

WPŁYW HISTORYCZNEJ EKSPLOATACJI RUD CYNKOWO-OŁOWIOWYCH ORAZ HUTNICTWA ŻELAZA I CYNKU NA ZANIECZYSZCZENIE GLEB W CENTRALNEJ CZĘŚCI GÓRNOŚLĄSKIEGO OKRĘGU PRZEMYSŁOWEGO

SOIL CONTAMINATION INDUCED BY HISTORICAL ZINC-LEAD ORE MINING AND IRON AND ZINC SMELTING IN THE CENTRAL PART OF THE UPPER SILESIA INDUSTRIAL REGION (SOUTHERN POLAND)

ANNA PASIECZNA¹

Abstrakt. Celem pracy było określenie stopnia kumulacji metali ciężkich, arsenu i siarki w glebach centralnej części Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego. Przemysł ciężki, eksploatacja rud metali i węgla kamiennego, hutnictwo żelaza i metali nieżelaznych oraz prowadzenie ścieków przemysłowych i komunalnych są przyczyną silnej degradacji środowiska przyrodniczego tego obszaru. Zbadano zawartość 21 pierwiastków: Ag, Al, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mg, Mn, Ni, P, Pb, S, Sr, Ti, V i Zn, a zanieczyszczenie gleb oceniono na podstawie wartości wskaźników zanieczyszczenia, wskaźników wzbogacenia i wskaźników geoakumulacji. Testy te wykazały podwyższoną zawartość metali, arsenu i siarki, znacznie przekraczającą poziomy regionalnego tła geochemicznego. Analiza czynnikowa umożliwiła połączenie pierwiastków chemicznych w grupy, prawdopodobnie pochodzące z tych samych źródeł litologicznych lub/i antropogenicznych.

Słowa kluczowe: metale, arsen, siarka, zanieczyszczenie gleb, Góry Śląsk (południowa Polska).

Abstract. The purpose of the work was to determine the degree of accumulation of heavy metals, arsenic and sulphur in the soils of the central part of the Upper Silesian Industrial Region. Heavy industry, mining of metal ores and hard coal, iron and non-ferrous metallurgy as well as the discharge of industrial and municipal sewage caused a strong degradation of the natural environment of this area. The content of twenty one elements (Ag, Al, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, S, Sr, Ti, V and Zn) have been assayed in the soils of central part Upper Silesian Industrial Region. The contamination of the soils was assessed on the basis of contamination factors, enrichment factors and geoaccumulation indexes. The tests revealed elevated content of metals, arsenic and sulphur exceeding the levels of the regional geochemical background. Factor analysis made it possible to combine chemical elements into groups, probably derived from the same lithological or/and anthropogenic sources.

Key words: metals, arsenic, sulphur, soil pollution, Upper Silesia (southern Poland).

WSTĘP

Eksploatacja rud metali i hutnictwo przyczyniają się do zanieczyszczenia środowiska przyrodniczego w wielu regionach świata, a do największych zagrożeń należy oddziaływanie odpadów po tej działalności (Fuge i in., 1993; Swennen i in., 1994; Adamo i in., 2002; Cappuyns i in., 2005; Navarro i in., 2006; Acosta i in., 2011). Mimo konkurencji tworzyw

sztucznych stal jest ciągle najważniejszym materiałem konstrukcyjnym, a przemysł stalowy odgrywa ważną rolę w gospodarce wielu krajów, chociaż jest to sektor charakteryzujący się dużym zużyciem energii oraz emisją zanieczyszczeń gazowo-pyłowych (Burchart-Korol, 2010). Metale ciężkie i inne pierwiastki, szkodliwe dla ekosystemów i zdrowia ludzi, przenikają do gleb w wyniku wietrzenia odpadów metalurgicznych i produktów ubocznych oraz zrzutu ścieków prze-

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; e-mail: anna.pasieczna@pgi.gov.pl.

mysłowych do zbiorników wodnych (Paulson, 1997; Gäbler, Schneider, 2000; Alloway, 2012).

Szczególnie niebezpieczne jest zanieczyszczenie gleb w obrębie miejskich dzielnic mieszkaniowych sąsiadujących z terenami, na których działają lub działały kopalnie rud metali oraz huty żelaza i metali nieżelaznych (Basta i in., 2001; Basta, McGowen, 2004; Nachtegaal i in., 2005; Kaczenko, Singh, 2006; Pelfrène i in., 2011). Badania przeprowadzone na tych terenach udowodniły zanieczyszczenie środowiska wieloma pierwiastkami i substancjami stwarzającymi ryzyko dla zdrowia ludzi i zwierząt (Everhart i in., 2006; Filippelli, Laidlaw, 2010; Nannoni i in., 2011). Kumulacja toksycznych pierwiastków w glebie wpływa szczególnie niekorzystnie na rozwój mikroorganizmów glebowych, znacząco pogarszając warunki upraw (Fernandez-Turiel i in., 2001; Cui i in., 2004; Friesl-Hanl i in., 2009; Nagajyoti i in., 2010). Udowodniono szkodliwe oddziaływanie arsenu, chromu, niklu, rtęci, kadmu, miedzi, ołowiu, cynku i wielu związków organicznych zawartych w rudach i surowcach pomocniczych hutnictwa, tak jak np. koks (Allo-

way, 2012; Filippelli i in., 2012). Mobilność i dostępność metali ciężkich, zawartych w składnikach gleb, zależy od formy ich związania (Kabata-Pendias, Mukherije, 2007). W glebach zanieczyszczonych antropogenicznie charakterystyczne i bardzo szkodliwe jest występowanie 30–60% metali ciężkich w formach łatwo dostępnych (Karczewska i in., 1998).

Celem prezentowanej pracy było określenie stopnia kumulacji metali ciężkich, arsenu i siarki w glebach centralnej części Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego (GOP). Analizowany obszar obejmuje dzielnice Zabrze na zachodzie, Bytomia – na północy, Rudy Śląskiej i Świętochłowic – w centrum oraz Chorzowa, Siemianowic Śląskich i Katowic – na wschodzie (fig. 1). Przez kilka stuleci eksploatowano tu rudy cynku i ołowiu, prowadzono wytop ołowiu, cynku i żelaza, produkowano stal, wydobywano na wielką skalę węgiel kamienny oraz spalano go w elektrowniach i przetwarzano w koksowniach. Koncentrację metali w glebach powodowało też trwające od tysiącleci wietrzenie odsłaniających się skał z mineralizacją cynkowo-ołowiową i procesy glebotwórcze.

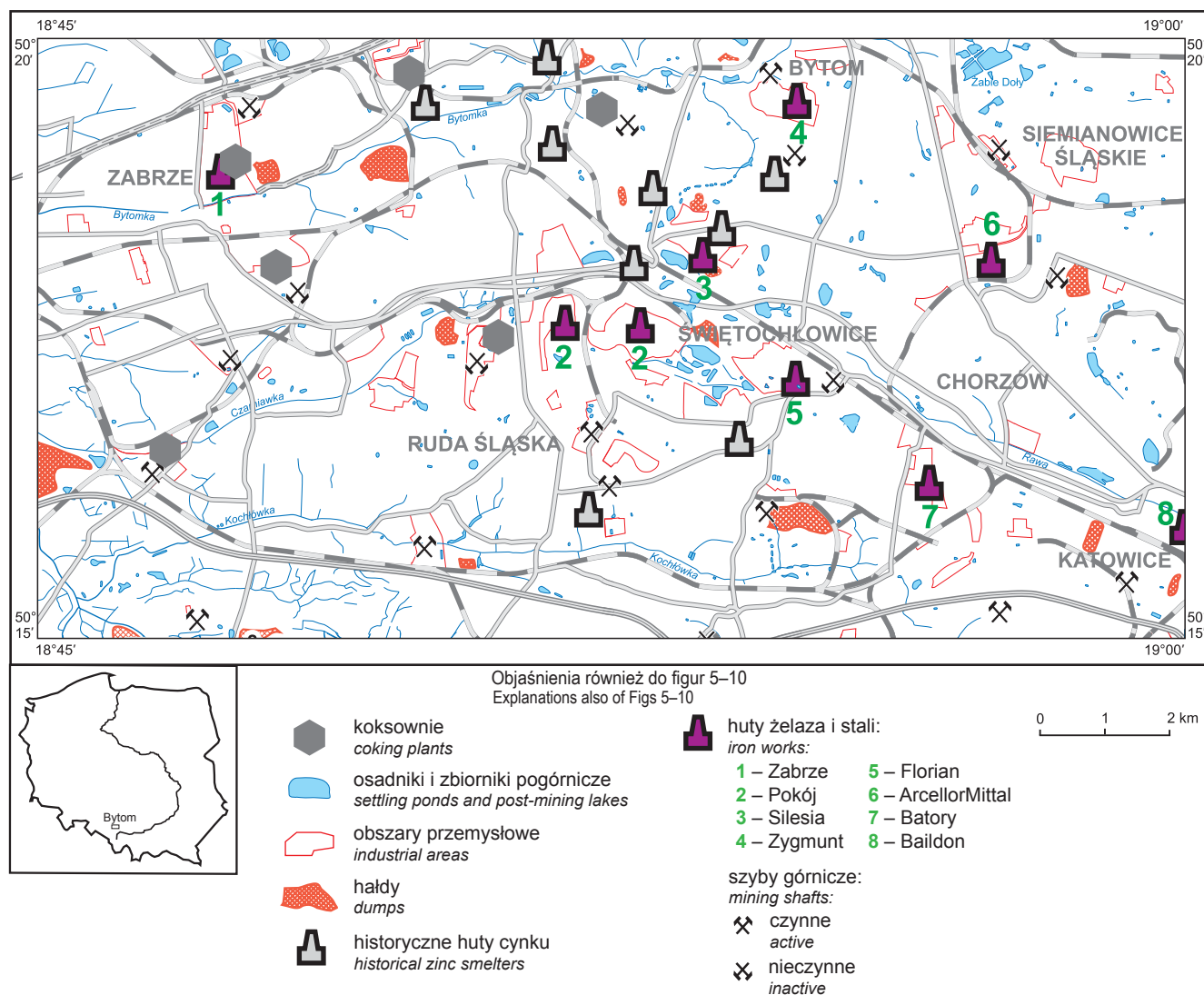


Fig. 1. Obszar badań

The area of research

W XIX w. największą rolę w gospodarce regionu odgrywało górnictwo i hutnictwo rud cynkowo-olowiowych (Zmiana...), a przez cały XX w. – hutnictwo żelaza, które znajdowało się w czołówce europejskiej pod względem rozwoju technologicznego. Na początku lat 90. ubiegłego wieku podjęto proces restrukturyzacji hutnictwa żelaza (Szulc, 2013) i eksploatacji węgla kamiennego, ale pozostawione zwały skał płonnych, żużli hutniczych i innych odpadów składowanych w bezpośrednim sąsiedztwie hut i osiedli powodują przenikanie obcych komponentów do gleb i wód. Ich obecność w środowisku powierzchniowym zaznacza się wyraźnie nawet kilkaset lat od zaprzestania działalności, a szkodliwe pierwiastki i związki chemiczne mogą powodować negatywne skutki w środowisku aglomeracji o największej gęstości zaludnienia w kraju (370 osób/km² w porównaniu do średniej krajowej 124 osób/km²). Duże powierzchnie analizowanego obszaru pokrywają gleby antropogeniczne o znacznej miąższości (Michalik, 2003; Sordoń-Kulibaba, 2010) występujące na terenach przemysłowych, na zrehabilitowanych obszarach poprzemysłowych lub na terenach poeksploatacyjnych pozostawionych naturalnej sukcesji roślinnej. Często gleby te powstawały na materiale skalnym o zupełnie innych właściwościach niż ten, na którym rozwijała się pierwotna pokrywa glebowa. Przykładem mogą być gleby tworzące się na miejscach biedaszybów – czyli na materiale wydobytym z głębszych warstw podłoża. Gleby antropogeniczne pokrywają powierzchnie sztucznych skarp, zrehabilitowanych hałd oraz niektórych ogródków działkowych, a także koryta rzeczne przekształconych cieków (Duriasz, Cupiał, 2009).

GEOLOGIA I ZŁOŻA

Prezentowany rejon należy do północnej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW), gdzie trzon budowy geologicznej stanowią utwory karbonu tworzące wielkopromienne kopuły waryscyjskie pocięte uskokami. Zalegają na nich skały osadowe triasu, neogenu i czwartorzędu (Wyczółkowski, 1957; Buła, Kotas, 1994; Wilanowski i in., 2009; Pasieczna i in., 2016). Eksploatowane w przeszłości złoża rud cynku i ołowiu, występujące w dolomitach kruszczonośnych triasu, należały do największych i najbogatszych w skali świata (Szuwarzyński, 1996; Paulo, Strzelska-Smakowska, 2000). W rejonie Chorzowa Starego i Maciejkowic (w północno-wschodniej części analizowanego obszaru) dolomity tworzą wychodnie. Na tym terenie już od początku XII w. wydobywano rudy srebra i ołowiu, a w innych miejscach także darniowe rudy żelaza zarówno metodami odkrywkowymi, jak i za pomocą płytkich szybów (Molenda 1960, 1963, 1970; Grzechnik, 1978; Jaworska-Cygorijni, 1989; Breguła, 2015; Historia Chorzowa; Historia miasta), a ślady starych wyrobisk górniczych i zwałowisk pogórnich są spotykane do czasów współczesnych (Molenda, 1972; Grzechnik, 1978).

Eksploatowano rudy siarczkowe i utlenione o prostym i stabilnym składzie mineralnym. W rudach siarczkowych głównym minerałem cynku był sfaleryt, podstawowym minerałem ołowiu – galena, a żelaza – markasyt i piryt (Górecka, 1996;

Sass-Gustkiewicz, 1997). Śladowo występują siarkosole ołowiu-arsenowe: jordanit i gratonit (Harańczyk, 1962; Ziętek-Kruszewska, 1978; Cabała, 1996, 2009; Górecka, 1996; Viets i in., 1996). Płonne składniki rud to węglany, krzemionka i minerały ilaste (Cabała, 2009). W minerałach kruszczonych są związane liczne pierwiastki śladowe. Siarczek cynku zawiera kadm, srebro, kobalt, miedź, tal i german, zaś galeny są na ogół srebronośne (Harańczyk, 1962; Ekiert, 1971). Rudy zawierają też związki arsenu i antymonu. Zawartość kadmu w sfalerytach złóż śląsko-krakowskich osiąga 5 000–10 000 mg/kg (Viets i in., 1996; Cabała, 2009). Siarczki żelaza mogą zawierać do 1000 mg/kg talu i ok. 500 mg/kg arsenu (Cabała, Konstantino-wicz, 1999; Paulo, Strzelska-Smakowska, 2000). Srebro występuje w sieci krystalicznej wszystkich siarczków, ale najczęściej wiąże się z galeną – do 180 mg/kg.

Głównymi składnikami złóż utlenionych (galmanów) są węglanowe minerały cynku (smitsonit, monheimit) i ołowiu (cerusyt). Towarzyszą im skupienia limonitu, niekiedy minerały siarczanowe (jarosyt, melanteryt), hydrocynkit i kalcyt (Żabiński, 1960; Cabała, 2009). W północno-zachodniej części omawianego obszaru zarówno wśród rud siarczkowych, jak i galmanów oraz w szczelinach skał karbonu odnotowano baryt (Galkiewicz, Śliwiński, 1985).

MATERIAŁ I METODY

W latach 2013–2014 z prezentowanego obszaru pobrano próbki gleb w regularnej siatce 250 × 250 m (2806 z warstwy 0,0–0,3 m oraz 2242 z warstwy 0,8–1,0 m). Gleby były suszone w temperaturze pokojowej i przesiewane przez sита nylonowe o oczkach o średnicy 2 mm, a następnie ucierane do frakcji <0,06 mm w agatowych młynach kulowych. Roztworzenie próbek przeprowadzono w wodzie królewskiej (przez godzinę w temp. 95°C w termostatowanym bloku aluminiowym). Oznaczenia zawartości wybranych pierwiastków śladowych (Ag, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn, Sr, Ti, V i Zn) oraz głównych (Al, Ca, Fe, Mg, P i S) wykonano za pomocą spektrometrii emisyjnej ze wzbudzeniem plazmowym (ICP-AES). Analizy Hg (należącej do pierwiastków śladowych) przeprowadzono metodą spektrometrii absorpcji atomowej z techniką zimnych par (CV-AAS) z systemem przepływowym FIAS-100.

Kontrolę jakości oznaczeń prowadzono, wykonując analizę próbek podwójnych (5% ogólnej liczby próbek), analizę materiałów odniesienia z atestowaną zawartością badanych pierwiastków (2% ogólnej liczby próbek) oraz analizę wewnętrznych próbek kontrolnych potwierdzających prawidłowe wykonywanie pomiarów instrumentalnych (5% ogólnej liczby próbek). Czystość odczynników i naczyń kontrolowano za pomocą „ślepych próbek odczynnikowych” i „ślepych próbek proceduralnych”. Niepewność rozszerzona wyników (przy założonym poziomie prawdopodobieństwa 95% i współczynnika rozszerzenia $k = 2$) nie przekraczały 25%.

Do analizy wyników zawartości badanych pierwiastków w glebach zastosowano metody statystyczne, obliczając: minimum, maksimum, średnią, medianę, odchylenie standardowe

Tabela 1

Parametry statystyczne zawartości pierwiastków w glebach z głęb. 0,0–0,3 m

Statistical parameters of element contents in topsoil (0.0–0.3 m)

Pierwiastek	Min.	Maks.	Med ₁	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności CV [%]	Regionalne tło geochemiczne *Med ₁	Med ₁ /*Med ₁
	N = 2806						N = 22 663	
Sr [mg/kg]	1	806	33	51	59	116	9	3,67
Ca [%]	<0,01	27,61	0,53	0,99	1,42	143	0,16	3,31
Zn [mg/kg]	8	55 460	479	1024	2678	262	164	2,92
Ba [mg/kg]	4	1830	172	221	169	76	59	2,92
Cu [mg/kg]	1	13 230	26	53	307	579	9	2,89
Co [mg/kg]	<1	218	5	6	6	100	2	2,50
Mg [%]	<0,01	6,38	0,16	0,26	0,39	150	0,07	2,29
Ni [mg/kg]	<1	433	13	18	22	122	6	2,17
Mn [mg/kg]	3	42 380	515	868	1956	225	242	2,13
Fe [%]	0,05	34,30	1,40	1,82	1,89	104	0,69	2,03
Hg [mg/kg]	<0,05	23,44	0,10	0,19	0,68	358	0,05	2,00
Pb [mg/kg]	4	54 940	137	307	1398	455	72	1,90
Cr [mg/kg]	<1	1317	15	26	56	215	8	1,88
S [%]	<0,003	8,790	0,038	0,074	0,258	349	0,022	1,73
As [mg/kg]	<3	5288	10	26	149	573	6	1,67
V [mg/kg]	1	225	19	22	17	77	12	1,58
Cd [mg/kg]	<0,5	389	3	6	16	266	2	1,50
P [%]	<0,003	0,510	0,041	0,050	0,041	82	0,028	1,46
Al [%]	0,05	4,33	0,64	0,67	0,29	43	0,49	1,31
Ti [mg/kg]	7	4086	96	126	145	115	74	1,30
Ag [mg/kg]	<1	97	<1	<1	3	–	<1	–
Mo [mg/kg]	<0,5	93,7	0,7	1,4	4,3	307	<0,5	–
Sn [mg/kg]	<2	701	2	5	17	340	<2	–

* Med₁ (wg Szczegółowej mapy geochemicznej Górnego Śląska, 1999–2016)

i współczynnik zmienności. Wartości median pierwiastków na badanym obszarze porównano z wartościami ich median w regionie śląsko-krakowskim (przybliżonym poziomem tła geochemicznego) (tab. 1 i 2). Zróżnicowanie wartości współczynnika zmienności (CV) wykorzystano do wydzielenia dwóch grup pierwiastków, które mogą pochodzić głównie ze źródeł naturalnych lub antropogenicznych (tab. 3).

Próbie oceny antropogenicznego zanieczyszczenia gleb przeprowadzono z zastosowaniem metod statystycznych przyjętych w geochemii środowiska, obliczając wskaźniki zanieczyszczenia CF (*Contamination Factors*) i wskaźniki geoakumulacji (I_{geo} *indexes*) powierzchniowej warstwy gleb oraz wskaźniki wzbogacenia EF (*Enrichment Factors*) poszczególnych pierwiastków w glebach z dwóch zakresów głębokości.

Wskaźniki zanieczyszczenia CF obliczono wg formuły:

$$CF = C/C_r$$

gdzie:

C – mediana zawartości pierwiastka w próbkach z analizowanego obszaru;

C_r – regionalne tło geochemiczne pierwiastka – mediana zawartości pierwiastka w glebach niezanieczyszczonych (z głęb. 0,0–0,8 m).

Zanieczyszczenie jest klasyfikowane w czterostopniowej skali: CF < 1 – niskie, 1 ≤ CF < 3 – umiarkowane, 3 ≤ CF < 6 – wysokie i CF ≥ 6 – bardzo wysokie (Hakanson, 1980; Loska i in., 2004).

Wskaźnik geoakumulacji I_{geo} uznano za miernik zanieczyszczenia osadów (Müller, 1969), ale znajduje też zastosowanie do określenia stanu gleb (Loska i in., 2004; Barbieri, 2016):

$$I_{geo} = \log_2(A/1,5 \times B)$$

gdzie:

A – zawartość pierwiastka w próbce;

B – regionalne tło geochemiczne pierwiastka.

Współczynnik 1,5 w formule jest wprowadzony w celu zniwelowania zmienności tła geochemicznego związanego z litologią. Wskaźniki geoakumulacji są interpretowane następująco:

- $I_{geo} \leq 0$ – gleby niezanieczyszczone;
- $0 < I_{geo} < 1$ – gleby niezanieczyszczone do umiarkowanie zanieczyszczonych;
- $1 < I_{geo} < 2$ – gleby umiarkowanie zanieczyszczone;
- $2 < I_{geo} < 3$ – gleby umiarkowanie do silnie zanieczyszczonych;
- $3 < I_{geo} < 4$ – gleby silnie zanieczyszczone;

Tabela 2

Parametry statystyczne zawartości pierwiastków w glebach z głęb. 0,8–1,0 m

Statistical parameters of element contents in subsoil (0.8–1.0 m)

Pierwiastek	Min.	Maks.	Med ₂	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności CV [%]	Regionalne tło geochemiczne *Med ₂	Med ₂ /*Med ₂
	N = 2242						N = 19 307	
Ca [%]	<0,01	16,60	0,20	0,75	1,41	188	0,05	4,00
Sr [mg/kg]	1	921	14	37	64	173	4	3,50
Mn [mg/kg]	3	37 100	247	519	1357	261	72	3,43
Zn [mg/kg]	3	88 120	108	720	3445	478	33	3,27
Cu [mg/kg]	1	2772	11	28	86	307	4	2,75
Pb [mg/kg]	1	17 890	30	172	812	472	11	2,73
Fe [%]	0,02	20,43	1,06	1,37	1,49	109	0,41	2,59
Ba [mg/kg]	9	1869	72	150	194	129	28	2,57
Mg [%]	<0,01	9,33	0,12	0,21	0,47	224	0,05	2,40
Cr [mg/kg]	1	1638	12	17	45	265	5	2,40
Ni [mg/kg]	1	587	9	14	22	157	4	2,25
P [%]	<0,003	0,600	0,019	0,028	0,035	125	0,009	2,11
Co [mg/kg]	1	61	4	5	4	80	2	2,00
S [%]	<0,003	5,960	0,012	0,053	0,214	404	0,006	2,00
V [mg/kg]	1	268	15	17	14	82	8	1,88
Al [%]	0,07	2,50	0,60	0,78	2,88	369	0,40	1,50
Cd [mg/kg]	<0,5	369,8	0,7	4	18	450	0,5	1,40
Ti [mg/kg]	19	2480	89	116	101	87	69	1,29
Ag [mg/kg]	<1	86	<1	<1	3	–	<1	–
As [mg/kg]	<3	5300	4	17	133	782	<3	–
Hg [mg/kg]	<0,05	23,04	<0,05	0,14	0,70	500	<0,05	–
Mo [mg/kg]	<0,5	74,1	<0,5	0,8	3,0	375	<0,5	–
Sn [mg/kg]	<2	361	<2	3	13	433	<2	–

*Med₂ (wg Szczegółowej mapy geochemicznej Górnego Śląska, 1999–2016)

- $4 < I_{geo} < 5$ – gleby silnie do ekstremalnie zanieczyszczonych;
- $5 < I_{geo}$ – gleby ekstremalnie zanieczyszczone (Loska i in., 2004).

Wskaźniki wzbogacenia EF obliczono dla gleb z dwóch zakresów głębokości zgodnie z formułą:

$$EF = (A/A_{Ti}) / (B/B_{Ti})$$

gdzie:

A – zawartość pierwiastka w analizowanej próbce;

A_{Ti} – zawartość pierwiastka odniesienia (tytanu) w analizowanej próbce;

B – regionalne tło geochemiczne pierwiastka;

B_{Ti} – regionalne tło geochemiczne pierwiastka odniesienia (tytanu).

Przyjmuje się, że wartość EF wynosząca ok. 1 świadczy o geogenicznym pochodzeniu pierwiastka. Wartości w zakresach 1,5–3; 3–5; 5–10 i > 10 wskazują odpowiednio na małe, umiarkowane, silne i bardzo silne zmiany w środowisku i inne niż naturalne pochodzenie pierwiastka (Blaser i in., 2000; Sutherland i in., 2000; Zhang, Liu 2002; Loska i in., 2004).

Do wskazania źródeł anomalii pierwiastków (litogenicznych, antropogenicznych i mieszanych) bardzo przydatnymi

narzędziami są metody statystyczne umożliwiające zgrupowanie pierwiastków o podobnym przypuszczalnym pochodzeniu (Lis, Pasieczna, 2005; Lu i in., 2012; Guo-Li i in., 2013). Jedną z nich jest analiza czynnikowa pozwalająca na określenie wzajemnych zależności między analizowanymi pierwiastkami i redukcję zmiennych do ich mniejszej liczby – czynników (Wieczorkowska, Wierziński, 2011; Czopek, 2013; Łomnicki, 2016). Stosując matryce uzyskane po rotacji Varimax, wyróżniono w zbiorach próbek gleb z głęb. 0,0–0,3 m oraz 0,8–1,0 m po sześć czynników o wartości własnej > 1, istotnych do in-

Tabela 3

Współczynniki zmienności zawartości pierwiastków

Coefficient of variation of elemental contents

Współczynnik zmienności CV [%]	Gleby	
	0,0–0,3 m	0,8–1,0 m
<100	Al, Ba, V, P	Co, V, Ti
100–200	Co, Fe, Ti, Sr, Ni, Ca, Mg	Fe, P, Ba, Ni, Sr, Ca
200–300	Cr, Mn, Zn, Cd	Mg, Mn, Cr
>300	Mo, Sn, S, Hg, Pb, As, Cu	Cu, Al, Mo, S, Sn, Cd, Pb, Zn, Hg, As

Tabela 4

Analiza czynnikowa – wartości własne wydzielonych czynników

Factor analysis – eigenvalues of separated factors

Czynnik	Gleby			
	0,0–0,3 m		0,8–1,0 m	
	pierwiastek	% wariacji	pierwiastek	% wariacji
F1	Ba, Sr, P, Al	31,20	Ba, Sr, P, Al, Co, V, Fe, Ti	33,49
F2	As, Cd, Pb, Zn, Ag, S	13,01	As, Cd, Pb, Zn, Ag, S	14,32
F3	Cr, Mo, Ni, Fe	7,38	Cr, Mo, Ni	8,49
F4	Cu, Sn	6,43	Ca, Mg	6,14
F5	Ca, Mg, V	4,97	Cu, Ag, Sn	5,11
F6	Hg, Mn	4,54	Hg	4,37
Skumulowany % wariacji	–	67,53	–	72,92

Ładunki czynnikowe >0,7; ładunki czynnikowe >0,5

terpretacji wyników. Czynniki te odpowiadają za 67,53% korelacji w obrębie powierzchniowej warstwy gleb oraz 72,92% korelacji w warstwie głębszej (tab. 4). Rozkład przestrzenny trzech z wydzielonych czynników w glebach z warstwy 0,0–0,3 m oraz 0,8–1,0 m przedstawiono na mapach opracowanych z zastosowaniem krigingu jako metody interpolacji i percentyli do wyznaczenia klas rozkładu czynników.

DYSKUSJA WYNIKÓW

Wysoka zawartość analizowanych metali, arsenu i siarki oraz przestrzenne rozmieszczenie anomalii w glebach pozwala na powiązanie ich źródeł z działalnością przemysłu (głównie historycznych kopalń rud Zn-Pb oraz hut metali). Część pierwiastków może też pochodzić z wietrzenia odsłaniających się (lub zalegających pod niewielkim przykryciem) eksploatowanych w przeszłości dolomitów kruszczoonych i zawartych w nich rud Zn-Pb.

Porównanie wartości median badanych pierwiastków w granicach analizowanego obszaru do wartości tła geochemicznego w regionie śląsko-krakowskim (tab. 1 i 2) wskazuje na ich wyraźną koncentrację w omawianych glebach. W warstwie wierzchniej gleb zanotowano ponad/lub prawie trzykrotne wzbogacenie w stront, wapń, cynk, bar i miedź, a w warstwie głębszej – w wapń, stront, mangan i cynk w porównaniu do tła geochemicznego. Ponad dwukrotna kumulacja kobaltu, magnezu, niklu, manganu, żelaza i rtęci zaznacza się w warstwie powierzchniowej, a w warstwie głębszej – wzbogacenie w miedź, ołów, żelazo, bar, magnez, chrom, nikiel, fosfor, ko-

balt i siarkę. Porównanie to wskazuje na występowanie wyraźnych źródeł antropogenicznych tych pierwiastków.

Wysokie wartości odchylenia standardowego i współczynników zmienności (CV) dla większości pierwiastków świadczą o bardzo dużym rozproszeniu danych w stosunku do wartości średnich (tab. 1 i 2). Wartości CV < 200 dla glinu, baru, wanadu, fosforu, kobaltu, żelaza, tytanu, strontu, wapnia, magnezu i niklu (tab. 3) pozwalają na przypuszczenie, że ich rozkład w glebach jest w miarę homogeniczny, a zatem związany głównie z naturalnym (litogenicznym) pochodzeniem. W przypadku chromu, manganu, cynku, kadmu, molibdenu, cyny, siarki, rtęci, ołowiu, arsenu i miedzi stwierdzono wartości CV > 200, wskazujące, że te pierwiastki charakteryzują rozkład niejednorodny, co świadczy, że większość z nich mogła zostać wprowadzona do środowiska w sposób sztuczny.

Nienaturalną koncentrację analizowanych pierwiastków potwierdzają wartości stopni zanieczyszczenia CF warstwy powierzchniowej (fig. 2) i wartości średnich wskaźników wzbogacenia EF gleb z obydwu zakresów głębokości (fig. 3). Wartość wskaźników CF ≥ 6 w warstwie powierzchniowej, świadcząca o bardzo wysokim stopniu zanieczyszczenia, zanotowano w większości gleb w przypadku wapnia, kadmu, miedzi, manganu, ołowiu, strontu i cynku oraz w około połowie gleb dla baru i siarki (fig. 2). Bardzo wysoki stopień zanieczyszczenia kadmem, ołowiem, cynkiem oraz silne wzbogacenie w wapń i stront (CF ≥ 6) stwierdzono dla 75–80% próbek, a dla 12–14% gleb stopień zanieczyszczenia jest wysoki (3 ≤ CF < 6). Około 70–80% gleb jest też zanieczyszczonych w stopniu wysokim i bardzo wysokim przez bar, siarkę, miedź i mangan. Taki sam stopień zanieczyszczenia zanotowano dla 75% gleb w przypadku fosforu, 68% dla rtęci, 66% dla arsenu i 52% dla magnezu. Gleby warstwy wierzchniej są też silnie i bardzo silnie wzbogacone w żelazo (60% gleb), nikiel i kobalt (58%), chrom (50%), molibden (44%), cynę (41%) i wanad (28%). Niski i umiarkowany stopień zanieczyszczenia (CF < 3) zanotowano dla większości gleb jedynie w przypadku srebra, glinu i tytanu (fig. 2).

Analiza średnich wartości wskaźników wzbogacenia większości metali oraz arsenu i siarki świadczy o pochodzeniu znacznej części tych pierwiastków ze źródeł antropogenicznych (EF > 1).

W warstwie gleb z głęb. 0,0–0,3 m i z głęb. 0,8–1,0 m zaznacza się umiarkowane wzbogacenie w wapń, miedź, molibden, stront, cynk, kadm i rtęć (fig. 3). Wzbogacenie w siarkę wzrasta z głębokością – od umiarkowanego do silnego. Przyjmując, że wartości EF < 1,5 świadczą o mało istotnych zmianach chemizmu gleb i litogenicznym pochodzeniu pierwiastków w warstwie powierzchniowej, zdecydowanie naturalne źródła mają srebro, glin i wanad. W warstwie głębszej, poza wymienionymi pierwiastkami, są to także bar, kobalt, chrom, żelazo, magnez, mangan, nikiel, fosfor i stront pochodzące przede wszystkim ze skał macierzystych (fig. 3). Największą wartością EF wyróżnia się siarka, cynk i ołów w glebach z obydwu zakresów głębokości, co można wyjaśniać zarówno obecnością siarczków tych metali w warstwie głębszej gleb, jak i ich dodatkowym rozpraszaniem ze źródeł przemysłowych w warstwie powierzchniowej, która kumuluje też arsen, wapń, miedź, molibden i stront.

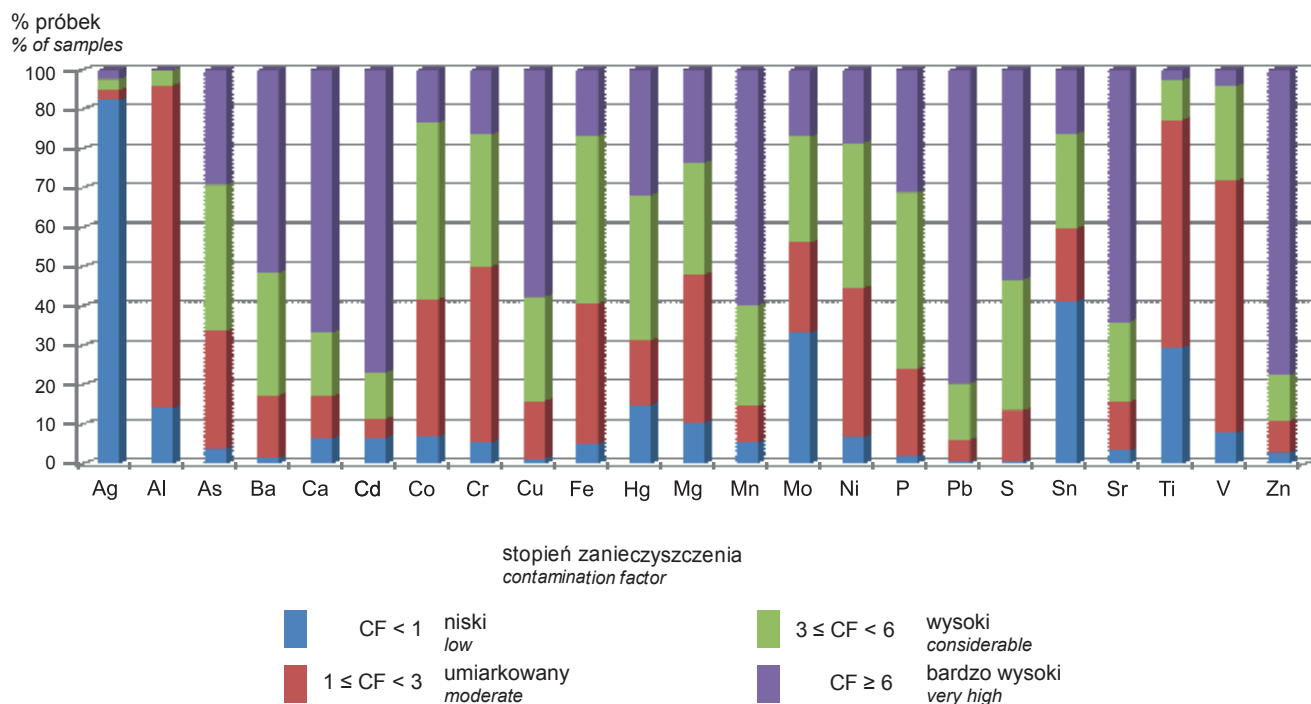


Fig. 2. Stopień zanieczyszczenia powierzchniowej warstwy gleb (0,0–0,3 m)

Contamination factor of topsoil (0.0–0.3 m)

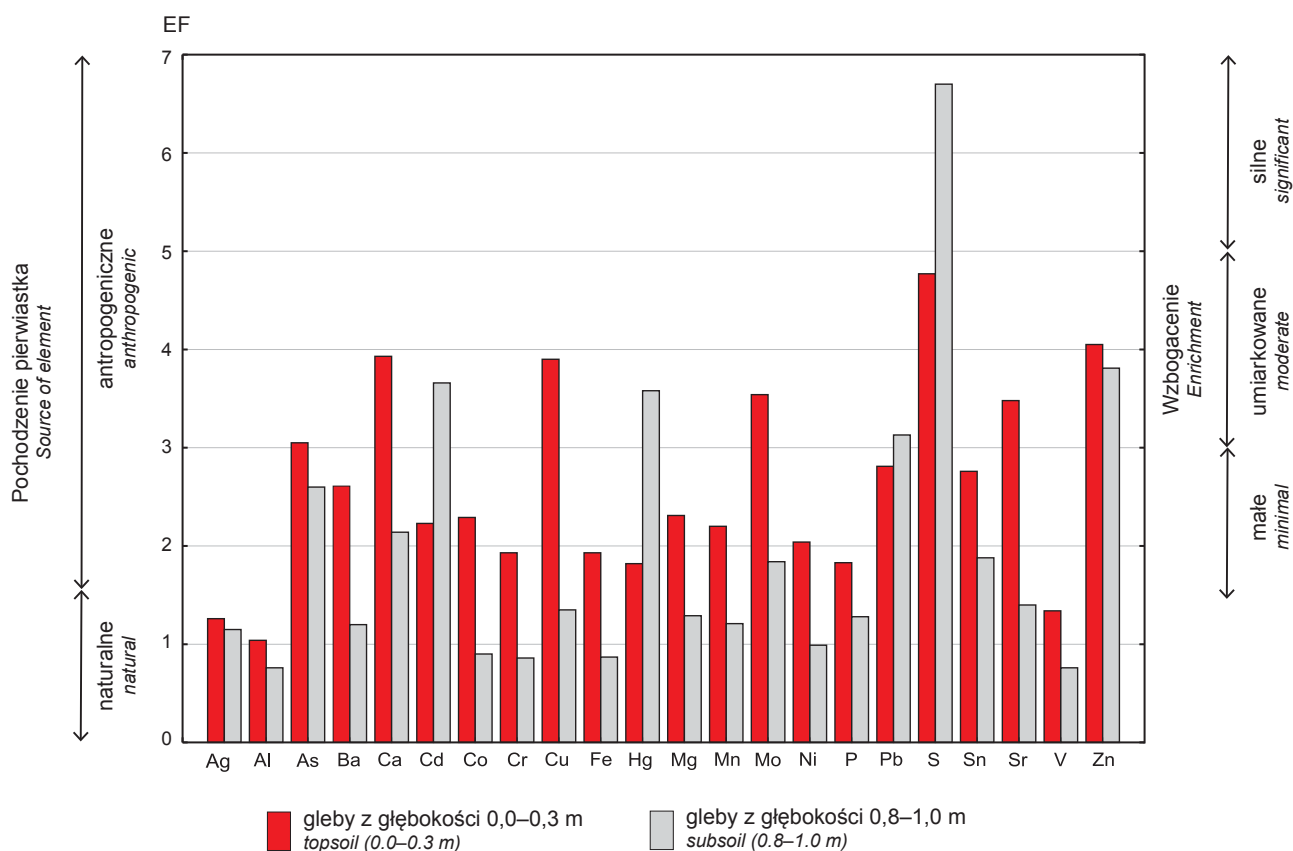


Fig. 3. Średnie wartości wskaźników wzbogacenia gleb

Mean enrichment factors

Najbardziej przydatne do oceny zanieczyszczenia powierzchniowej warstwy gleb wydaje się zastosowanie wskaźników geoakumulacji I_{geo} . Rozkład wartości percentyli 25–75 i median tych wskaźników dla poszczególnych pierwiastków pozwala na stwierdzenie najsilniejszego zanieczyszczenia gleb przez cynk, ołów i wapń, a także silnego zanieczyszczenia przez stront, żelazo, mangan, miedź, kadm, siarkę i bar (fig. 4). Wartości maksymalne wskaźników I_{geo} większości analizowanych pierwiastków wskazują na silne i ekstremalne zanieczyszczenia, lecz należy je wiązać tylko z określonymi lokalizacjami gleb. Najmniejszymi wartościami median wskaźników geoakumulacji wyróżniają się srebro, tytan, glin i wanad.

Zgrupowanie za pomocą analizy czynnikowej pierwiastków pochodzących prawdopodobnie z tych samych źródeł (tab. 4) i rozkład przestrzenny wartości trzech pierwszych

czynników (fig. 5–10) pozwala na lokalizację anomalnych zanieczyszczeń gleb.

Czynnik F1 wyczerpujący 31,20% wariacji w powierzchniowej warstwie gleb i 33,49% wariacji w warstwie głębszej grupuje bar, stront, fosfor i glin, a w warstwie z głęb. 0,8–1,0 m także kobalt, wanad, żelazo i tytan (tab. 4). Wysokie zawartości wymienionych pierwiastków wiązać można z ich mieszanym pochodzeniem litologiczno-antropogenicznym. Źródłem większości pierwiastków grupowanych przez czynnik F1 są przede wszystkim skały macierzyste gleb. Są to zarówno gliny lodowcowe, jak i utwory mułowcowo-ilaste karbonu bogate w glin, kobalt, wanad, bar, żelazo, fosfor i tytan. Wapń, mangan i stront to charakterystyczna asocjacja, związana z występowaniem utworów węglanowych w podłożu gleb we wschodniej części analizowanego obszaru. Gleby wzbogacone naturalnie w te pierwiastki (>2% wapnia, >800 mg/kg manganu,

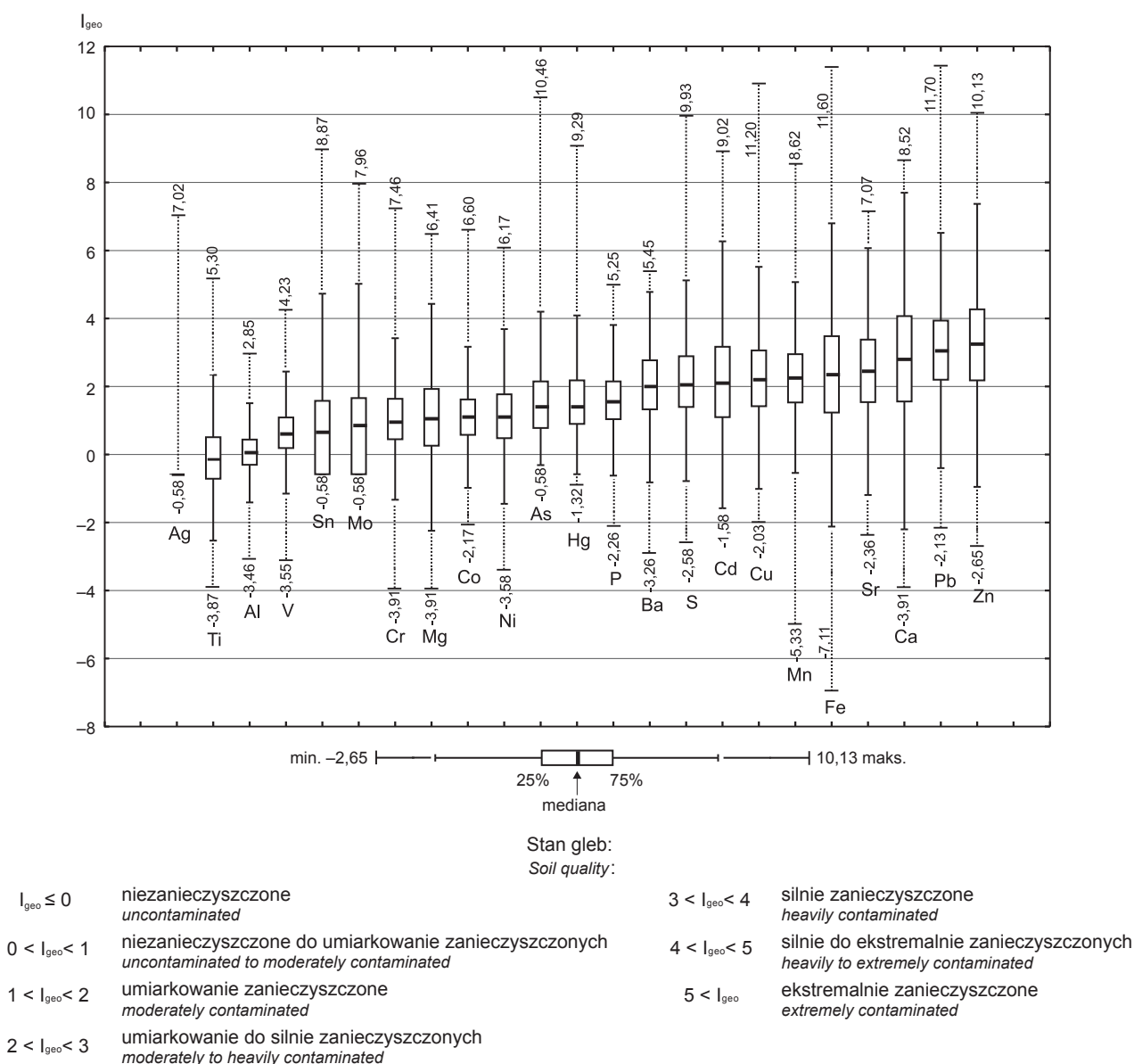


Fig. 4. Parametry statystyczne wskaźników geoakumulacji pierwiastków w powierzchniowej warstwie gleb (0,0–0,3 m)

Statistical parameters of geoaccumulation indexes of elements in topsoil (0.0–0.3 m)

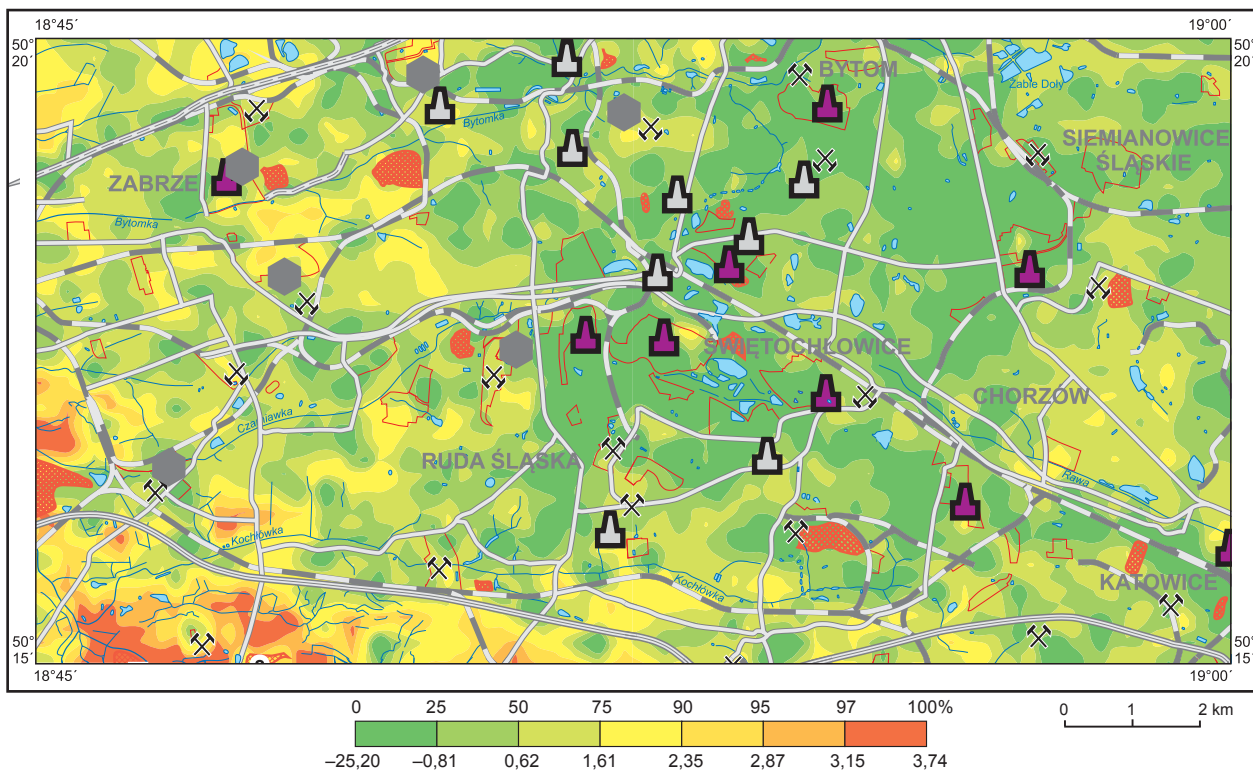


Fig. 5. Rozkład wartości czynnika F1 (Ba, Sr, P, Al) w glebach z głęb. 0,0–0,3 m

Objaśnienia do figur 5–10 jak pod figurą 1.

Distribution of the F1 factor value (Ba, Sr, P, Al) in topsoil (0.0–0.3 m)

For explanations of Figs 5–10 see Figure 1.

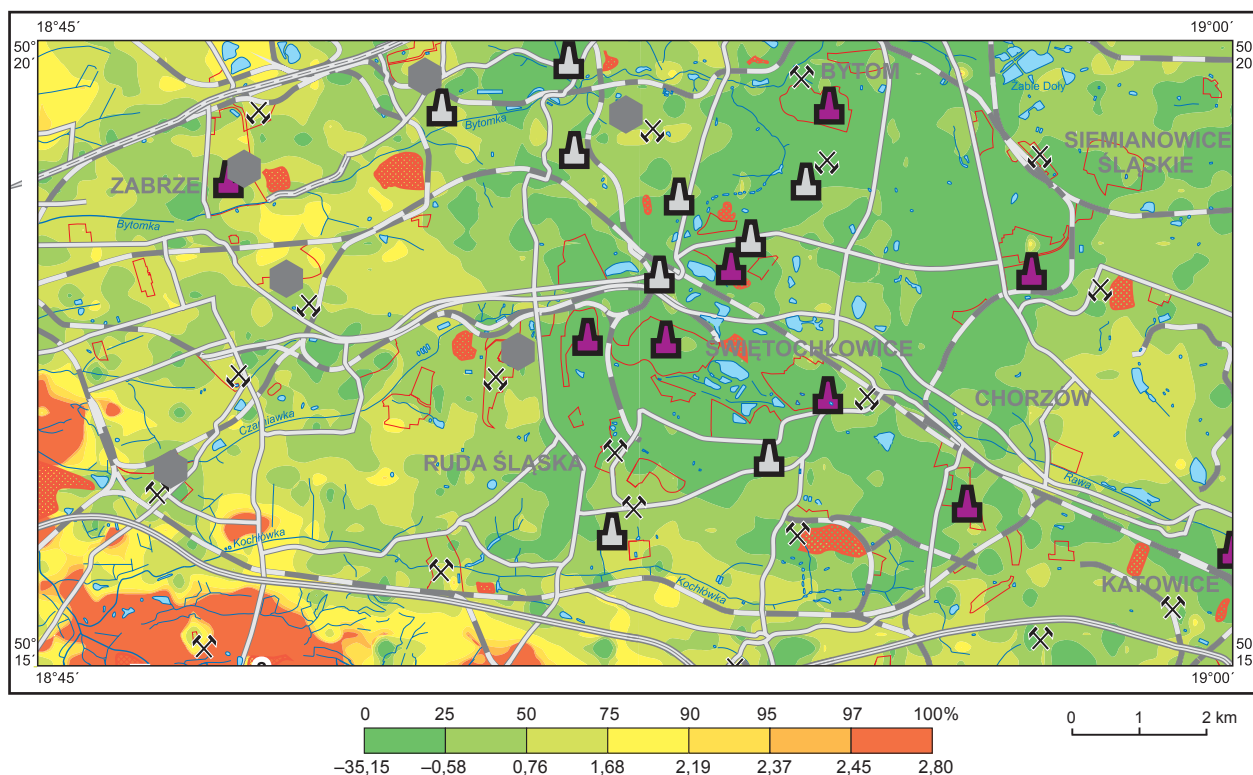


Fig. 6. Rozkład wartości czynnika F1 (Ba, Sr, P, Al, Co, V, Fe, Ti) w glebach z głęb. 0,8–1,0 m

Distribution of the F1 factor value (Ba, Sr, P, Al, Co, V, Fe, Ti) in subsoil (0.8–1.0 m)

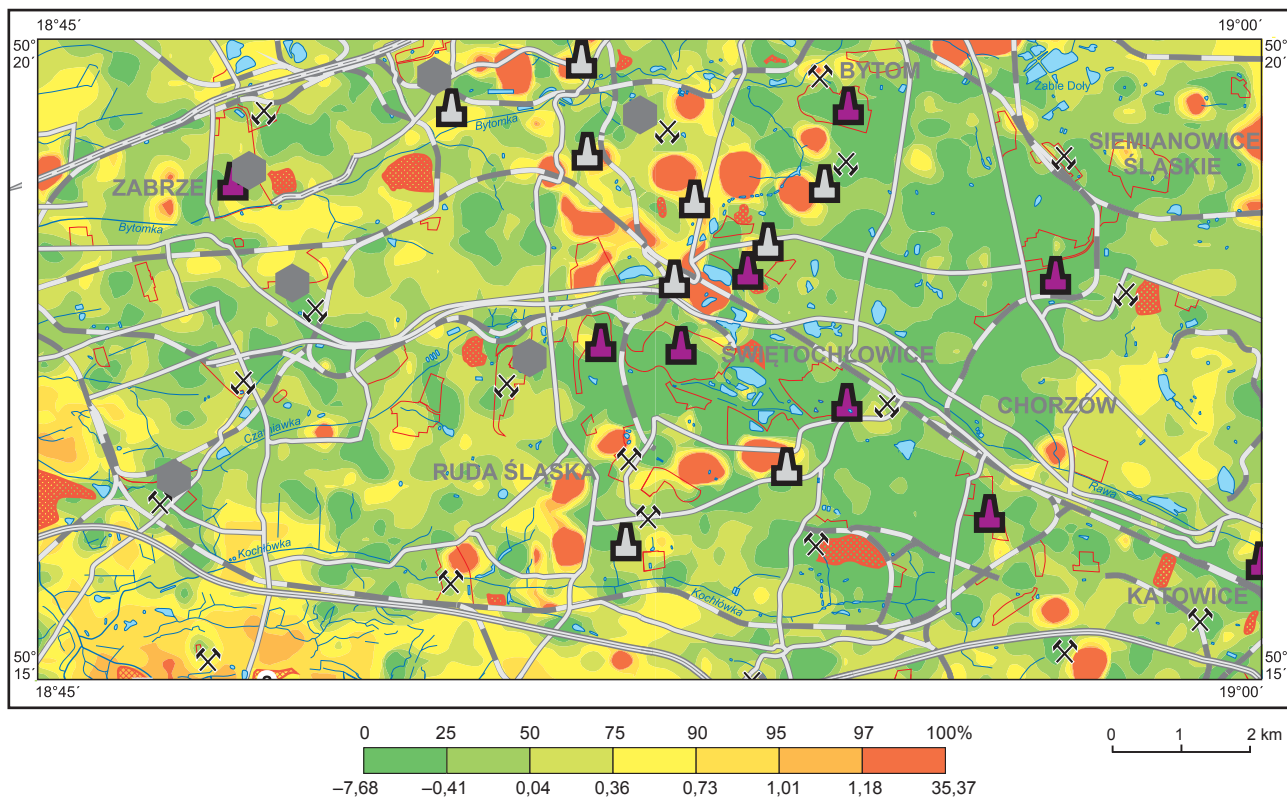


Fig. 7. Rozkład wartości czynnika F2 (As, Cd, Pb, Zn, Ag, S) w glebach z głęb. 0,0–0,3 m

Distribution of the F2 factor value (As, Cd, Pb, Zn, Ag, S) in topsoil (0.0–0.3 m)

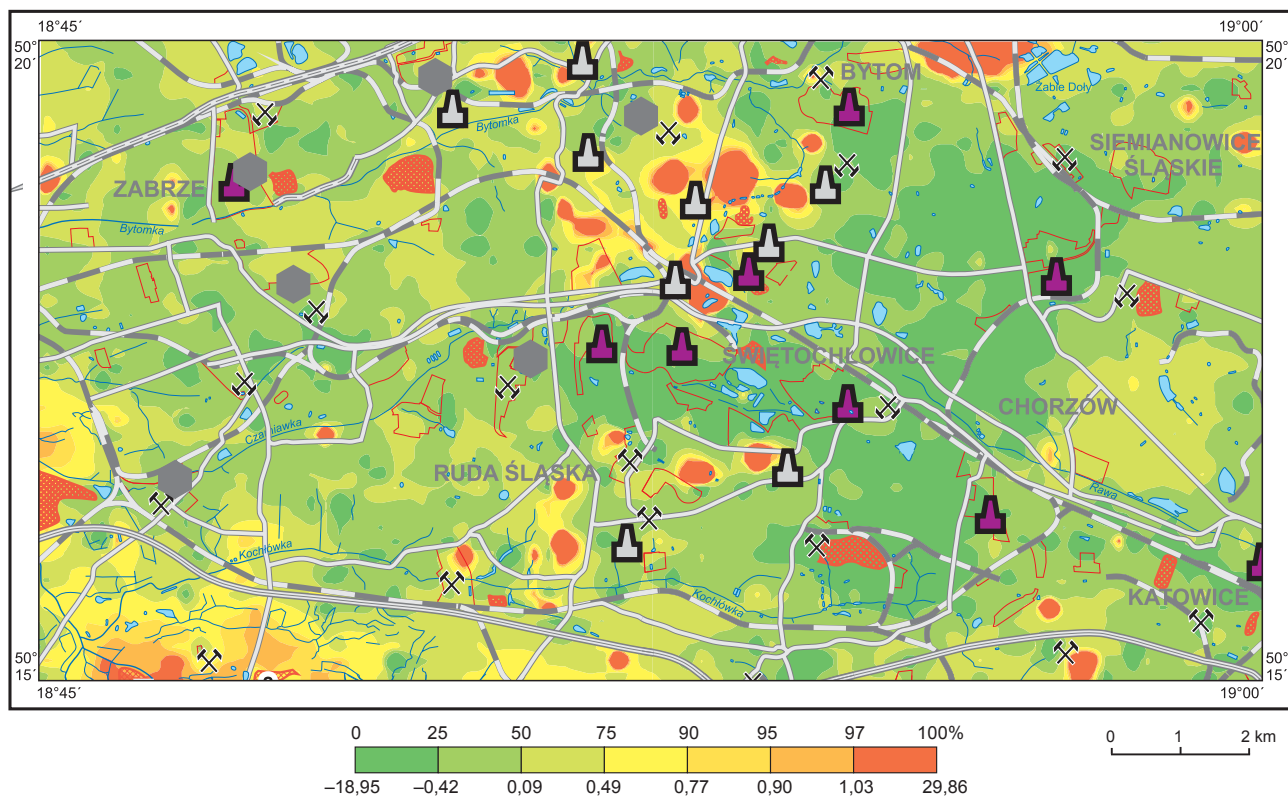


Fig. 8. Rozkład wartości czynnika F2 (As, Cd, Pb, Zn, Ag, S) w glebach z głęb. 0,8–1,0 m

Distribution of the F2 factor value (As, Cd, Pb, Zn, Ag, S) in subsoil (0.8–1.0 m)

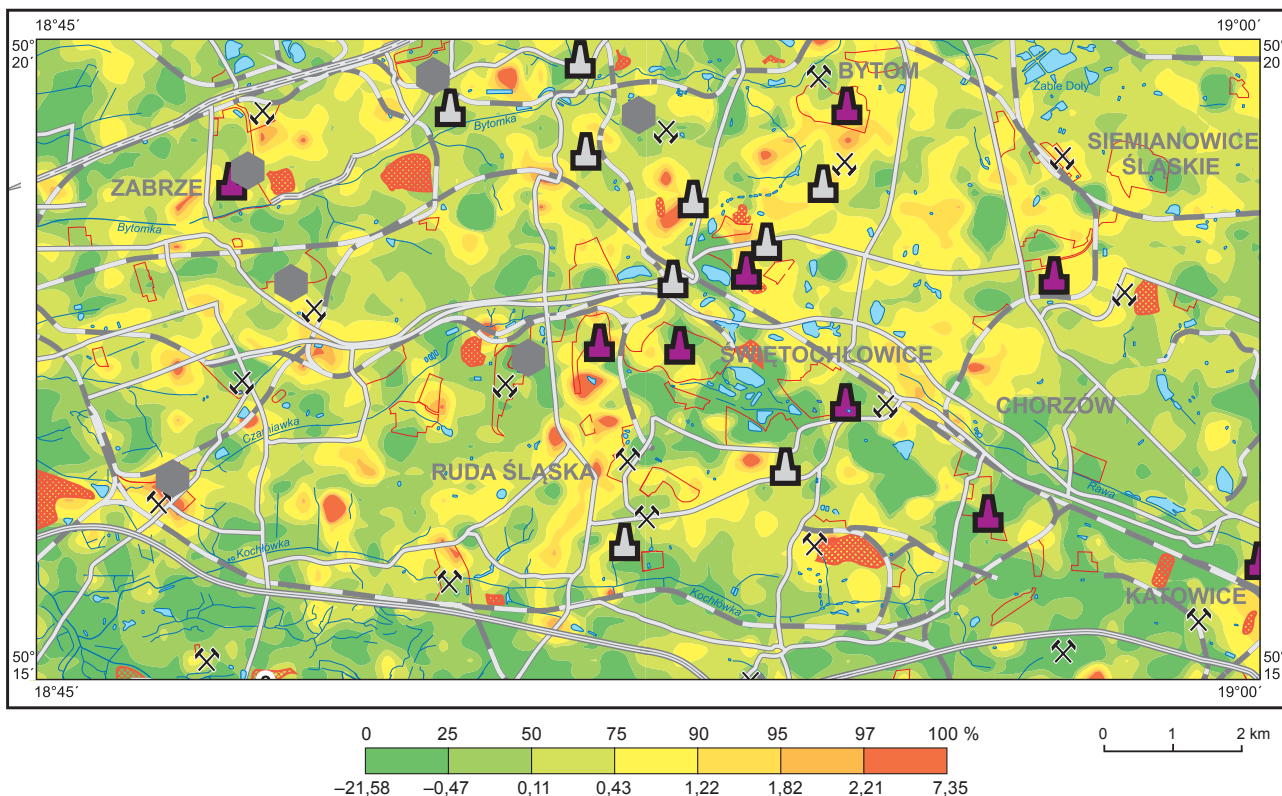


Fig. 9. Rozkład wartości czynnika F3 (Cr, Mo, Ni, Fe) w glebach z głęb. 0,0–0,3 m

Distribution of the F3 factor value (Cr, Mo, Ni, Fe) in topsoil (0.0–0.3 m)

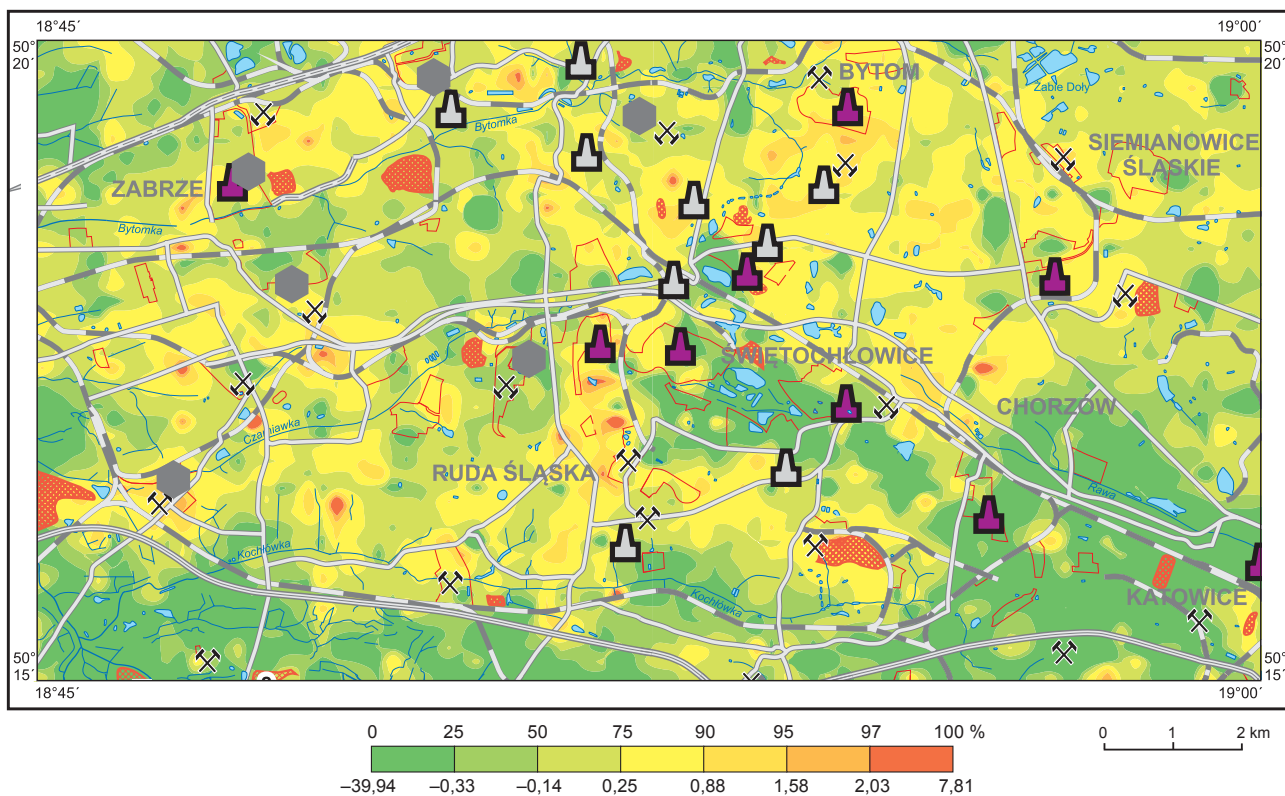


Fig. 10. Rozkład wartości czynnika F3 (Cr, Mo, Ni) w glebach z głęb. 0,8–1,0 m

Distribution of the F3 factor value (Cr, Mo, Ni) in subsoil (0.8–1.0 m)

> 80 mg/kg strontu) pokrywają północne dzielnice Chorzowa i część dzielnicy Łagiewniki w Bytomiu.

Rozkład kartograficzny czynnika F1, podobny w obydwu analizowanych warstwach gleb, ale bardziej wyrazisty w warstwie głębszej (fig. 5–6), pozwala przypuszczać, że wiąże się on głównie z litologią podłoża. We wschodniej części analizowanego obszaru jego wartości są znacznie mniejsze niż na południowym zachodzie. W tej ostatniej lokalizacji największą wartością F1 (> 2) wyróżniają się doliny Potoku Bielszowickiego i Kłodnicy oraz rejon hałd kopalni Makoszowy.

Wzbogacenie w stront może wiązać się z występowaniem w podłożu skał węglanowych, jak i zanieczyszczeniem gleb dolin rzecznych przez zrzuty wód kopalnianych obfitujących w ten pierwiastek. Dodatkowymi źródłami baru są pyły ze spalania węgla (Rózkowska, Ptak, 1995a; Smoliński, 2006), jak i hałdy odpadów rud Zn-Pb po przemysłowym wzbogacaniu węgla z zastosowaniem barytu.

Czynnik F2 (arsen, kadm, ołów, cynk, srebro, siarka), wyjaśniający 13,08% ogólnej wariacji w glebach warstwy powierzchniowej i 14,32% wariacji w warstwie 0,8–1,0 m, grupuje pierwiastki o pochodzeniu mieszanym litologiczno-antropogenicznym. Rozkład kartograficzny wartości > 1 tego czynnika obejmuje tereny historycznej eksploatacji złóż rud Zn-Pb, składowisk po ich wydobyciu i flotacji oraz historycznych hut cynku i charakteryzuje się szerszym zasięgiem w warstwie powierzchniowej (fig. 7 i 8).

Pierwiastki grupowane przez czynnik F2 zanieczyszczają gleby północnych dzielnic Świętochłowic, wschodnich dzielnic Rudy Śląskiej oraz pogranicza Bytomia i Piekara Śląskich, gdzie działały historyczne huty cynku (fig. 1), a po ich działalności pozostały niezabezpieczone hałdy.

W miejscach stwierdzonych anomalii czynnika F2 od XII do końca XVIII w. eksploatowano przede wszystkim galenę, z której otrzymywano ołów i srebro, a w późniejszych latach wytwarzano cynk w kilkunastu hutach wykorzystujących lokalne złoża rud (Molenda, 1972; Grzechnik, 1978). Okres wzmożonej eksploatacji rud i budowy hut cynku rozpoczął się w XIX w. po opanowaniu technologii uzyskiwania tego metalu. Początkowo głównym surowcem do jego produkcji były żuźle po wytopie ołowiu, później złoża galmanu, a wreszcie rudy siarczkowe Pb-Zn (Majorczyk, 1986).

Zanieczyszczenie gleb cynkiem, ołowiem i kadmem występujące przy północnej granicy rejonu badań (na pograniczu Bytomia i Piekara Śląskich) związane jest z funkcjonowaniem tu od 1853 r. kopalni rud cynku (początkowo Bleischarley Grube później Szarlej Białej i w końcu Zakładów Górniczo-Hutniczych ZGH Orzeł Biały) uruchomionej w miejsce kilku wcześniejszych kopalń. Na początku XX w. była ona jedną z najnowocześniejszych na Górnym Śląsku, w latach 1927–1928 została przekształcona w duży zakład flotacji i hutę cynku (Majorczyk, 1986).

W trakcie późniejszego wydobywania węgla kamiennego z utworów karbonu powstawały niecki i zapadliska, które wypełniały się wodami gruntowymi i opadowymi, używanymi do flotacji urobku, a odpady poflotacyjne (o znacznej zawartości cynku, ołowiu i towarzyszących im pierwiastków) gromadzono na pobliskich hałdach i w osadnikach (Lutyńska,

2015). Na skutek wyczerpania zasobów działalność zakładu ZGH Orzeł Biały zakończono w 1990 r., a pozostawione zbiorniki wodne noszą dziś nazwę Zespołu Krajobrazowo-Przyrodniczego Żabie Doły (fig. 1). W otoczeniu omawianych zbiorników koncentracja ołowiu w glebach dochodzi do 54 940 mg/kg, a cynku do 30 010 mg/kg.

W bytomskiej dzielnicy Łagiewniki w latach 1826–1870 działała huta cynku Marien Wunsch i huta żelaza Hubertus (później Zygmunt), która na początku swojej działalności była cynkownią (Degenhardt, 1870), a w dzielnicy Bobrek (w pobliżu doliny Bytomki) huta cynku Bobrek, wykorzystująca rudy galmanowe (Podgórska, Podgórski, 2014). W obszarze anomalii czynnika F2 w wierzchniej warstwie gleb zawartość kadmu przekracza 32 mg/kg, ołowiu – 250 mg/kg a cynku – 2500 mg/kg.

Anomalie wartości czynnika F2 we wschodnich dzielnicach Rudy Śląskiej wskazują na zanieczyszczenie gleb metalami w wyniku historycznej działalności hut cynku Carlshütte (1812–1908) i Godullahütte (1854–1919) oraz hałd poprodukcyjnych hut Hugo, Gute Hoffnung, Liebe-Hoffnung, Franciszek, Morgenroth i cynkowni Rozamunda (Degenhardt, 1870; Sulimierski, Walewski, 1880–1914; Dworak, 1995; Szczech, 2003; Podgórska, Podgórski, 2014). W zanieczyszczonych glebach w obrębie anomalii zawartość ołowiu przekracza 250 mg/kg, a cynku – 1000 mg/kg.

W Świętochłowicach anomalie gleb silnie zanieczyszczonych arsenem, kadmem, ołowiem i cynkiem dotyczą rejonu hałdy po byłej hucie cynku Guidotto oraz otoczenia hut Silesia i Florian. W glebach z obydwu zakresów głębokości zawartość ołowiu przekracza tu 250 mg/kg, a cynku 1000 mg/kg. Najbardziej zanieczyszczone gleby w rejonie hałdy Kopyto zawierają do 16 110 mg/kg ołowiu i do 36 930 mg/kg cynku. Teren wokół hałd huty Silesia pokrywają gleby, w których zawartość ołowiu dochodzi do 15 810 mg/kg, a cynku do 13 930 mg/kg, natomiast w otoczeniu hałdy na osiedlu Nowowiejska w Świętochłowicach zanotowano 12 450 mg/kg ołowiu i 33 760 mg/kg cynku.

Zanieczyszczenie dość rozległego terenu o podwyższonej wartości czynnika F2, zlokalizowanego na południowym zachodzie analizowanego obszaru, jest trudne do jednoznacznej interpretacji. Najbardziej prawdopodobnym źródłem metali wydaje się stosowanie odpadów górnictwa i hutnictwa rud Zn-Pb do niwelacji i utwardzania terenu, nadbudowy koryt rzecznych i innych prac ziemnych oraz ich składowanie wraz z odpadami skał płonnych górnictwa węglowego.

Czynnik F3 (chrom, molibden, nikiel, żelazo) wyczerpujący 7,38% wariacji w warstwie powierzchniowej gleb i 6,14% w warstwie głębszej można uznać za głównie antropogeniczny. Anomalie występujące zarówno na terenach hut żelaza i stali, jak i historycznych hut cynku pozwalają dopatrywać się znacznego udziału zwałów odpadów z wytopu żelaza (żuźel hutniczy, masy formierskie, gruz ogniotrwały, szlamy i osady poneutralizacyjne) w kumulacji metali w glebach.

Wartości maksymalne czynnika F3 w glebach z obydwu zakresów głębokości występują w tych samych lokalizacjach, a jego przestrzenny rozkład ma strukturę mozaikową (fig. 9 i 10), co można wyjaśniać tym, że najstarszy wytop żelaza na

analizowanym terenie był rozproszony – opierał się na miejscowych, niewielkich złożach rud darniowych i limonitów stref utlenienia siarczków, a inną przyczyną wpływającą na charakter rozkładu przestrzennego może być wykorzystywanie odpadów pohutniczych jako kruszywa drogowego.

Współcześnie w GOP działa tylko jeden wielki piec w hucie ArcelorMittal, wytwarzający surówkę z importowanych rud żelaza i złomu stalowego (Łabędzki i in., 2009; Burchart-Karol, 2010; Maj i in., 2010; Pater, 2014), a wymogi środowiskowe obecnej produkcji sprawiają, że wpływa ona na środowisko w mniejszym stopniu niż dawne, bardziej uciążliwe technologie. Oddziaływanie na środowisko technologii stosowanych w produkcji stali ocenia się przede wszystkim ze względu na emisję CO₂ z pieców hutniczych i związków organicznych z koksowni, ale szkodliwe są też pierwiastki występujące jako domieszki w rudach (As, Zn, Pb) i emitowane głównie podczas procesów spiekania rud i wytopu w piecach elektrycznych oraz metale uszlachetniające stal dodawane w zakładach produkujących stale specjalne i wyroby powlekanie, jak blachy cynkowane, cynowane itp. (Burchart-Korol, 2010; Paulo, Krzak, 2018).

Najsilniejsza anomalia wartości czynnika F3 zaznacza się w rejonie huty Pokój w Rudzie Śląskiej (fig. 9). Jednym z pierwszych zakładów przemysłowych w tym mieście była kuźnica żelaza założona w 1642 r., od której pochodzi nazwa obecnej części dzielnicy Rudzka Kuźnica (Rudahammer). W 1805 r. w rejonie dzielnicy Wirek uruchomiono hutę żelaza Antonienhütte, zlikwidowaną w latach 90. XIX w., a od 1856 r. działała huta żelaza Bertha (Sulimierski, Walewski, 1880–1914). Huta Pokój uruchomiona w 1840 r. na początku nosiła nazwę Friedenshütte. W czasie dwudziestolecia międzywojennego była największą hutą żelaza w Polsce i jedyną wytwarzającą żelazomangan (Owczarek i in., 2012), co zapewne przyczyniło się do skumulowania w glebach w jej otoczeniu żelaza (>2%), chromu (>40 mg/kg) i manganu (>1600 mg/kg). Obecnie zakład produkuje wyroby stalowe (blachy, kształtowniki, konstrukcje stalowe), a w jego pobliżu są zgromadzone hałdy odpadów poprodukcyjnych.

Anomalia wartości czynnika F3 (>1,82) zaznacza się wokół terenu huty Zabrze, która powstała w latach 1850–1851 jako Huta Donnersmarcka. Do 1872 r. w swoim obrębie miała też koksownię, odlewnię żeliwa i rur, warsztat konstrukcyjny, zakład budowy maszyn i 6 wielkich pieców (Niemirowski, 1983; Walerjański, 2006). Aktualnie zakład jest producentem wyrobów odlewniczych, elementów maszyn i urządzeń oraz konstrukcji stalowych przeznaczonych dla przemysłu. W glebach z obydwu zakresów głębokości zawartość chromu przekracza tu 40 mg/kg, niklu – 20 mg/kg, a żelaza – 2%.

Wartości czynnika F3 >1,82 zanotowano w rejonie hałd huty Zygmunt w Bytomiu oraz hut Florian i Silesia w Świętochłowicach.

Huta żelaza Zygmunt (utworzona w 1845 r.) była jedną z największych hut w Europie na przełomie XIX i XX w. produkującą maszyny dla przemysłu ciężkiego.

Początek działalności huty Florian to lata 30. XIX w., kiedy w miejscu huty żelaza Eintracht zostały założone huty Bethlen-Falwa (Zmiana...). Obecnie huta nosi nazwę Mittal-

Steel Poland i produkuje różnego rodzaju blachy powlekanie. Na terenie huty i w jej otoczeniu w warstwie powierzchniowej gleb stwierdzono zawartość do 1317 mg/kg chromu, 13 230 mg/kg miedzi i 306 mg/kg niklu. W rejonie huty Silesia gleby zawierają >160 mg/kg chromu, >40 mg/kg niklu i >4% żelaza.

W rejonie Huty Królewskiej w Chorzowie podwyższenia wartości czynnika F3 są nieznaczne, chociaż jej początki sięgają 1797 r. W kolejnych etapach rozwoju nosiła ona nazwy: Piłsudski (1935), Kościuszko (1945) i ArcelorMittal (2009). W 1843 r. jako jedna z pierwszych w Europie zaczęła produkować szyny kolejowe, a niespełna 20 lat później była już wyposażona w pierwszą walcownię na Śląsku (Kantyka, 1977; Drabina, 1998, 1999). Niedawno zakład zlikwidowano.

W obrazie kartograficznym nie zaznacza się zanieczyszczenie wokół terenu huty Batory (wcześniej Bismarckhütte uruchomionej w 1872 r.) w Chorzowie. Obecnie zakład jest w likwidacji.

W rejonie zajmowanym przez hutę Baildon (w stanie upadłości), przy wschodniej granicy analizowanego obszaru w glebach z obydwu zakresów głębokości zaznacza się anomalia wartości czynnika F3 (fig. 9–10). Na terenie jej obiektów zanotowano zawartość 433 mg/kg niklu w warstwie powierzchniowej gleby oraz 587 mg/kg w warstwie głębszej. Gleby te są również zanieczyszczone przez chrom (180–420 mg/kg), miedź (140–210 mg/kg) i żelazo (4–9%).

Miedź i cynę grupuje czynnik F4 (6,43% wariancji) w powierzchniowej warstwie gleb i czynnik F5 (5,11% wariancji) w warstwie głębszej. Główną rolę w kumulacji tych pierwiastków należy przypisać działalności antropogenicznej. Nieco większy wskaźnik wzbogacenia powierzchniowej warstwy gleb w miedź (EF – 2,89) niż warstwy głębszej (EF – 2,75) sugeruje na związek z emisją antropogeniczną. Najważniejszymi źródłami są przypuszczalnie procesy hutnictwa żelaza i stali (gdzie miedź stosowana jest jako dodatek stopowy) oraz rozpraszanie pyłów lotnych ze spalania węgla. Zbyt niska granica oznaczalności cyny w stosowanej metodzie analitycznej nie umożliwia określenia jej tła geochemicznego i wskaźników wzbogacenia. Związek z miedzią pozwala przypuszczać, że pierwiastki te mają podobne źródła (np. produkcja brązów do urządzeń przemysłowych?).

Czynnikowi F5 (grupującemu wapń i magnez) w warstwie powierzchniowej odpowiada silniejszy czynnik F4 warstwy głębszej; wyczerpują one odpowiednio za 4,97% i 6,14% ogólnej wariancji. Obydwa pierwiastki pochodzą zarówno ze skał macierzystych gleb (dolomitów), jak i wielu źródeł antropogenicznych. Wśród tych ostatnich główne znaczenie ma rozpraszanie popiołów lotnych z przemysłowego spalania węgla. Dodatkowe źródła tych pierwiastków to środki stosowane do odśnieżania ulic oraz rozpraszanie materiału z hałd odpadów górniczych, hutniczych i paleniskowych. Materiał hałd odpadów hutniczych zawiera nie tylko rudy produkowanych metali, ale również surowce pomocnicze, m.in. topniki w postaci dolomitu kruszczonego, wykładziny ogniotrwałej, dodatki stopowe, masy wiążące, paliwo.

Czynnik F6 (wyjaśniający 4,54% i 4,37% wariancji) odpowiednio w warstwie powierzchniowej i w warstwie głę-

szej gleb) jest związany z kumulacją rtęci, która pochodzi z wielu źródeł. Zanieczyszczenie gleb wschodniej części analizowanego terenu wiąże się przypuszczalnie z jej obecnością w siarczkach żelaza i cynku, stanowiących domieszkę w rudach Zn-Pb. Anomalie wokół koksowni i zakładów energetycznych są efektem rozpraszania rtęci związanej w substancji mineralnej węgla podczas jego spalania (Bojakowska, Sokołowska 2001; Aleksa i in., 2007; Kabata-Pendias, Mukherjee, 2007; Hławiczka, 2008; Michalska, Białecka, 2012; Kłojzy-Karczmarczyk, Mazurek, 2013). Obecność rtęci w glebach przy torach kolejowych może być spowodowana stosowaniem jej związków w środkach ochrony drewna (zabezpieczających podkłady kolejowe), a w ogródkach działkowych anomalie mogą być efektem nadmiernego zużywania preparatów owadobójczych. W innych przypadkach rtęć pochodzi ze złomu świetlówek, akumulatorów Zn-HgO, zapalników oraz urządzeń stosowanych dawniej w sprzęcie pomiarowo-kontrolnym wielu gałęzi przemysłu i elektrotechnicznym zakładów chlorowo-sodowych (Szpadt, 1994; Paulo, Strzelska-Smakowska, 2000).

PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy wyników badań wykazano, że stopień przeobrażeń chemicznych badanych gleb w wielu rejonach jest bardzo zaawansowany, a zmiany antropogeniczne zaznaczyły się w ich wszystkich typach i rodzajach utworzonych ze zróżnicowanych litologicznie utworów karbonu, triasu i czwartorzędu.

W warstwie wierzchniej gleb zanotowano ponad/lub prawie trzykrotne wzbogacenie w stront, wapń, cynk, bar i miedź, a w warstwie głębszej – w wapń, stront, mangan i cynk w porównaniu do tła geochemicznego. Ponad dwukrotna kumulacja kobaltu, magnezu, niklu, manganu, żelaza i rtęci zaznacza się w warstwie powierzchniowej, a w warstwie głębszej – wzbogacenie w miedź, ołów, żelazo, bar, magnez, chrom, nikiel, fosfor, kobalt i siarkę.

Wartości współczynników zmienności dla glinu, baru, wadnadu, fosforu, kobaltu, żelaza, tytanu, strontu, wapnia, magnezu i niklu pozwalają na stwierdzenie, że ich rozkład w glebach jest w miarę homogeniczny, a zatem związany głównie z naturalnym (litogenicznym) pochodzeniem. Chrom, mangan, cynk, kadm, molibden, cyna, siarka, rtęć, ołów, arsen i miedź charakteryzują wartości współczynników zmienności wskazujące na rozkład niejednorodny, pozwalający przypuszczać, że zostały wprowadzone do środowiska w sposób sztuczny.

Wartości wskaźników zastosowanych do oceny antropogenicznego zanieczyszczenia gleb (wskaźników zanieczyszczenia CF, wskaźników wzbogacenia EF i wskaźników geoakumulacji I_{geo}) pozwoliły na wykazanie wysokiej koncentracji większości metali, arsenu i siarki w powierzchniowej warstwie gleb spowodowanej historycznym górnictwem rud Zn-Pb oraz hutnictwem cynku i żelaza. Wartości wskaźników charakteryzują się dobrą wzajemną zbieżnością.

Analiza czynnikowa umożliwiła wskazanie grup pierwiastków pochodzących prawdopodobnie z tych samych

źródeł antropogenicznych, a rozkład przestrzenny wartości wybranych czynników jest podstawą wskazania lokalizacji gleb anomalnie zanieczyszczonych.

Porównanie obszarów anomalii analizowanych pierwiastków w glebach i lokalizacji zakładów przemysłowych pozwala na wskazanie ich najważniejszych źródeł antropogenicznych. Są to pozostałości zwalów po eksploatacji i flotacji rud Zn-Pb oraz hałdy odpadów historycznych hut cynku (powodujące kumulację w glebach cynku, kadmu, arsenu, ołowiu i siarki), współczesne hutnictwo żelaza i stali (wpływające na rozpraszanie chromu, manganu, molibdenu, miedzi i cyny) oraz energetyczne spalanie węgla, z którym wiążą się emisje rtęci, siarki i pyłów zawierających metale.

LITERATURA

- ACOSTA J.A., MARTINEZ-MARTINEZ S., ZORNOZA R., CARMONA D.M., KABAS S., 2011 – Multivariate statistical and GIS-based approach to evaluate heavy metals behaviour in mine sites for future reclamation. *J. Geochem. Explor.*, **109**: 8–17.
- ADAMO P., ARIENZO M., BIANCO M.R., TERRIBILE F., VIOLANTE P., 2002 – Heavy metal contamination of the soils used for stocking raw materials in the former ILVA iron-steel industrial plant of Bagnoli (southern Italy). *Sci. Total. Environ.*, **295**: 17–34.
- ALEKSA A., DYDUCH F., WIERZCHOWSKI K., 2007 – Chlor i rtęć w węglu i możliwości ich obniżenia metodami przeróbki mechanicznej. *Gór. Geoinż.*, **31**: 35–48.
- ALLOWAY B.J., 2012 – Sources of Heavy Metals and Metalloids in Soils. Springer.
- BARBIERI M., 2016 – The Importance of Enrichment Factor (EF) and Geoaccumulation Index (I_{geo}) to Evaluate the Soil Contamination. *J. Geol. Geophys.*, **5**, 1: 1–4.
- BASTA N.T., MCGOWEN S.L., 2004 – Evaluation of chemical immobilization treatments for reducing heavy metal transport in a smelter-contaminated soil. *Environ. Pollut.*, **127**: 73–82.
- BASTA N.T., GRADWOHL R., SNETHEN K.L., SCHRODER J.L., 2001 – Chemical immobilization of lead, zinc, and cadmium in smelter-contaminated soils using biosolids and rock phosphate. *J. Environ. Qual.*, **30**: 1222–1230.
- BLASER P., ZIMMERMANN S., LUSTER J., SHOTYK W., 2000 – Critical examination of trace element enrichments and depletions in soils: As, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn in Swiss forest soils. *Sci. Total. Environ.*, **249**: 257–280.
- BOJAKOWSKA I., SOKOŁOWSKA G., 2001 – Rtgęć w kopalniach wydobywanych w Polsce jako potencjalne źródło zanieczyszczenia środowiska. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **394**: 5–54.
- BREGUŁA T., 2015 – Chorzów dawniej i dziś. Internet: <http://www.e-chorzow.com/2015/06/chorzow-dawniej-i-dzis-11/> (dostęp: 16.10.2018).
- BUŁA Z., KOTAS A. (red.), 1994 – Atlas geologiczny GZW w skali 1:100 000 cz. III. Mapa geologiczno-strukturalna utworów karbonu produktywnego. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- BURCHART-KOROL D., 2010 – Środowiskowa ocena technologii hutnictwa żelaza i stali na podstawie LCA. *Pr. Nauk. Gl. Inst. Gór. Ser. Gór. i Środ.*, **3**: 5–13.
- CABAŁA J., 1996 – Koncentracje pierwiastków śladowych w rudach Zn-Pb i możliwość przechodzenia ich do odpadów. *Pr. Nauk. Gl. Inst. Gór. Ser. Ser. Konf.*, **13**: 17–32.
- CABAŁA J., 2009 – Metale ciężkie w środowisku glebowym olkuskiego rejonu eksploatacji rud Zn-Pb. Wydaw. UŚI., Katowice.

- CABAŁA J., KONSTANTYNOWICZ E., 1999 – Charakterystyka śląsko-krakowskich złóż cynku i ołowiu oraz perspektywy eksploatacji tych rud. W: *Perspektywy geologii złożowej i ekonomicznej w Polsce. Pr. Nauk., UŚ*, **1809**: 76–98.
- CAPPUYNS V., SWENNEN R., VANDAMME A., NICLAES M., 2005 – Environmental impact of the former Pb–Zn mining and smelting in East Belgium. *J. Geochem. Explor.*, **88**: 6–9.
- CUI Y.-J., ZHU Y.-G., ZHAI R.-H., CHEN D.-Y., HUANG Y.-Z., QIU Y., LIANG J.-Z., 2004 – Transfer of metals from soil to vegetables in an area near a smelter in Nanning. *Environ. Int.*, **30**: 785–791.
- CZOPEK A., 2013 – Analiza porównawcza efektywności metod redukcji zmiennych – analiza składowych głównych i analiza czynnikowa. *Studia Ekonomiczne*, **132**: 7–23.
- DEGENHARDT O., 1870 – Der Oberschlesien-Polnische-Berg-district mit Hinweglassung des Diluviums. Karte von Oberschlesien 1:100 000. Verlag der Landkarten handlung von J.H. Neumann, Berlin.
- DRABINA J., 1998 – Historia Chorzowa od średniowiecza do 1868 roku. Drukarnia Archidiecezjalna, Katowice.
- DRABINA J., 1999 – Historia Chorzowa od 1868 do 1945 roku. Drukarnia Archidiecezjalna, Katowice.
- DURIASZ I., CUPIAŁ A., 2009 – Prognoza oddziaływania na środowisko dla zmiany studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego miasta Świętochłowice. Internet: <https://www.swietochlowice.pl/bip/gpn/zal7.pdf> (dostęp: 16.10.2018).
- DWORAK J.S., 1995 – Karol Gadula pionier przemysłu cynkowego na Górnym Śląsku. Państw. Inst. Nauk – Inst. Śląs., Opole.
- EKIERT F., 1971 – Sytuacja geologiczna złóż rud cynku i ołowiu w północno-wschodnim obrzeżeniu Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. *Biul. Inst. Geol.*, **241**: 47–56.
- EVERHART J.L., MCNEARD JR., PELTIERE, VANDERLELIED., CHANEY R.L., DONALD L., SPARKS D.L., 2006 – Assessing nickel bioavailability in smelter-contaminated soils. *Sci. Total Environ.*, **367**: 732–744.
- FILIPPELLI G.M., LAIDLAW M.A., 2010 – The elephant in the playground: Confronting lead-contaminated soils as an important source of lead burdens to urban populations. *Perspect. Biol. Med.*, **53**: 31–45.
- FILIPPELLI G.M., MORRISON D., CICCHELLA D., 2012 – Urban Geochemistry and Human Health. *Element*, **8**, 6: 439–444.
- FERNANDEZ-TURIEL J.L., ACENOLAZA P., MEDINA M.E., LLORENS J.F., SARDI F., 2001 – Assessment of a smelter impact area using surface soils and plants. *Environ. Geochem. Hlth.*, **23**: 65–78.
- FRIESL-HANL W., PLATZER K., HORAK O., GERZABEK M.H., 2009 – Immobilising of Cd, Pb, and Zn contaminated arable soils close to a former Pb/Zn smelter: a field study in Austria over 5 years. *Environ. Geochem. Hlth.*, **31**: 581–594.
- FUGE R., PEARCE F.M., PEARCE N.J.G., PERKINS W.T., 1993 – Geochemistry of Cd in the secondary environment near abandoned metalliferous mines. Wales. *Appl. Geochem.*, Suppl. Iss., **2**: 29–35.
- GALKIEWICZ T., ŚLIWIŃSKI S., 1985 – Charakterystyka geologiczna śląsko-krakowskich złóż cynkowo-ołowionych. *Ann. Soc. Geol. Poloniae*, **53**, 1–4: 63–90.
- GÄBLER H.E., SCHNEIDER J., 2000 – Assessment of heavy-metal contamination of floodplain soils due to mining and mineral processing in the Harz Mountains, Germany. *Environ. Geol.*, **39**: 774–782.
- GÓRECKA E., 1996 – Mineral sequence development in the Zn–Pb deposits of the Silesian-Cracow area, Poland. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **154**: 26–36.
- GRZECHNIK Z., 1978 – Historia dotychczasowych poszukiwań i eksploatacji. W: *Poszukiwanie rud cynku i ołowiu na obszarze śląsko-krakowskim. Pr. Inst. Geol.*, **83**: 23–39.
- GUO-LI Y., TIAN-HE S., PENG H., JUN L., 2013 – Environmental geochemical mapping and multivariate geostatistical analysis of heavy metals in topsoils of a closed steel smelter: Capital Iron & Steel Factory, Beijing. *China. J. Geochem. Explor.*, **130**: 15–21.
- HAKANSON L., 1980 – An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water. Res.*, **14**: 975–1001.
- HARAŃCZYK C., 1962 – Mineralogia kruszców śląsko-krakowskich złóż cynku i ołowiu. Pr. Geol. Kom. Nauk. Geol. PAN, **8**: 1–74.
- Historia Chorzowa. Internet: http://pl.wikipedia.org/wiki/Historia_Chorzowa (dostęp: 10.05.2018).
- Historia miasta. Internet: <http://swiony.pl/p,s,historia.html> (dostęp: 17.10.2018).
- HŁAWICZKA S., 2008 – Rtęć w środowisku atmosferycznym. Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska PAN, Zabrze.
- JAWORSKA-CYGORIJNI K., 1989 – Produkcja cynku z rud galmanowych w XIX wieku na ziemiach polskich. Zakł. Narod. im. Ossolińskich, Wrocław.
- KABATA-PENDIAS A., MUKHERJEE A., 2007 – Trace Elements from Soil to Human. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- KACHENKO A.G., SINGH B., 2006 – Heavy Metal Contamination in vegetables Grown in Urban and Metal Smelter Contaminated Sites in Australia. *Water Air Soil Pollut.*, **169**: 101–123.
- KANTYKAJ. (red.), 1977 – Chorzów. Zarys rozwoju miasta. Wydaw. Śląsk, Katowice.
- KARCZEWSKA A., SZERSZEN L., KABALA C., 1998 – Forms of selected heavy metals and their transformation in soils polluted by the emissions from copper smelters. *Adv. GeoEcology*, **31**: 705–712.
- KŁOZY-KARCZMARCZYK B.I., MAZUREK J., 2013 – Studies of mercury content in selected coal seams of the Upper Silesian Coal Basin. *Gosp. Sur. Miner.*, **29**, 4: 95–106.
- LIS J., PASIECZNA A., 2005 – Factor analysis for geochemical characteristic of soils in the mining and smelting area (Śląsk-Bolesław region). *Pr. Spec., PTMin.*, **25**: 146–149.
- LOSKA K., WIECHUŁA D., KORUS I., 2004 – Metal contamination of farming soils affected by industry. *Environ. International*, **30**: 159–165.
- LUA X., WANG J.H., QIN X.Y., WANG K.Y., HAN P., ZHANG S.Z., 2012 – Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in the agricultural soils in Shunyi, Beijing, China. *Sci. Total Environ.*, **425**: 66–74.
- ŁABĘDZKI A., MICHALISZYN A., KLIMCZYK A., 2009 – Metalurgia ekstrakcyjna żelaza. Wydaw. AGH, Kraków.
- ŁOMNICKI A., 2016 – Wprowadzenie do statystyki dla przyrodników. Wydaw. Nauk. PWN, Warszawa.
- MAJ M., KALANDYK B., ZAPAŁA R., 2010 – Nowoczesne metody recyklingu w przemyśle metalurgicznym. *Arch. Foundry Eng.*, **10**: 103–106.
- MAJORCZYK R., 1986 – 125 lat Zakładów Górniczo-Hutniczych Orzeł Biały. *Rudy Metale*, **31**, 12: 462–469.
- MICHALIK J. (red.), 2003 – Program Ochrony Środowiska wraz z Planem Gospodarki Odpadami dla Miasta Chorzów na lata 2004–2007 wraz z prognozą do roku 2011. Internet: http://www.bip.chorzow.eu/add_www/file/prog_os.pdf (dostęp: 17.10.2018).
- MICHALSKA A., BIAŁECKA B., 2012 – Zawartość rtęci w węglu i odpadach górniczych. *Pr. Nauk. Gł. Inst. Gór. Ser. Gór. i Środ.*, **3**: 73–87.

- MÜLLER G., 1969 – Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *GeoJournal*, **2**, 3: 108–118.
- MOLENDĄ D., 1960 – Górnictwo kruszców. *W: Zarys dziejów górnictwa na ziemiach polskich*, t. 1 (red. J. Pazdura): 120–162. Wydaw. Górnictwo-Hutnicze, Katowice.
- MOLENDĄ D., 1963 – Górnictwo kruszczowe na terenie złóż śląsko-krakowskich do połowy XVI wieku. PAN, Wrocław.
- MOLENDĄ D., 1970 – Kopalnie rud ołowiu na terenie złóż śląsko-krakowskich w XVI–XVIII wieku. Zakł. Narod. im. Ossolińskich, Wrocław.
- MOLENDĄ D., 1972 – Kopalnie rud ołowiu na terenie złóż śląsko-krakowskich w XVI–XVIII wieku. Zakł. Narod. im. Ossolińskich, Wrocław.
- NACHTEGAAL M., MARCUS M.A., SONKE J.E., VANGRONVELD J., LIVI K.J.T., VAN DER LELIE D., SPARKS D.L., 2005 – Effects of in situ remediation on the speciation and bioavailability of zinc in a smelter contaminated soil. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **69**: 4649–4664.
- NAGAJYOTI K.D., LEE K.D., SREEKANTH T.V.M., 2010 – Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environ. Chem. Lett.*, **8**: 199–216.
- NANNONI F., PROTANO G., RICCOBONO F., 2011 – Uptake and bioaccumulation of heavy elements by two earthworm species from a smelter contaminated area in northern Kosovo. *Soil Biol. Biochem.*, **43**: 2359–2367.
- NAVARRO M.C., PÉREZ-SIRVENT C., MARTÍNEZ-SÁNCHEZ M.J., VIDAL J., MARIMÓN J., 2006 – Lead, cadmium and arsenic bioavailability in the abandoned mine site of Cabezo Rajao. *Chemosphere*, **63**, 3: 484–489.
- NIEMIEROWSKI W., 1983 – Dwa wieki huty „Zabrze” 1782–1982. Prasa ZSL, Warszawa.
- NOWAK J., LUTYŃSKA S., 2015 – Wpływ antropopresji na środowisko wodne obszaru Zespołu Przyrodniczo-Krajobrazowego Żabie Doły (Górny Śląsk). *Arch. Gosp. Odpadami i Ochrony Środowiska*, **17**, 2: 11–18.
- OWCZAREK J., SYSKA A., CABAN E., SZALA M., SZYMAŃSKA J., WOŹNIAKOWSKA A., 2012 – Wstępne sprawozdanie z inwentaryzacji obiektów przemysłowych w województwie śląskim. Śląskie Centrum Dziedzictwa Kulturowego, Katowice.
- PASIECZNA A. (red.), FAJFER J., STRZEMIŃSKA K., 2016 – Szczegółowa mapa geochemiczna Górnego Śląska 1:25 000, ark. Zabrze. Państw. Inst. Geol. – Państw. Inst. Badaw., Warszawa.
- PATER Z., 2014 – Podstawy metalurgii i odlewnictwa. Wydaw. Politechniki Lubelskiej, Lublin.
- PAULO A., KRZAK M., 2018 – Modern trade standards for steel raw materials. *Gosp. Sur. Miner.*, **34**, 3: 5–30.
- PAULO A., STRZELSKA-SMAKOWSKA B., 2000 – Rudy metali nieżelaznych i szlachetnych. Wydaw. AGH, Kraków.
- PAULSON A.J., 1997 – The transport and fate of Fe, Mn, Cu, Zn, Cd, Pb, and SO₄ in a groundwater plume and in downstream surface water in the Coeur d’Alene mining district. Idaho, USA. *Appl. Geochem.*, **12**, 447–464.
- PELFRÈNE A., WATERLOT C., MAZZUCA M., NISSE C., BIDAAR G., DOUAY F., 2011 – Assessing Cd, Pb, Zn human bioaccessibility in smelter-contaminated agricultural topsoils (northern France). *Environ. Geochem. Health*, **33**: 477–493.
- PODGÓRSKA B., PODGÓRSKI A., 2014 – Kalendarium Godulowe 1748–2014. Internet: http://biblioteka.r-sl.pl/pasje/pliki/godula_fermata/kalendarium_godulowe.pdf (dostęp: listopad 2018).
- RÓŻKOWSKA A., PTAK B., 1995a – Bar w węglach kamiennych Górnego Śląska. *Prz. Geol.*, **43**, 3: 223–226.
- RÓŻKOWSKA A., PTAK B., 1995b – Atlas geochemiczny złóż węgla kamiennego Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- SASS-GUSTKIEWICZ M., 1997 – Revised and completed paragenetic order of minerals in the Pomorzany lead-zinc deposit, Upper Silesian district, Poland. *Miner. Pol.*, **28**: 67–80.
- SMOLIŃSKI A., 2006 – Gospodarka zasolonymi wodami kopalnianymi. *Pr. Nauk. Gl. Inst. Gór. Ser. Gór. i Środ.*, **1**: 5–15.
- SORDON-KULIBABA B., 2010 – Program ochrony środowiska dla miasta Świętochłowice. Internet: https://www.swietochlowice.pl/files/PDF/programy_ekologiczne/POS_aktualizacja.pdf (dostęp: listopad 2018).
- SULIMIERSKI F., WALEWSKI W. (red.), 1880–1914 – Słownik geograficzny Królestwa Polskiego i innych krajów słowiańskich. Wydaw. Kasa im. Józefa Mianowskiego, Warszawa.
- SUTHERLAND R.A., TOLOSA C.A., TACK F.M.G., VERLOOM M.G., 2000 – Characterization of selected element concentrations and enrichment ratios in background and anthropogenically impacted roadside areas. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, **38**: 428–438.
- SWENNEN R., VAN KEER I., DEVOS W., 1994 – Heavy metal contamination in overbank sediments of the Geul river (East Belgium): its relation to former Pb–Zn mining activities. *Environ. Geol.*, **24**: 12–21.
- SZCZECZ B., 2003 – Siedemnastowieczny transumpt Fundacji Łagiewnickiej dla kościoła mariackiego w Bytomiu (1495). Internet: http://www.sbc.org.pl/Content/129556/4_Posortowane_013.pdf (dostęp: 17.10.2018).
- SZPADT R. (red.), 1994 – Zanieczyszczenie środowiska rtęcią i jej związkami. Bibl. Monitoringu Środowiska, Warszawa
- SZULC W., 2013 – Transformacja polskiego hutnictwa żelaza do gospodarki wolnorynkowej. Wydaw. Inst. Metalurgii Żelaza, Gliwice.
- SZUWARZYŃSKI M., 1996 – Ore bodies in the Silesian-Cracow Zn–Pb ore district, Poland. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **154**: 9–24.
- VIETS J.G., LEACH D.L., LICHTÉ F.E., HOPKINS R.T., GENT C.A., POWELL J.W., 1996 – Paragenetic and minor- and trace-element studies of Mississippi Valley type ore deposits of the Silesian-Cracow district, Poland. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **154**: 51–71.
- WALERJAŃSKI D., 2006 – Zabrze krok po kroku. Wydaw. Frodo, Zabrze.
- WIECZORKOWSKA G., WIERZBIŃSKI J., 2011 – Statystyka. Od teorii do praktyki. Wyd. Nauk. Scholar, Warszawa.
- WILANOWSKI S., KRIEGER W., ŻABA M., 2009 – Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1:50 000, ark. Zabrze (942). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- WYCZÓLKOWSKI J., 1957 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000, ark. Zabrze. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- ZHANG J., LIU C.L., 2002 – Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China-weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes. *Estuar. Coast Shelf Sci.*, **54**: 1051–1070.
- ZIĘTEK-KRUSZEWSKA A., 1978 – Charakterystyka mineralogiczna siarczków w utworach triasowych. *W: Poszukiwanie rud cynku i ołowiu na obszarze śląsko-krakowskim. Pr. Inst. Geol.*, **78**: 211–215.
- ZMIANA Studium Uwarunkowań i Kierunków Zagospodarowania Przestrzennego Miasta Świętochłowice. Internet: http://www.bip.swietochlowice.pl/res/serwisy/bip-swietochlowice/komunikaty/_003_003_004_394931.pdf (dostęp 17.10.2018).
- ŻABIŃSKI W., 1960 – Charakterystyka mineralogiczna strefy utlenienia śląsko-krakowskich złóż kruszców cynku i ołowiu. *Pr. Geol. Komis. Nauk. Geol. PAN*, **1**: 1–73.

SUMMARY

The purpose of the presented work was to determine the degree of accumulation of heavy metals, arsenic and sulphur in the soils of the central part of the Upper Silesian Industrial Region. Heavy industry, mining of metal ores and hard coal, iron and non-ferrous metallurgy as well as the discharge of industrial and municipal sewage caused strong degradation of the natural environment of this region.

In the years 2013–2014, soil samples were collected from the study area (Fig. 1) in a regular grid of 250×250 m (2806 topsoil samples (0.0–0.3 m) and 2242 subsoil samples (0.8–1.0 m)). The samples were air-dried, sieved through a 2-mm nylon sieve and pulverized in an agate planetary ball mill to a grain size < 0.06 mm. After aqua regia digestion, contents of Ag, Al, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, S, Sn, Sr, Ti, V and Zn were determined by the ICP-AES method. Determination of Hg was performed using the CV-AAS method.

To evaluate the results of the elemental content in soils, statistical methods were used by calculating the following parameters: minimum, maximum, mean, median, standard deviation, and coefficient of variation. The median values of the chemical elements in the study area were compared with their median values in the Silesian-Cracow region (approximate level of regional geochemical background) (Tables 1 and 2). The variability in the coefficient of variation (CV) was used to separate the groups of elements that can come mainly from natural or anthropogenic sources (Tab. 3).

The soil contamination was assessed based on the contamination factor (CF), enrichment factor (EF) and geoaccumulation index I_{geo} . The tests revealed elevated contents of metals, arsenic and sulphur, exceeding the regional geochemical background levels. Additionally, the values of individual indicators adopted for the assessment of anthropogenic pollution are characterized by good convergence.

Using the factor analyses (matrices obtained after the rotation Varimax) in the soil samples from the depths of 0.0–0.3 m and 0.8–1.0 m, six factors with an eigenvalue > 1 were distinguished, which are significant for the interpretation of the results. Factor analysis made it possible to combine chemical elements into groups, probably derived from the same sources. These factors account for 67.53% correlation within the topsoil and 72.92% correlation in the subsoil (Tab. 4). Spatial distribution the three of the sepa-

rated factors in the topsoil and subsoil are presented on the maps (Figs. 5–10).

The high content of the analyzed metals, arsenic and sulphur as well as the spatial distribution of their anomalies in soils made it possible to link their sources to the industry (mainly historical Zn-Pb ore extraction and metal smelting).

In the topsoil there was noted above and/or almost threefold enrichment in strontium, calcium, zinc, barium and copper, as compared to the geochemical background. In the subsoil, the same was observed for calcium, strontium, manganese and zinc.

The concentrations of cobalt, magnesium, nickel, manganese, iron and mercury in the topsoil are twice the geochemical background. In the deeper layer, enrichment in copper, lead, iron, barium, magnesium, chromium, nickel, phosphorus, cobalt and sulphur is observed.

Anthropogenic concentration of the analyzed elements confirms the values of CF in the topsoil (Fig. 2) and the mean values of EF in the topsoil and subsoil (Fig. 3). The application of geoaccumulation index I_{geo} seems to be the most useful for the assessment of topsoil contamination. The distribution of the percentile values 25–75 and the median of this indicator for individual elements show the very high contamination of the topsoil by lead and zinc, as well as heavy cumulation of calcium, strontium, iron, manganese, copper, cadmium, sulphur and barium (Fig. 4).

The use of factor analysis has made it possible the grouping of elements coming probably from the same sources (Tab. 4) and the spatial distribution of the values of the first three factors (Figs. 5–10) allow indicating the areas of anomalously polluted soils.

The analysis of the research results shows that the degree of chemical transformation of the soils in many areas is very advanced, and anthropogenic changes are observed in all types of soils developed from lithologically diverse Carboniferous, Triassic and Quaternary deposits.

The most important sources of metals, sulphur and arsenic are the remains of the Zn-Pb ore dumps, historical waste dumps of zinc smelters (resulting in accumulation of zinc, cadmium, arsenic, lead and sulphur in soils), modern iron and steel industry (affecting dispersion of chromium, manganese, molybdenum, copper and tin) as well as coal burning that results in mercury-, sulphur- and metal-containing dust emissions.

