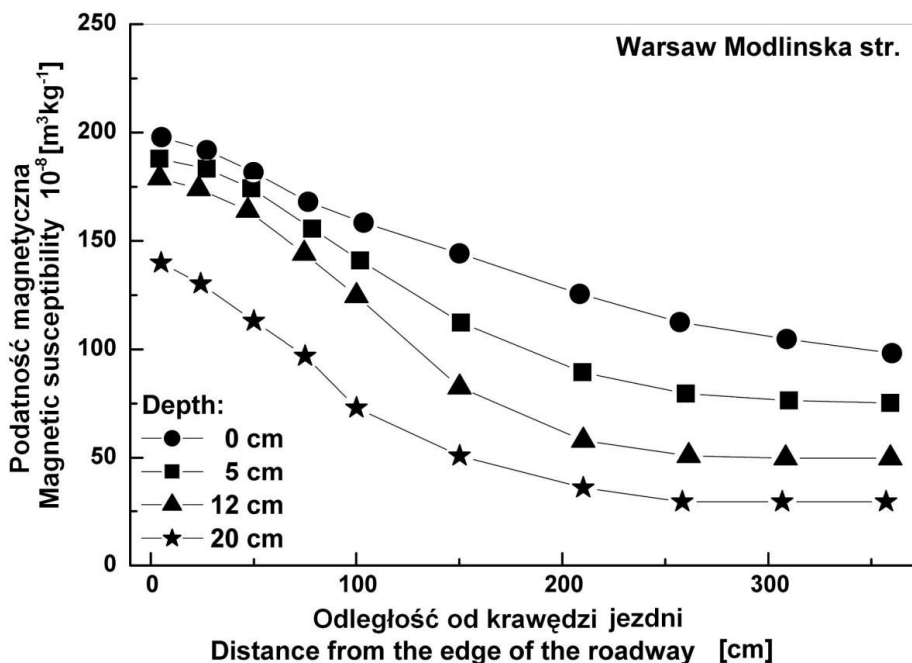
W tym zakresie badań celem było wyznaczenie przestrzennego rozkładu zanieczyszczeń gleb wzdłuż ciągów komunikacyjnych z uwzględnieniem odległości od jezdni, ukształtowania i usytuowania terenu, czynników komunikacyjnych wpływających na ciągłość ruchu pojazdów (sygnalizacja świetlna, korki, zwężenia dróg itp.).

Do badań wybrano trzy stanowiska pomiarowe zlokalizowane na obszarze Warszawy według kryterium ilości przejeżdżających samochodów w ciągu jednej doby. Przy każdym ze stanowisk istniały szerokie pasy zieleni po obu stronach jezdni i pas trawnika rozdzielający oba kierunki ruchu pojazdów. Próby gleby zostały pobrane z powierzchni i z głębokości 5, 12 oraz 20 cm prostopadle do osi jezdni na całej szerokości bocznych pasów trawników oraz w poprzek pasa środkowego.

Na rycinie 1 przedstawiono przykładowe zmiany podatności magnetycznej gleb w zależności od odległości od brzegu jezdni dla próbek pobranych z pasa bocznego przy ulicy Modlińskiej w Warszawie, gdzie natężenie ruchu wynosi około 116000 pojazdów/dobę. Z analizy wykresu wynika, że najwyższe wartości podatności (około  $200 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ) są obserwowane przy brzegu jezdni, po czym wraz z oddalaniem się od brzegu podatność stopniowo maleje.

Przeprowadzone badania wskazują, że zanieczyszczenia komunikacyjne najbardziej kumulują się w wierzchniej warstwie gleby (od 0 do 5 cm) i najsłabiej maleją z odległością. Ze względu na różnorodność czynników wpływających na wielkość zanieczyszczeń komunikacyjnych nie zaobserwowano prostej zależności pomiędzy natężeniem ruchu pojazdów a stopniem zanieczyszczenia gleby wzdłuż głównych dróg. Rozkład zanieczyszczenia gleby jest inny przed skrzyżowaniem niż za skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną. Wynika to z uwalniania się innych cząstek magnetycznych w procesie hamowania niż w procesie przy-

śpieszania. Podobny efekt jak sygnalizacja świetlna daje ukształtowanie terenu. Pojazdy pokonujące wzniesienia wywołują podobne zanieczyszczenia jak pojazdy przyśpieszające po minięciu skrzyżowania.



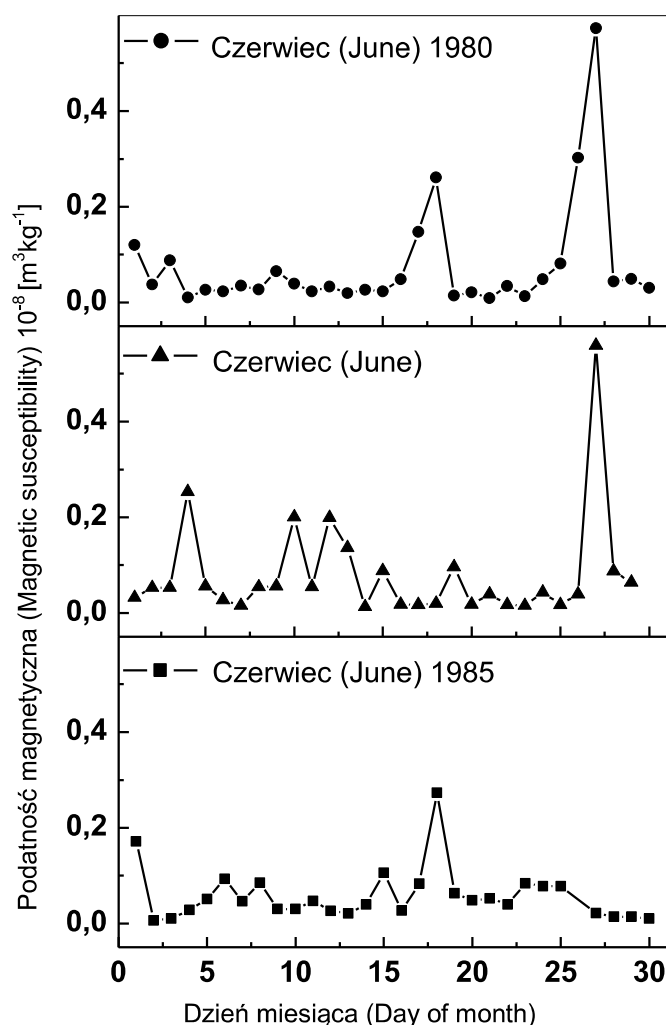
**Ryc. 1.** Zmiany zanieczyszczenia gleb w zależności od odległości od brzegu jezdni dla próbek pobranych z pasa bocznego przy ulicy Modlińskiej w Warszawie wyrażone przez podatność magnetyczną

**Fig. 1.** The cross-sections of horizontal and vertical changes of magnetic susceptibility for soil samples taken in Modlińska Route (Warsaw). The sampling place was located before the cross-roads on the route shoulder of the roadway. Circles (●) – surface; squares (■) depth of 5 cm, triangles (▼) depth of 12 cm, stars (★) depth of 20 cm

## MAGNETOMETRIA JAKO WSKAŹNIK ZANIECZYSZCZENIA POWIETRZA ATMOSFERYCZNEGO

W tym obszarze naszych prac metodę magnetyczną zastosowano do badania zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego na podstawie pomiarów właściwości magnetycznych zanieczyszczeń akumulowanych na filtrach powietrza. Głównym celem badań było wskazanie zależności pomiędzy koncentracją cząstek zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym a sezonowo zmiennymi parametrami meteorologicznymi tj. średnią temperaturą, wilgotnością bezwzględną i ilością opadów, które determinują mechanizm rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń. W badaniach wykorzystano archiwalną kolekcję filtrów powietrza pobraną w Warszawie w latach 1977, 1980, 1981 i 1985. Filtry były zainstalowane na

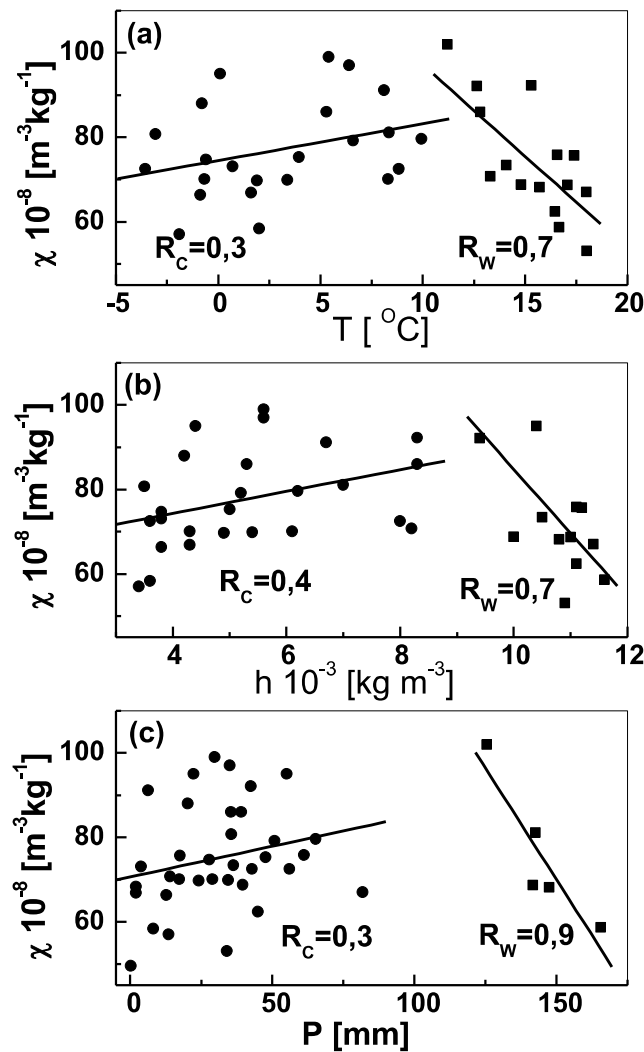
terenie Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Warszawie. Na jednym filtrze w ciągu doby był zbierany całkowity pył atmosferyczny. Dla filtrów wykonano pomiary podatności magnetycznej. Określona w ten sposób masowa podatność magnetyczna koreluje z koncentracją zanieczyszczeń atmosferycznych. Na rycinie 2 przedstawiono przykładowe zmiany podatności magnetycznej dla wybranego miesiąca – czerwca, w latach 1980, 1981 i 1985. Otrzymana baza danych (około 1200 filtrów) pozwoliła określić wpływ warunków meteorologicznych takich jak temperatura, wilgotność bezwzględna powietrza i opad na rozprzestrzenianie się cząstek zanieczyszczenia powietrza w mieście. Na rycinie 3 przedstawiono korelacje pomiędzy podatnością magnetyczną a parametrami meteorologicznymi.



**Ryc. 2.** Zmiany zanieczyszczenia powietrza w kolejnych dniach miesiąca czerwca w latach 1980, 1981 i 1985 w Warszawie wyrażone przez podatność magnetyczną, znormalizowaną przez masę zanieczyszczeń

**Fig. 2.** Changes of magnetic susceptibility of pollution deposited on daily filters during June in 1980, 1981 and 1985 in Warsaw

Sezonowa zależność zmian podatności świadczy o znaczącym wpływie czynników pogodowych na depozycję zanieczyszczeń w Warszawie poprzez zmianę cyrkulacji powietrza i warunków przewietrzania miasta. Lokalne czynniki pogodowe takie jak siła i kierunek wiatru, mgły, inwersje, gwałtowne burze wpływają na krótkotrwałe zmiany. Z badań takich parametrów magnetycznych jak parametry pętli histerezy,  $\chi_{fd}$ ,  $\chi_{ARM}$  czy zmian z temperaturą podatności i namagnesowania nasycenia wynika, że struktura cząstek magnetycznych odzwierciedla do-



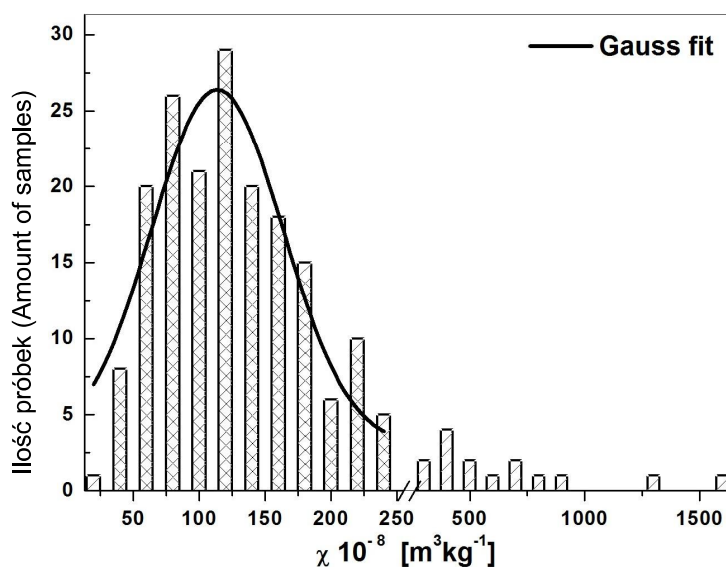
**Ryc. 3.** Zależność podatności magnetycznej od parametrów meteorologicznych: a) temperatury  $T$ , b) bezwzględnej wilgotności  $h$ , i c) ilości opadów  $P$  w Warszawie 1977, 1980, 1981 i 1985. Dane dla zimnych miesięcy roku oznaczono (●), dla ciepłych miesięcy, jako (■). Wewnątrz wykresu zamieszczono odpowiednio współczynniki korelacji  $R_c$  i  $R_w$  dla ciepłych i zimnych miesięcy roku

**Fig. 3.** Magnetic susceptibility versus meteorological parameters: a) temperature  $T$ , b) absolute air humidity  $h$ , and c) precipitation  $P$  in Warsaw in 1977, 1980, 1981 and 1985. The data for cold months denoted as full circles (●) and for warm months denoted as full squares (■). Inside figures the correlation coefficients  $R_c$  and  $R_w$  for cold and warm months, respectively, are listed

minujące na obszarze Warszawy w latach 1977-1981 źródła zanieczyszczeń powietrza takie jak elektrociepłownie, huta, w mniejszym stopniu komunikacja samochodowa. Bieżące badania frakcji magnetycznej pyłu zawieszonego (PM) o średnicy cząstek 10  $\mu\text{m}$  (PM 10) oraz średnicy 2,5  $\mu\text{m}$  (PM 2,5) wskazują, że obecnie dominujący wkład stanowią zanieczyszczenia komunikacyjne i stowarzyszone z nimi metale ciężkie.

### MAGNETOMETRIA, JAKO WSKAŹNIK JAKOŚCI POWIETRZA W BUDYNKACH MIESZKALNYCH NA PODSTAWIE POMIARÓW KURZU DOMOWEGO

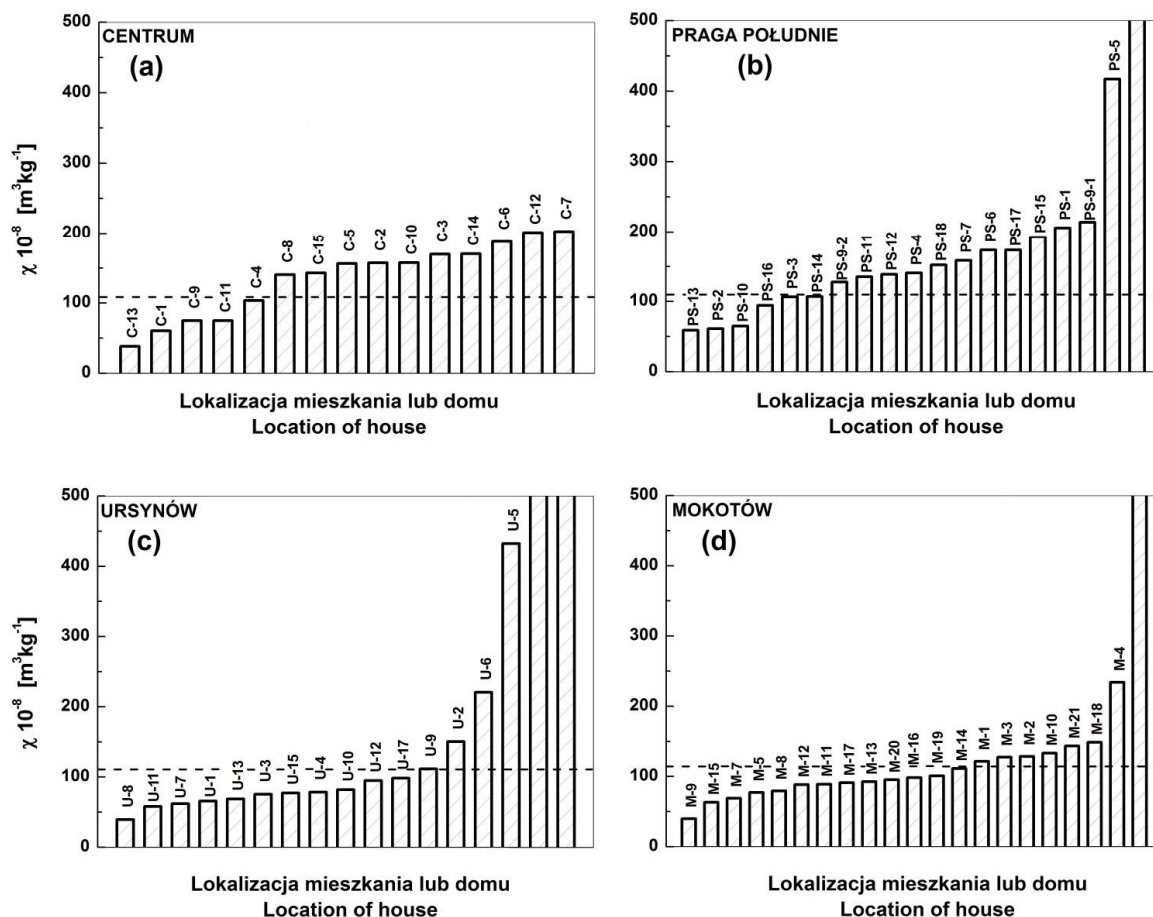
Głównym celem tych badań było zastosowanie metody magnetycznej do określenia poziomu zanieczyszczenia powietrza w pomieszczeniach zamkniętych metalami ciężkimi. Kurz znajdujący się w powietrzu w pomieszczeniach wewnętrznych np. mieszkaniach, szkołach, zakładach pracy, szpitalach itd., wdychany przez ich użytkowników, stanowi źródło zagrożenia dla zdrowia. Podstawą badań było założenie, że istnieje korelacja pomiędzy podatnością magnetyczną a stężeniem metali ciężkich zawartych w kurzu domowym. Materiałem badań były próbki kurzu domowego pobrane z 195 mieszkań w różnych dzielnicach Warszawy, dla których wyznaczono podatność magnetyczną i parametry magnetyczne charakteryzujące strukturę magnetyczną cząstek magnetycznych zawartych w zanieczyszczeniach.



**Ryc. 4.** Rozkład podatności magnetycznej dla badanych lokalizacji na obszarze Warszawy

**Fig. 4.** Histogram of frequencies for magnetic susceptibility data for studied locations in Warsaw

Na rycinie 4 przedstawiono rozkład podatności magnetycznej dla badanych lokalizacji na obszarze Warszawy. Dla próbek o  $\chi$  mniejszym niż  $220 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  rozkład jest normalny tzn. można go opisać funkcją Gaussa. Średnia wartość podatności wyznaczona z tego rozkładu wynosi  $115 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ . W ponad połowie badanych mieszkań poziom zanieczyszczeń, którego wskaźnikiem była podatność magnetyczna próbek kurzu przekracza tą wartość średnią. Z rozkładu podatności dla poszczególnych dzielnic wynika, że dzielnice centralne miasta (Centrum, Praga Południe) są najbardziej zanieczyszczonymi obszarami Warszawy. W większości mieszkań podatność przekracza  $115 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ . Odmienny rozkład jest obserwowany w takich dzielnicach jak Ursynów i Mokotów, gdzie w ponad połowa mieszkań podatność magnetycznej jest niższa niż wartość średnia, ale lokalnie występują mieszkania o bardzo wysokich wartościach podatności (ryc. 5).

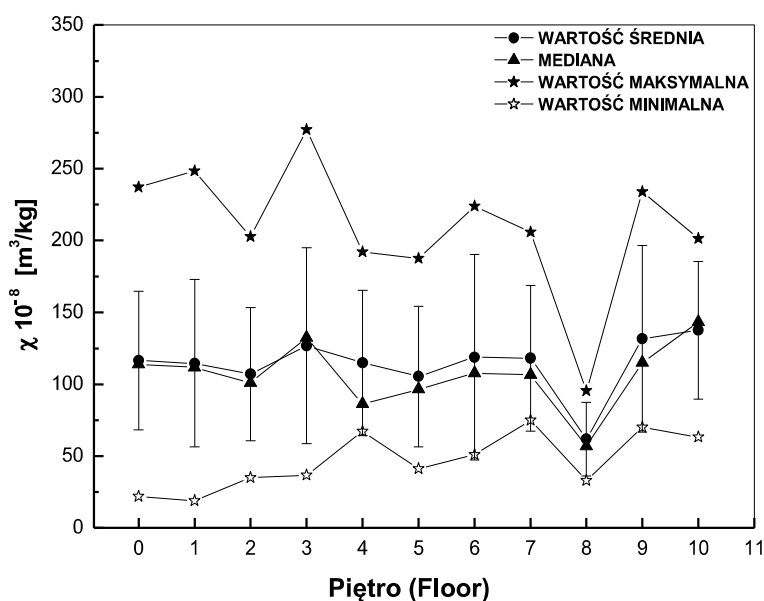


**Ryc. 5.** Rozkład podatności magnetycznej w poszczególnych dzielnicach Warszawy: Centrum (a), Praga Południe (b), Ursynów (c) i Mokotów (d)

**Fig. 5.** Distribution of magnetic susceptibility in Warsaw districts: (a) Centre, (b) Praga Południe, (c) Ursynów and (d) Mokotów

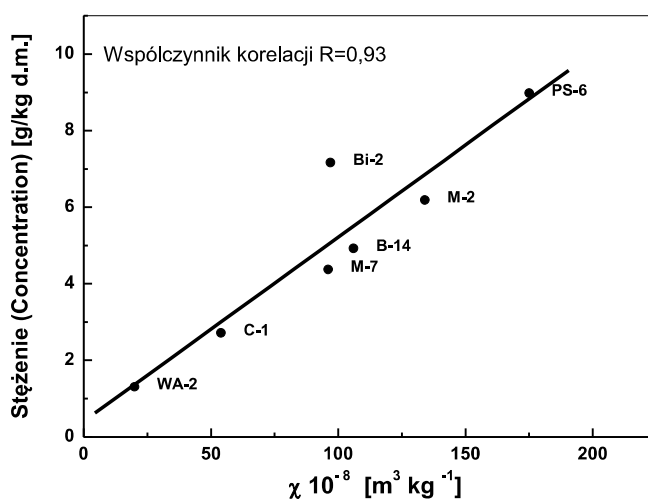


Wyniki badań podatności magnetycznej próbek kurzu domowego wskazują, że piętro, na którym znajduje się mieszkanie nie wpływa na wielkość zanieczyszczenia wewnątrz mieszkania (ryc. 6), natomiast znaczący wpływ ma natężenie ruchu samochodowego, system wietrzenia miasta i gęstość zabudowy. Ponieważ ludność miast większość czasu spędza w pomieszczeniach zamkniętych,



**Ryc. 6.** Zależność podatności magnetycznej od piętra, z którego zostały pobrane próbki kurzu domowego

**Fig. 6.** Dependence of magnetic susceptibility on the floor from which the dust samples were taken; circles (●) – average values, triangles (▲) – median, black stars (\*) – maximal values, white stars (☆) – minimal values



**Ryc. 7.** Korelacja pomiędzy podatnością magnetyczną a stężeniem toksycznych pierwiastków i metali ciężkich zawartych w kurzu domowym

**Fig. 7.** The correlation between magnetic susceptibility and the concentration of toxic elements and heavy metals contained in the household dust

jednym z aspektów naszych badań było wskazanie korelacji pomiędzy wielkościami magnetycznymi (podatnością) a stężeniem metali ciężkich zawartych w kurzu domowym (ryc. 7). Z wykresu widać, że podatność magnetyczna liniowo koreluje z zawartością toksycznych metali ogólnie przyjętych jako szkodliwych dla zdrowia człowieka (Al, As, Be, Ba, Cd, Co, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, V, Zn, Ti).

Rozpoczęte przez nas nowatorskie badania zanieczyszczenia powietrza wewnątrz pomieszczeń mieszkalnych pozwalają na wyznaczenie rozkładu zanieczyszczeń i powiązanie ich z natężeniem ruchu ulicznego. Parametry magnetyczne kurzu domowego wskazują, że zawiera on cząstki pyłu zawieszzonego w powietrzu zewnętrznym i cząstki gleby wnoszonej z zewnątrz przez domowników na obuwiu i odzieży.

## WNIOSKI

Metoda magnetyczna jest bardzo czułym i szybkim narzędziem, do wstępnej identyfikacji i rozpoznania poziomu i źródeł zanieczyszczeń w różnych środowiskach: glebie, powietrzu atmosferycznym, wewnątrz budynków mieszkalnych. Ze względu na liniową korelację parametrów magnetycznych (podatności i namagnesowania) ze stężeniem metali ciężkich zawartych w zanieczyszczeniach metoda magnetometrii może być stosowana do badań zanieczyszczeń środowiska, w szczególności kurzu domowego.

W świetle przedstawionych badań wynika, że istnieje szereg pilnych problemów czekających na rozwiązanie, które powinny być zbadane, aby można było lepiej zrozumieć stan zanieczyszczenia środowiska i wskazać jego główne źródła.

## Literatura

- Bućko M.S., Magiera T., Johanson B., Petrovský E., Pesonen L.J., 2011, Identification of magnetic particulates in road dust accumulated on roadside snow using magnetic, geochemical and micromorphological analyses, *Environ. Pollut.* 159, 1266-1276.
- Bućko M.S., Magiera T., Pesonen L.J., Janus B., 2010, Magnetic, geochemical, and microstructural characteristics of road dust on roadsides with different traffic volumes – case study from Finland, *Water Air Soil. Pollut.* 209, 295-306.
- Fabian K., Reimann C., McEnroe S.A., Willemoes-Wissing B., 2011, Magnetic properties of terrestrial moss (*Hylocomium splendens*) along a north-south profile crossing the city of Oslo, Norway, *Sci. Tot. Environ.* 409, 2252-2260.
- Gautam P., Blaha U., Appel E., Neupane G., 2004, Environmental magnetic approach towards the quantification of pollution in Kathmandu urban area, Nepal, *Phys. Chem. Earth* 29, 973-984.
- 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. *Phys. Chem. Earth* 29, 985-995.

- Górka-Kostrubiec B., Król E., Jeleńska M., 2012a, Podatność magnetyczna jako wskaźnik zanieczyszczeń komunikacyjnych w wybranych lokalizacjach w Warszawie. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej seria „INŻYNIERIA ŚRODOWISKA”* 59, 67-82.
- Górka-Kostrubiec B., Król E., Jeleńska M., 2012b, Magnetic measurements of polluted filters in relation to meteorological conditions – Case study from Warsaw, *Stud. Geophys. Geod.* 56, 861-877.
- Hjortenkrans D.S.T., Bergbäck B.G., Häggerud A.V., 2007, Metal emissions from brake linings and tires—case studies of Stockholm, Sweden 1995/98 and 2005, *Environmental Science and Technology* 41, 5224–5230.
- Jeleńska M., Hasso-Agopsowicz A., Kadzialko-Hofmokl M., Kopcewicz B., Sukhorada A., Bondar K., Matviishina Zh., 2008, Magnetic structure of the polluted soil profiles from eastern Ukraine, *Acta Geophys.* 56, 1043-1064.
- Jeleńska M., Hasso-Agopsowicz A., Kopcewicz B., Sukhorada A., Tyamina K., Kądziałko-Hofmokl M., Matviishina Z., 2004, Magnetic properties of the profiles of polluted and non-polluted soils. A study case from Ukraine, *Geophys. J. Int.* 159, 104–116.
- Jeleńska M., Górka-Kostrubiec B., Król E., 2011, Magnetic properties of dust as indicators of indoor air pollution: preliminary results. in: *Management of Indoor Air Quality –Dudzińska (ed) Taylor & Francis Group, London*, 129-136.
- Jordanova D., Jordanova N., Lanos Ph., Petrov P., Tsacheva T., 2012, Magnetism of outdoor and indoor settled dust and its utilization as a tool for revealing the effect of elevated particulate air pollution on cardiovascular mortality, *Geochem. Geophys. Geosyst.* 13, Q08Z49, doi:10.1029/2012GC004160.
- Magiera T., Strzyszczyk Z., Kapička A., Petrovsky E., 2006, Discrimination of lithogenic and anthropogenic influence on topsoil magnetic susceptibility in Central Europe. *Geoderma* 130, 279-311.
- Król E., Górka-Kostrubiec B., Jeleńska M., 2013, The magnetometric study of indoor air pollution inside flats located in Warsaw and its suburbs, [w:] A. Pawłowski, M. Dudzińska & L. Pawłowski (red.), *Environmental Engineering IV*, - Taylor & Francis Group, London, 323-329.
- Maher B.A., Mooreb C., Matzkac J., 2008, Spatial variation in vehicle-derived metal pollution identified by magnetic and elemental analysis of roadside tree leaves, *Atmos. Environ.* 42, 364-373.
- Mitchell R., Maher B., 2009, Evaluation and application of biomagnetic monitoring of traffic-derived particulate pollution, *Atmos. Environ.* 43, 2095-2103.
- Moreno E., Sagnotti L., Dinarès-Turell J., Winkler A., Cascella A., 2003, Biomonitoring of traffic air pollution in Rome using magnetic properties of tree leaves, *Atmos. Environ.* 37, 2967-2977.
- Muxworthy A.R., Matzka J., Petersen N., 2001, Comparison of magnetic parameters of urban atmospheric particulate matter with pollution and meteorological data, *Atmos. Environ.* 35, 4379-4386.
- Muxworthy A.R., Matzka J., Davila A.F., Petersen N., 2003, Magnetic signature of daily sampled urban atmospheric particles, *Atmos. Environ.* 37, 4163-4169.
- Muxworthy A.R., Schmidbauer E. Petersen N., 2002, Magnetic properties and Mössbauer spectra of urban atmospheric particulate matter: a case study from Munich, Germany, *Geophys. J. Int.* 150, 558-570.
- Sagnotti L., Macri P., Egli R. Mondino M., 2006, Magnetic properties of atmospheric particulate matter from automatic air sampler stations in Lariano (Italy): Toward a definition of magnetic fingerprints for natural and anthropogenic PM10 sources, *J. Geophys. Res.* 111, B12S22, DOI: 10.1029/2006JB004508.

- Salo H., Bućko M.S., Vaahtovuori E., Limo J., Mäkinen J., Pesonen L.J., 2012, Biomonitoring of air pollution in SW Finland by magnetic and chemical measurements of moss bags and lichens. *Journal of Geochemical Exploration* 115, 69–81.
- Shilton V.F., Booth C.A., Smith J.P., Giess P., Mitchell D.J. Williams C.D., 2005, Magnetic properties of urban street dust and their relationship with organic matter content in the West Midlands, UK, *Atmos. Environ.* 39, 3651-3659.
- Spasov S., Egli R., Heller F., Nourgaliev D.K. Hannam J., 2004, Magnetic quantification of urban sources in atmospheric particulate matter, *Geophys. J. Int.* 159, 555-564.
- Szönyi M., Sagnotti L., Hirt A.M., 2007, On leaf homogeneity in particulate matter biomonitoring studies, *Geophys. Res. Lett.* 34, L06306, DOI: 10.1029/2006GL029076.
- Szönyi M., Sagnotti L. Hirt A.M., 2008, A refined biomonitoring study of airborne particulate matter pollution in Rome, with magnetic measurements on Quercus Ilex tree leaves, *Geophys. J. Int.* 173, 127-141.