

OCENA ZANIECZYSZCZEŃ TERENÓW ZDEGRADOWANYCH Z WYKORZYSTANIEM INFORMACJI PRZESTRZENNEJ NA PRZYKŁADZIE PRZEMYSŁU HUTNICZEGO

Rafał Rozpondek¹, Katarzyna Rozpondek¹, Małgorzata Kacprzak¹

¹ Wydział Infrastruktury i Środowiska, Politechnika Częstochowska, ul. Dąbrowskiego 69, 42-200 Częstochowa,
e-mail: raf.rozpo@gmail.com, krozpondek.pcz@gmail.com, mkacprzak@is.pcz.czyst.pl

STRESZCZENIE

Celem badań była ocena stopnia zanieczyszczeń metalami ciężkimi fragmentu terenu zalesionego o powierzchni 147 ha (1050 x 1400 m) znajdującego się w okolicy Huty Cynku „Miasteczko Śląskie”, dla potrzeb procesów rekultywacji lub monitoringu. W badaniach zastosowano system GIS. W marcu 2016 roku zaplanowano regularną sieć 29 punktów pomiarowych. Na każdym z punktów pobrano dwie próbki gleb z wierzchniej warstwy gleby 0 – 20 cm. Zostały one poddane analizom pod kątem pH, zawartości substancji organicznej i metali ciężkich (As, Ba, Cd, Cu, Ni, Pb i Zn). Wartości pH wahały się między 3,7 a 7,9, materii organicznej 0,8 – 47,1% suchej masy próbki, As 0 – 32,5 mg/kg, Ba 14 – 804 mg/kg, Cd 0 – 19 mg/kg, Cu 3 – 58 mg/kg, Pb 22 – 1893 mg/kg, Zn 36 – 1377 mg/kg. W badanych próbkach nie wykryto niklu. Wykonano rozkłady przestrzenne analizowanych elementów. Stwierdzono znaczną rozpiętość wartości i zróżnicowanie przestrzenne danych. Następnie na podstawie Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016 r. w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi wytypowano tereny zanieczyszczone metalami ciężkimi. Przyjęto dwie różne dopuszczalne wartości stężeń: pierwsze zgodne z faktycznym sposobem użytkowania gruntu (dopuszczalne wartości dla grupy III – tereny zalesione) oraz drugie związane z ewentualnym podjęciem działań mających na celu zmianę sposobu zagospodarowania terenu (dopuszczalne wartości dla grupy I – tereny zabudowy mieszkaniowej, tereny rekreacyjne). Na podstawie wygenerowanych modeli wyznaczono i obliczono pole powierzchni obszarów, które zawierają wartości wyższe niż dopuszczalne w przytoczonym rozporządzeniu. W przypadku grupy III wartości przekroczyły: Zn (obszar 0,9 ha), Pb (46,4 ha) i Cd (27,8 ha). Dla grupy I: As (0,3 ha), Ba (10,2 ha), Cd (53,9 ha), Pb (120,8 ha) i Zn (20,2 ha). Stężenia Ni i Cu były niższe niż wartości dopuszczalne. W pracy wyznaczono także strefy o najwyższych zawartościach metali ciężkich. Dodatkowo zaplanowano sieć monitoringu ze szczególnym uwzględnieniem zanieczyszczeń punktowych.

Słowa kluczowe: metale ciężkie, rozkład przestrzenny, tereny zdegradowane

EVALUATION OF CONTAMINATION OF ZN-PB INDUSTRY DEGRADED AREAS USING SPATIAL INFORMATION

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate soil contamination by heavy metals of selected area in the vicinity of the Zinc Smelter „Miasteczko Śląskie” (surface area: 147 ha, 1050 x 1400 meters) for purpose of future reclamation, remediation and monitoring. The study used GIS. Network of 29 measuring points was planned, with particular emphasis on the area with the least amount of pure vegetation. In March 2016, two samples of soil were taken from the top layer of soil 0 – 20 cm. Samples were analyzed in terms of pH, soil organic matter and total heavy metal content (As, Ba, Cd, Cu, Ni, Pb i Zn). Values of pH maintained in range of 3,7 – 7,9, organic matter 0,8 – 47,1% of solid content, As 0 – 32,5 mg/kg, Ba 14 – 804 mg/kg, Cd 0 – 19 mg/kg, Cu 3 – 58 mg/kg, Pb 22 – 1893 mg/kg, Zn 36 – 1377 mg/kg. In collected samples Ni was not detected. Spatial distributions of results were created. A significant data range and spatial differentiation was noted. On the base of the Regulation of the Minister of the Environment from September 1st, 2016 on the method of conducting the assessment of contamination of the surface of the earth, areas contaminated with heavy metals were selected. Two different concentration limits were adopted: first in accordance with the actual method of land use (permissible values for group III – woodland) and second relating to the possible undertaking of measures targeted at changing the land use (limit values for Group

I – residential areas, recreational areas). On the basis of the generated models, the area of the surface size that contains values higher than allowed in the quoted regulation were determined and calculated. In case of group III the values were exceeded for: Zn (surface area 0,9 ha), Pb (46,4 ha) i Cd (27,8 ha). For group I: As (0,3 ha), Ba (10,2 ha), Cd (53,9 ha), Pb (120,8 ha) i Zn (20,2 ha). The concentrations of Ni and Cu were lower than the limit value. The paper also determined zones with the highest contents of heavy metals. In addition, a monitoring network with a special focus of area pollution was advised.

Keywords: heavy metals, spatial distribution, land degradation

WPROWADZENIE

Problem zanieczyszczenia gleb jest istotnym zagadnieniem związanym między innymi z rozwijającym się przemysłem, postępującą urbanizacją, rolnictwem i górnictwem. Emisja zanieczyszczeń, a w tym metali ciężkich, następuje za pośrednictwem szerokiej gamy procesów np. spalania, wydobywania, przetwarzania, transportu czy składowania. Ze względu na znaczną rozpuszczalność związków metali ciężkich (np. Pb, Zn) mogą one stanowić zagrożenie nie tylko dla wierzchniej warstwy gleby, ale także dla wód powierzchniowych i podziemnych [Järup 2003, Rozpondek et al. 2016, Sollitto et al. 2010]. Metale ciężkie nie ulegają biodegradacji, gdy zostaną wprowadzone do gleby pozostają w niej na stałe. Skutki tego zjawiska stanowią duże zagrożenie dla środowiska naturalnego i człowieka. Zanieczyszczenia gleb charakteryzują się wysokim stopniem zmienności przestrzennej z powodu licznych procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych, które działają z różną intensywnością i w różnych skalach [Ociepa-Kubicka and Ociepa 2012, Singh et al. 2011].

Słabo uregulowana gospodarka przemysłowa związana z obróbką metali powoduje powstawanie miejsc zanieczyszczonych, zarówno przez metale, jak i metaloidy [Clemente et al., 2008]. Tradycyjne metody oczyszczania gleb bazują na koncepcjach chemicznych i fizycznych. Takie zabiegi są zwykle kosztowne, wymagają dużej ilości energii i mogą mieć negatywny wpływ na funkcje i strukturę gleby [Wu et al., 2010, Marchiol et al. 2013].

Procesy związane z poprawą jakości gleb są konieczne, a zarazem dość kosztowne. Wyznaczenie rozkładu przestrzennego może być bardzo istotne dla realizowania celów tych procesów. Istota ich zastosowania została wykazana w planowaniu rekultywacji gleb terenów pokopalnianych [Acosta et al. 2011], rewitalizacji terenów, wyznaczaniu wartości parametrów gleb dla celów remediacji [Sollitto D et al., 2010] oraz w zakresie monitoringu środowiska, zarówno glebowego

[Rozpondek et al. 2016, Xia et al. 2016], jak i wodnego [Shu-you et al. 2008, Ahmadi et al. 2008].

W Polsce aktualne Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016 r. w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi określa wartości dopuszczalnych stężeń poszczególnych metali ciężkich jak i sposób pomiaru terenów zanieczyszczonych. Uwzględnia także wykorzystanie odbiorników GPS w celu zapisania i możliwości przyszłego odtworzenia miejsca poboru prób gleby. Ze względu na rozwój technologiczny zastosowanie systemu GIS w celu wzbogacenia badań środowiskowych przez dodanie informacji przestrzennej, staje się coraz bardziej powszechne. Potwierdza to wzrost w ostatnich latach liczby artykułów dotyczących tego zagadnienia [Zawadzki 2011].

Celem badań była ocena stopnia zanieczyszczenia metalami ciężkimi fragmentu zalesionego terenu, o powierzchni 147 ha (1050 x 1400 m) znajdującego się w okolicy Huty Cynku „Miasteczko Śląskie”, dla potrzeb procesów rekultywacji lub monitoringu. W badaniach zastosowano system GIS [Rozpondek et al. 2016].

OBSZAR I METODYKA BADAŃ

Huta Cynku „Miasteczko Śląskie” to zakład działający od początku lat 70 XX wieku. Przedsiębiorstwo to produkuje cynk, ołów surowy i rafinowany oraz kwas siarkowy. W wyniku wieloletniej emisji zanieczyszczeń do atmosfery tereny wokół zakładu zostały silnie skażone metalami ciężkimi (Pb, Zn, Cd) oraz gazami (SO_2 , CO). W efekcie toksycznego działania pyłów metalicznych w najbliższym otoczeniu zakładu na dużym obszarze wytworzyły się obszary całkowicie lub w znacznym stopniu pozbawione roślinności. Zawartość metali ciężkich w latach 2004–2010 zaprezentowano w Tabeli 1 [Kacprzak 2007].

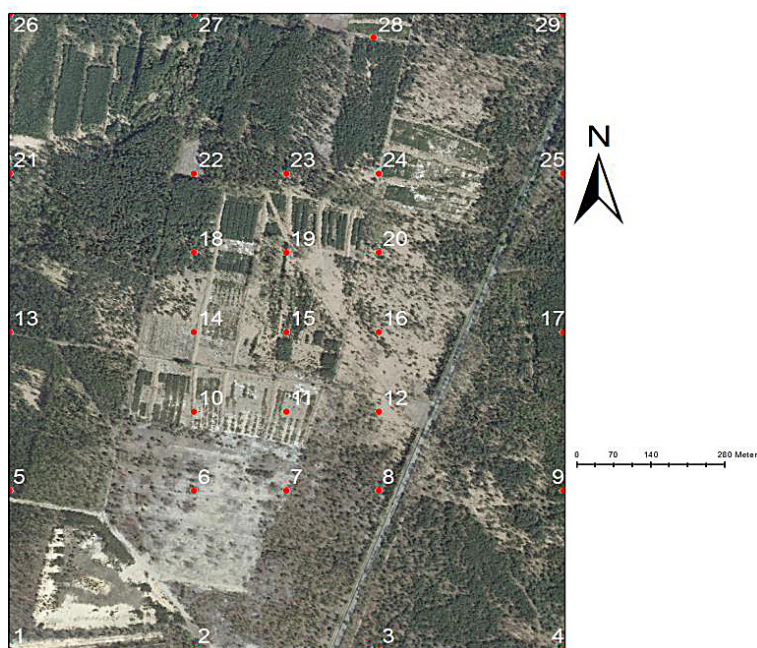
W 2015 roku postanowiono ponownie przeprowadzić badania na wymienionym obszarze. Na podstawie zdjęć lotniczych oraz wywiadu

Tabela 1. Zawartość metali ciężkich w wierzchniej warstwie gleby (0–20cm) na obszarze Huty Cynku „Miasteczko Śląskie” [Kacprzak 2007]**Table 1.** Heavy metal content in soils (0–20 cm) in the area of zinc smelter “Miasteczko Śląskie” in 2004 – 2010 [Kacprzak 2007]

Pierwiastek	Zawartość metali ciężkich w glebach w okolicy Huty Cynku „Miasteczko Śląskie” [mg/kg]	Średnia zawartość metali ciężkich w glebach na terenie Polski [mg/kg]
Ag	3,5 – 56,0	0,03 – 0,1
As	4,5 – 67,0	2 – 13
Pb	540 – 1124	13 – 25
Cd	4,0 – 11,0	0,05 – 0,3
Ni	5,0 – 13,0	5 – 23
Zn	428 – 1220	35 – 80
Cu	6 – 74	5 – 19
Cr	10,5 – 17,5	15 – 740

terenowego wytypowano teren, który najprawdopodobniej jest silnie zanieczyszczony (przy wyborze sugerowano się głównie rozkładem roślinności). Zaplanowano sieć 29 punktów pomiarowych (rysunek 1), ze szczególnym uwzględnieniem terenu o najmniejszej ilości roślinności – dodano dodatkowe punkty w okolicy tego obszaru. Sieć pomiarowa ma postać siatki kwadratów o różnych długościach boków – dla obszaru centralnego wynosi ona 175 metrów, natomiast dla zewnętrznego 350 metrów. W marcu 2016 roku na każdym z punktów pobrano dwie próbki gleb z wierzchniej warstwy gleby (0 – 20 cm) [Rozpondek et al. 2016].

Pobrane próbki gleby suszono wstępnie w temperaturze pokojowej i przesiano przez sito o średnicy oczek 2 mm. Następnie wysuszono je w temperaturze 105°C do stałej masy i kolejno utarto w moździerzu. Z każdego punktu przygotowano do analiz łącznie sześć próbek (po trzy dla każdej próbki gleby). Następnie w celu oznaczenia metali ciężkich wykonano ekstrakcję metali wodą królewską (mieszanina kwasu solnego i azotowego w stosunku objętościowym 3:1) zgodnie z normą PN-ISO 11466:2002. Mineralizację przeprowadzono w temperaturze 180°C w czasie 30 minut, przy zastosowaniu wysokociśnieniowego mineralizatora mikrofalowego nie-

**Rys. 1.** Rozmieszczenie punktów pomiarowych dla obszaru znajdującego się w okolicy Huty Cynku „Miasteczko Śląskie” [Rozpondek et al. 2016]**Fig. 1.** Arrangement of measurement points for an area in the vicinity of the „Miasteczko Slaskie” Zinc Smelter” [Rozpondek et al. 2016]

mieckiej firmy Berghof. Zawartość metali ciężkich oznaczono na spektrofotometrze plazmowym ICP-OES IRIS Thermo [Rozpondek i Rozpondek 2017, Rozpondek i Wancisiewicz 2016]. Próbkę poddano analizom pod względem wartości pH. Została ona wyznaczona w roztworze KCl przy zastosowaniu metody potencjometrycznej według normy PN-ISO 10390:1997 [Rozpondek et al. 2016]. Zawartość materii organicznej wyznaczono zgodnie z normą PN-ISO 11465:1999.

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Pierwszy etap badań dotyczył wykonania statystyki opisowej uzyskanych wyników (tab. 2). Dane charakteryzują się zbliżonym do siebie rozkładem (silna prawostronna asymetria), który znacznie odbiega od rozkładu normalnego. Zauważono znaczną rozpiętość danych, wysoką wartość odchylenia standardowego w stosunku do wartości średniej oraz wysokie wartości współczynników skośności i kurtozy. Ze względu na powyższe reprezentacja zawartości metali przez parametry opisujące rozkład normalny (wartość średnia i odchylenie standardowe) może być niepoprawna. Koniecznym jest zastosowanie innego sposobu reprezentacji danych – np. rozkładu przestrzennego.

W tabeli nie uwzględniono Cr, Ni, Ag oraz Co, ponieważ w badanych próbach gleby nie wykryto ich zawartości. Natomiast As i Cd w większości przypadków przyjmowały wartości bliskie zera. Wyniki uzyskane na analizowanym terenie w porównaniu z poprzednimi badaniami prowadzonymi w okolicy Huty Cynku “Miasteczko Śląskie” [Kacprzak 2007] wykazują dość silną analogię. Znaczne różnice występują głównie w przypadku Ni, As i Ag – w obecnych badaniach te pierwiastki

nie zostały wykryte lub występują na małych obszarach i w stosunkowo niewielkich stężeniach. Różnice te mogą być spowodowane wyborem innego terenu badań, jak i znacznym odstępem czasu między pomiarami. W pozostałych przypadkach wyniki można uznać za analogiczne.

Wykorzystując metodę Wagowanej Odwrotnej Odległości [Lu i Wong 2008] wykonano rozkłady przestrzenne badanych elementów. Rezultaty zaprezentowano na rysunkach 2 i 3. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono:

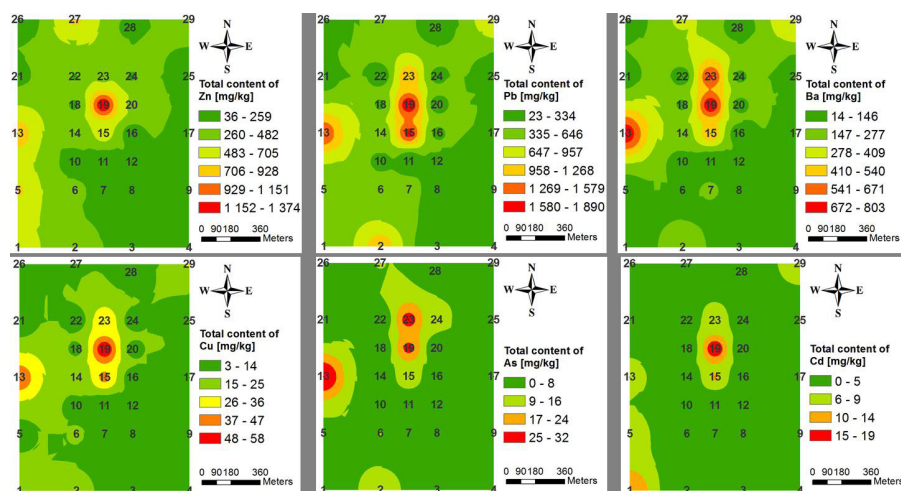
- dane charakteryzują się dużym zróżnicowaniem przestrzennym,
- najwyższe stężenia metali występują w części centralnej i zachodniej,
- na obszarze badań dominują gleby kwaśne i bardzo kwaśne (3 – 5 pH), [Rozpondek et al. 2016],
- zawartość materii organicznej i odczyn pH mają wpływ na rozkład metali ciężkich,
- najmniej zanieczyszczona jest część południowo-wschodnia.

Przedstawione powyżej zależności mogą mieć istotny wpływ na planowanie kolejnych badań. Ze względu na bardzo wysokie stężenia metali ciężkich, obszar znajdujący się w okolicach punktów 15, 19, 23 i 13 powinien zostać szczególnie uwzględniony w planowaniu przyszłych badań. Punkty 6, 7 i 8 mogłyby zostać pominięte – mają niewielki wpływ na końcowe wyniki. W przypadku południowo-wschodniej części ilość punktów pomiarowych mogłaby zostać zmniejszona. Jednak z uwagi na niskie pH (około 3,5), które sprzyja mobilności metali ciężkich, nadal powinna podlegać monitoringowi [Kazlauskaitė-Jadzevičė et al. 2013]. Dodatkowo ze względu na specyfikę i trend uzyskanych rozkładów metali ciężkich należy rozszerzyć obszar badań w stronę zachodnią

Tabela 2. Statystyka analizowanych pierwiastków

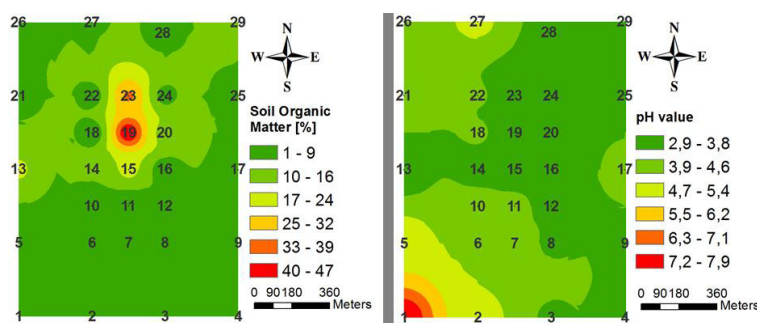
Table 2. Statistics of the analyzed elements

Pierwiastek	Wskaźnik								
	Średnia	Mediana	Min.	Max	Pierwszy kwartyl	Trzeci kwartyl	Odchylenie standardowe	Skośność	Kurtoza
Zn [mg/kg]	331,7	223	36	1377	146	449	296,83	1,850	4,311
Pb [mg/kg]	453,1	253	22	1893	89	510	529,26	1,591	1,565
Ba [mg/kg]	185,0	84	14	804	50	224	227,92	1,768	2,096
Cd [mg/kg]	2,5	0	0	19	0	0	4,94	2,033	3,688
Cu [mg/kg]	14,2	10	3	58	5	15	13,37	1,946	3,562
As [mg/kg]	5,4	0	0	33	0	8	9,46	1,882	2,658
pH	3,94	3,7	2,9	7,9	3	4	0,98	2,489	8,851
SOM [%]	7,49	3,1	0,8	47,2	2	7	10,48	2,639	7,461



Rys. 2. Rozkłady przestrzenne całkowitej zawartości metali ciężkich w glebach w okolicy Huty Cynku „Miasteczko Śląskie”

Fig. 2. Spatial distribution of total heavy metal content in vicinity of The “Miasteczko Śląskie” Zinc Smelter)



Rys. 3. Rozkłady przestrzenne wartości pH i materii organicznej w glebach w okolicy Huty Cynku „Miasteczko Śląskie”

Fig. 3. Spatial distribution of pH and organic matter in vicinity of The “Miasteczko Śląskie” Zinc Smelter)

i południowo-zachodnią. Istnieje znaczące prawdopodobieństwo występowania wysokich stężeń pierwiastków w tamtych regionach.

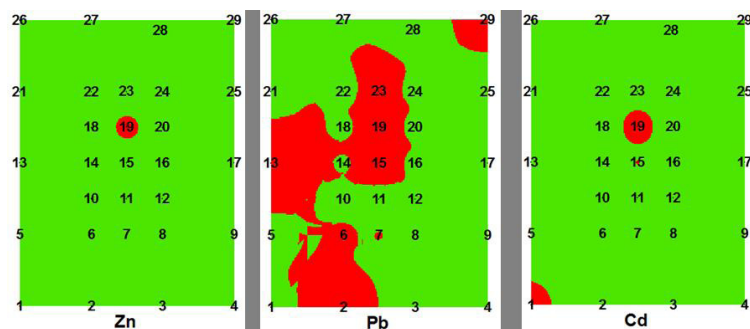
Na podstawie aktualnego Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016 r. w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi wyznaczono strefy, które wymagają procesów mających na celu poprawę jakości gleb (rys. 4). Przy doborze wartości dopuszczalnych kierowano się aktualnym sposobem użytkowania terenu (grupa III – obszary zalesione). Przeprowadzano także symulację mającą na celu wskazanie obszarów, które musiałyby ulec poprawie w przypadku zmiany sposobu zagospodarowania terenu (przyjęto wartości dopuszczalne dla grupy I – tereny zabudowy mieszkaniowej, tereny rekreacyjne). Wyniki zaprezentowano na rysunku 5. Wartości dopuszczalne dla grupy I i III przedstawiono w tabeli 3.

Obliczono powierzchnie o podwyższonym stężeniu metali ciężkich i wraz z jej procentowym

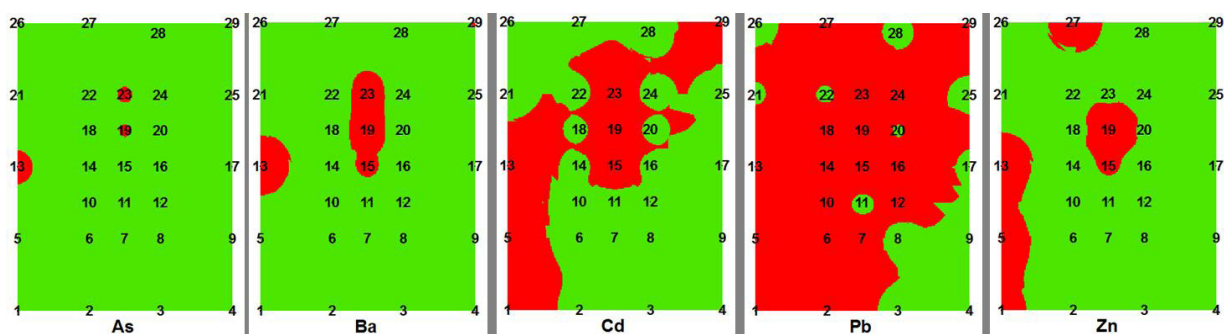
udziałem w stosunku do całej powierzchni analizowanego obszaru zawarto w tabeli 4.

W przypadku grupy III tylko trzy pierwiastki przekroczyły wartości dopuszczalne. W przypadku Zn jest to zaledwie 0,9 ha (okolice punktu 19), Cd 2,8 ha (głównie okolice punktów 19 i 1). Pierwiastkiem, który znacznie przekroczył wartości dopuszczalne jest Pb. W przypadku tego pierwiastka aż 46,4 ha, które stanowią 31,6% całego obszaru wymaga zabiegów rekultywacyjnych. Ba, Cu i As nie przekroczyły założonych wartości.

Dla grupy I wartości dopuszczalne przekroczyło 5 pierwiastków (Zn – 20,2 ha, Pb – 120,8 ha, Ba – 10,2 ha, Cd – 53,9 ha i As – 2,3 ha). Podobnie, jak w przypadku grupy III, głównym problemem jest zawartość Pb, która przekracza wartości na 82,2% badanego terenu. Dodatkowo przy zmianie sposobu zagospodarowania terenu (na grupę I), poza Pb, Zn i Cd, które przekroczyły wartości dla grupy III, należałoby uwzględnić As i Ba.



Rys. 4. Strefy wymagające poprawy jakości gleb według wartości dopuszczalnej dla grupy III – tereny zalesione
Fig. 4. Areas with higher values of heavy metals then permissible for group III – wooded areas



Rys. 5. Strefy wymagające poprawy jakości gleb według wartości dopuszczalnej dla grupy I – tereny zabudowy mieszkaniowej, tereny rekreacyjne

Fig. 5. Areas with higher values of heavy metals then permissible for group I – residential areas, recreational areas

Tabela 3. Dopuszczalne wartości stężeń dla grupy I i III na podstawie Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016 r

Table 3. Permissible values for group I and III in accordance to the Polish Regulation of the Minister of the Environment of September 1st, 2016

Pierwiastek	Wartości dopuszczalne [mg/kg]	
	Grupa I	Grupa III
Zn	500	2000
Pb	200	500
Ba	400	1000
Cd	2	10
Cu	200	300
As	25	50

Między wykonanymi mapami można zauważyć pewną analogię, która wskazuje na to, że działania rekultywacyjne powinny skupić się głównie na obszarze centralnym i kolejno południowo-zachodnim i północno-wschodnim. Obszar południowo-wschodni nie wymaga podjęcia procesów rekultywacji związanych z badanymi metalami ciężkimi. Układ uzyskanego rozkładu zanieczyszczeń może być pośrednio spowodowany

zarówno dominującymi w Polsce wiatrami południowo-zachodnimi, jak i sposobem emisji zanieczyszczeń przez Huty Cynku „Miasteczko Śląskie” (emitowanie pyłów i gazów).

Opisana metoda okazuje się być przydatnym narzędziem diagnostycznym i prognostycznym w procesach remediacji oraz rekultywacji terenów przemysłowych, gdzie zanieczyszczenia gleb stanowią problem środowiskowy. Precyzyjny rozkład wystąpienia zanieczyszczeń, tak trudnych do usunięcia czy też immobilizacji, jak metale ciężkie pozwoli niewątpliwie na lepsze zaplanowanie działań remedacyjnych ze szczególnym uwzględnieniem kosztów całego przedsięwzięcia.

PODSUMOWANIE

W przeprowadzonych badaniach wykazano znaczenie informacji przestrzennej w badaniach zanieczyszczenia obszarów przemysłowych metalami ciężkimi. Przy jej pomocy wykonano dokładną ocenę zanieczyszczonego terenu metalami ciężkimi w okolicy Huty Cynku „Miasteczko Śląskie”. Wyznaczono najbardziej zanieczysz-

Tabela 4. Powierzchnia i procentowy udział terenów wymagających poprawy jakości gleby**Table 4.** Surface area and area percentage for exceeded values

Pierwiastek	Grupa I		Grupa III	
	Powierzchnia [ha]	Udział procentowy [%]	Powierzchnia [ha]	Udział procentowy [%]
Zn	20,2	13,7	0,9	0,6
Pb	120,8	82,2	46,4	31,6
Ba	10,2	6,9	–	–

czne regiony, które obejmowały głównie część centralną i zachodnią. Powinny one zostać objęte dodatkowymi badaniami i odpowiednim monitoringiem. Najmniej zagrożona jest strefa południowo-wschodnia. Aby zapobiec migracji metali, program regeneracji stanu środowiska glebowego powinien obejmować neutralizację odczynu pH, który dla większości obszaru jest bardzo kwaśny (pH na poziomie 3–5).

Wykonane analizy pozwoliły na wykrycie krytycznego stanu środowiska. Stężenie Pb znacznie przekracza wartości dopuszczalne (31,6% badanego terenu). Stwierdzono także wysokie stężenia Zn, Ba, As i Cd oraz śladowe ilości Ag, Ni, As i Cu. Zauważono zależności między wartościami metali ciężkich, a materią organiczną i odczynem pH.

Na podstawie analizy rozkładów przestrzennych wykazano także konieczność poszerzenia obszaru badań w stronę zachodnią oraz południowo-zachodnią. W tych regionach istnieje wysokie prawdopodobieństwo wystąpienia znacznych stężeń metali ciężkich. Dodatkowo ze względu na niskie pH, badania należałoby poszerzyć o ocenę biodostępności i mobilności metali ciężkich.

Podziękowania

Badania finansowane były z wydziałowego grantu BS/MN-401–301/16 Wydziału Infrastruktury i Środowiska Politechniki Częstochowskiej.

BIBLIOGRAFIA

- Acosta J.A., Faz. A., Martinez-Martinez S., Zrozniza R., Carmona D.M., Kabas S. 2011. Multivariate statistical and GIS based approach to evaluate heavy metals behavior in mine sites for future reclamation, *Journal of Geochemical Exploration*, 109(3), 8–17.
- Ahmadi SH., Sedghamiz A. 2008. Application and evaluation of kriging and cokriging methods on groundwater depth mapping. *Environmental Monitoring and Assessment*. 138(1), 357–368.
- Clemente R., Dickinson N.M., Lepp N.W. 2008. Mobility of metals and metalloids in a multi-element contaminated soil 20 years after cessation of the pollution source activity. *Environmental Pollution*. 155, 254–261.
- Järup L. 2003. Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin*. 68, 167–182.
- Kazlauskaitė-Jadzevičė A., Volungevičius J., Gregorauskienė V., Marcinkonis S. 2013. The role of pH in heavy metal contamination of urban soil of urban soil. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 22(4), 311–318.
- Lu G, Wong D. 2008. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Computer & Geosciences*. 34(9), 1044–1055.
- Marchiol L., Fellet G., Boscutti F., Montella C., Mozzi R., Guarino C. 2013. Gentle remediation at the former “Pertusola Sud” zinc smelter: Evaluation of native species for phytoremediation purposes. *Ecological Engineering*. 53, 343–353.
- Ociepa-Kubicka A., Ociepa E. 2012. Toksyczne oddziaływanie metali ciężkich na rośliny, zwierzęta i ludzi, *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 15(2), 169–180.
- PN-ISO 10390:1997 Jakość gleby – Oznaczanie pH
- PN-ISO 11465:1999 Jakość gleby – Oznaczanie zawartości suchej masy gleby i wody w glebie w przeliczeniu na suchą masę gleby – Metoda wagowa
- PN-ISO 11466:2002 Jakość gleby – Ekstrakcja pierwiastków śladowych rozpuszczalnych w wodzie królewskiej
- Rozpondek R., Rozpondek K. 2017. Issues of Sustainable Development in the Light of a GIS-based Assessment of the Geochemical State of the Aquatic Environment. *Problemy Ekorozwoju*. 12(1), 131–137.
- Rozpondek R., Wancisiewicz K. 2016. Analiza rozkładu zanieczyszczeń w osadach dennych z zastosowaniem GIS w przybrzeżnej strefie zbiornika wodnego Ostrowy na rzece Biała Oksza, *Inżynieria i Ochrona Środowiska*. 19(1), 37–49.

14. Rozpondek R., Wancisiewicz K., Kacprzak M. 2016. GIS in the studies of soil and water environment, *Journal of Ecological Engineering*. 17(3), 134–142.
15. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 września 2016 r. w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi
16. Singh R., Gautam N., Mishra A., Gupta R. 2011. Heavy metals and living systems: An overview, *Indian Journal of Pharmacology*. 43(3), 246–253.
17. Sollitto D., Romic M., Castrignano A., Romic D., Bakic H. 2010. Assessing heavy metal contamination in soils of the Zagreb region (Northwest Croatia) using multivariate geostatistics, *Catena*. 80(3), 182–194.
18. Sollitto D., Romic M., Castrignano A., Romic D., Bakic H. 2010. Assessing heavy metal contamination in soils of the Zagreb region (Northwest Croatia) using multivariate geostatistics. *Catena*. 80(3), 182–194.
19. Wu G., Kang H., Zhang X., Shao H., Chu L., Ruan C. 2010. A critical review on the bio-removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: issues, progress, eco-environmental concerns and opportunities. *Journal of Hazardous Materials*. 174, 1–8.
20. Xia X., Yanga Z., Lia G., Yua T., Houa O. 2016. Practicability of monitoring soil Cd, Hg, and Pb pollution based on a geochemical survey in China. Available online 19 Dec.
21. Yang F., Cao S., Liu X., Yang K. 2008. Design of groundwater level monitoring network with ordinary kriging. *Journal of Hydrodynamics*. 20(3), 339–346.
22. Zawadzki J. 2011. Metody geostatystyczne dla kierunków przyrodniczych i technicznych. OPW, Warszawa.