

## **Czynniki meteorologiczne wpływające na koncentrację aerozoli w Krakowie oraz analiza cząstek aerozoli**

### **Meteorological factors affecting on concentration of aerosols in Kraków and analysis of aerosol particles**

#### **STRESZCZENIE**

Głównym celem artykułu jest przedstawienie zależności występujących pomiędzy koncentracją aerozoli w Krakowie, a warunkami meteorologicznymi. Analizę uwarunkowań cyrkulacyjnych przeprowadzono w oparciu o kalendarz typów cyrkulacji dla dorzecza Górnej Wisły autorstwa Niedźwiedzia (1988). W celu określenia koncentracji zanieczyszczeń w poszczególnych dniach wykorzystano dane średniego dobowego stężenia pyłu PM10 ze stacji monitoringu jakości powietrza w Krakowie (2011-2012). Przedstawiono również wyniki wstępnych analiz składu chemicznego oraz morfologii pyłów występujących w powietrzu w Krakowie.

**Słowa kluczowe:** pył zawieszony (PM10), koncentracja, uwarunkowania meteorologiczne, Kraków

**Key words:** particulate matter (PM10), concentration, meteorological conditions, Kraków

#### **WPROWADZENIE**

Aerozole pochodzenia antropogenicznego stanowią istotny składnik wpływający na jakość powietrza atmosferycznego obszarów miejskich. Za główne źródła drobnych pyłów (PM – particulate matter) powstających w wyniku działalności człowieka należy uznać między innymi spalanie paliw kopalnych w sektorze komunalnym, transportowym, przemysłowym oraz pyły emitowane do atmosfery w toku procesów produkcyjnych. Pomimo wdrażania kolejnych programów ochrony powietrza w Krakowie i spadku emisji pyłów z najbardziej uciążliwych zakładów (Realizacja Programu Ochrony Powietrza w Aglomeracji Krakowskiej, 2012), koncentracja drobnych pyłów (PM10, PM2,5) wciąż pozostaje na wysokim poziomie i wyraźnie przekracza dopuszczalne normy stężenia substancji w powietrzu w roku kalendarzowym ustalone w rozporządzeniu Ministra Środowiska z 24 sierpnia 2012r. (Dz. U. 2012 poz. 1031). Potencjalną przyczyną obserwowanego zjawiska, oprócz spalania paliw kopalnych, może być wpływ innych – nieantropogenicznych czynników współodpowiedzialnych za poziom koncentracji pyłu zawieszzonego, takich jak warunki meteorologiczne oraz położenie miasta w obniżeniach terenu jakimi są Pomost Krakowski oraz Równina Nadwiślańska. Wpływ ukształtowania terenu na warunki mezoklimatyczne Krakowa przejawia się między innymi w ograniczaniu dyspersji

zanieczyszczeń zawartych w powietrzu (Bokwa, 2007; German, 2007). Synergia wyżej wymienionych naturalnych czynników wpływających na koncentrację pyłu zawieszonego może stanowić istotny mechanizm odpowiedzialny za niekorzystne warunki aerasanitarne w obrębie aglomeracji krakowskiej. Bliżej niezbadany pozostaje ponadto udział zanieczyszczeń napływających nad obszar Krakowa z sąsiednich obszarów (np. Górnego Śląska) jak i aerozoli przenoszonych w wyniku dalekiego transportu (transgraniczne przenoszenie zanieczyszczeń). Niekorzystne uwarunkowania naturalne oraz nakładające się na nie czynniki antropogeniczne powodują, iż w Krakowie notuje się najbardziej zanieczyszczone powietrze spośród wszystkich polskich miast (średnie roczne stężenie pyłu PM<sub>10</sub> w 2011 roku wynosiło 63 µg/m<sup>3</sup>) (Raport o stanie środowiska w województwie małopolskim, 2012).

Temat dotyczący jakości powietrza atmosferycznego w Małopolsce jak i w samym Krakowie był już niejednokrotnie podejmowany i analizowany również pod kątem wpływu warunków meteorologicznych i cyrkulacyjnych na poziom emisji (Niedźwiedz i Olecki, 1994; Tomaszewska, 2010; Godłowska, 2010; Bielec-Bąkowska, Knozova, Leśnik, Matuszko, Piotrowicz, 2011; Bokwa, 2012). W toku licznych studiów (Morawska-Horawska i Lewik, 1997; Walczewski, 2009; Hajto i Rozwoda, 2010) wykazano między innymi, iż znaczący wpływ na pogorszenie warunków aerasanitarnych w Krakowie może wywierać niekorzystny typ sytuacji synoptycznej i towarzyszący jej inwersyjny rozkład temperatury wzmacniany dodatkowo lokalnymi uwarunkowaniami fizycznogeograficznymi. Wzrost temperatury z wysokością (inwersja) może skutecznie hamować ruchy pionowe powietrza a tym samym przyczyniać się do gromadzenia blisko powierzchni ziemi zanieczyszczeń powietrza. Biorąc pod uwagę powyższe prawidłowości, istotnym wydaje się przeprowadzenie wnikliwego studium dotyczącego zależności występujących pomiędzy koncentracją pyłu drobnego w Krakowie a konkretnymi sytuacjami synoptycznymi. Należy również zwrócić uwagę na występowanie potencjalnego zróżnicowania w wartości koncentracji na wybranych stacjach monitoringu jakości powietrza w Krakowie.

## **CEL I ZAKRES BADAŃ**

Celem niniejszego opracowania jest wykazanie zależności pomiędzy warunkami meteorologicznymi a koncentracją pyłu zawieszonego w Krakowie, ze szczególnym uwzględnieniem uwarunkowań synoptycznych (cyrkulacyjnych). Ponadto przedstawiono również wyniki pierwszych analiz składu chemicznego oraz morfologii pyłów pochodzących z lokalnej emisji jak i transportowanych z obszarów sąsiednich w wyniku napływu mas powietrza. Jest to wstępna próba poznania związku między kierunkiem napływu mas powietrza a morfologią i składem cząstek aerozoli.

## **MATERIAŁY ŹRÓDŁOWE I METODY OPRACOWANIA**

W opracowaniu wykorzystano dane średnich dobowych stężeń pyłu PM<sub>10</sub> ze stacji monitoringu jakości powietrza Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska w Krakowie – stacja w Kurdwanowie (ul. Bujaka) oraz ze stacji w Nowej Hucie (ul. Bulwarowa). Analiza objęła lata 2011 i 2012, a z powodu przerw w funkcjonowaniu

stacji monitoringu, analizie poddano 595 dni. Dane meteorologiczne (średnia dobową temperatura powietrza oraz średnia dobową prędkość wiatru) pochodziły ze stacji naukowej Zakładu Klimatologii Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ „Ogród Botaniczny” w Krakowie.

Zmienność uwarunkowań cyrkulacyjnych przedstawiono na podstawie wskaźników cyrkulacji: P (strefowej), S (południkowej), C (cykloniczności) (Niedźwiedź 1993). Wyżej wymienione wskaźniki wyznaczono w oparciu o kalendarz sytuacji synoptycznych dla dorzecza górnej Wisły (za okres 2011-2012) opracowany przez Niedźwiedzia (2013) i dostępny między innymi w zbiorach cyfrowych Uniwersytetu Śląskiego. Wartości wskaźników cyrkulacji (P, S oraz C) są liczbami niemianowanymi i oblicza się je poprzez zsumowanie punktów przyporządkowanych odpowiednim sytuacjom synoptycznym według metodyki zaproponowanej przez Niedźwiedzia (1988).

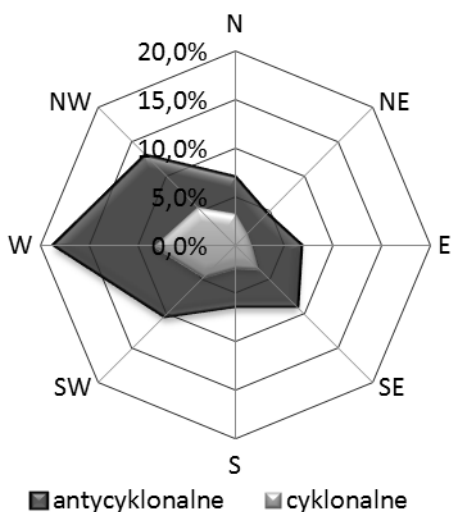
Pobór próbek pyłu dokonywano przy użyciu aspiratora osobistego GilAir Plus STP podczas napływu mas powietrza z wybranych sektorów w oparciu o analizy trajektorii cząstek powietrza z modelu HYSPLIT (Hybrid Single – Particle Lagrangian Integrated Trajectory), służącego do obliczania toru ruchu cząstek powietrza. Danymi wejściowymi do modelu są pola wielkości meteorologicznych: kierunku i prędkości wiatru, ciśnienia, temperatury (Draxler, 1999; Draxler i Rolph, 2013). Program jest udostępniany na stronach internetowych NOAA Air Resources Laboratory (ARL). Stanowisko pobierania próbek zlokalizowane było na dachu budynku Uniwersytetu Pedagogicznego w Krakowie położonego 237 metrów n.p.m. (67 m n.p.g.).

Analizy składu chemicznego, wielkości oraz morfologii cząstek pyłów dokonano przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego HITACHI S-4700 z emisją polową ze spektrometrem EDS. Zebrane próbki na membranach poliwęglanowych napyłano węglem oraz złotem. Analizy wykonano w Pracowni Mikroskopii Elektronowej Skaningowej z Emisją Polową i Mikroanalizy w Instytucie Nauk Geologicznych Uniwersytetu Jagiellońskiego.

## **WYNIKI BADAŃ**

### **Charakterystyka uwarunkowań cyrkulacyjnych**

W badanym okresie (2011-2012) zdecydowanie częściej pogodę kształtowały układy antycyklonalne (wyże) – 69,1% ogółu dni, niż cyklonalne (niże) – 30,9% dni. Przeważała głównie adwekcja z sektora zachodniego (18,7%), północno-zachodniego (13,1%) oraz południowo-zachodniego (10,4%) (ryc. 1). Łącznie napływ mas powietrza z trzech wyżej wymienionych sektorów wynosił 42,2% - co wskazuje na stosunkowo silny wpływ cyrkulacji strefowej na kształtowanie warunków pogodowych w badanym okresie. Najrzadziej obserwowano spływ powietrza z kierunku północno-wschodniego – 4,5% ogółu dni.



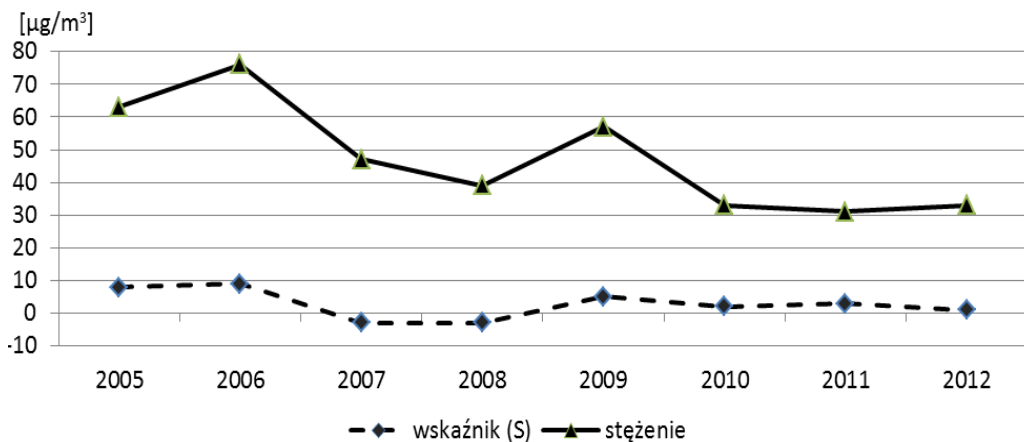
Ryc. 1. Częstość (w %) kierunków adwekcji powietrza nad dorzeczem górnej Wisły (2011-2012).

Analiza frekwencji poszczególnych typów sytuacji synoptycznych wykazała, iż pogodę kształtowała najczęściej bruzda cyklonalna (11,8%) oraz sytuacje antycyklonalne i cyklonalne z napływem mas powietrza z sektora zachodniego – odpowiednio 10,3% oraz 8,4% ogółu dni. Stosunkowo często obserwowano również sytuacje typu klin antycyklonalny (8,1%). Najmniejszą frekwencją charakteryzowała się sytuacja centralna cyklonalna (0,5%).

### Meteorologiczne uwarunkowania koncentracji pyłu PM10

Koncentracja oraz transport zanieczyszczeń naturalnego oraz antropogenicznego pochodzenia uzależniony jest w dużej mierze od aktualnych warunków synoptycznych, zaś uwarunkowania cyrkulacyjne w szerszej perspektywie czasowej mogą istotnie wpływać na wartość stężenia zanieczyszczeń w skali poszczególnych miesięcy, pór roku oraz lat.

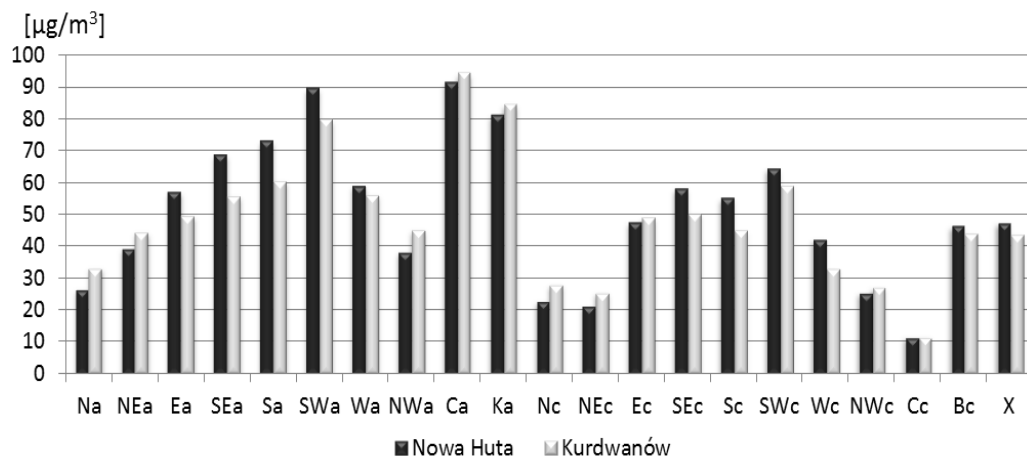
Analiza wpływu uwarunkowań meteorologicznych na jakość powietrza wykazała zależność średnich miesięcznych stężeń pyłu PM10 od wskaźników cyrkulacji atmosferycznej. W toku przeprowadzonych badań stwierdzono powiązanie wartości średnich miesięcznych stężeń pyłu PM10 w poszczególnych latach (2005-2012) ze wskaźnikiem cyrkulacji południkowej (S). Wyższe wartości wskaźnika związane z częstszą adwekcją z kierunku południowego (S, SW, SE) notowano w latach z podwyższonym stężeniem pyłu PM10 na stacjach monitoringu jakości powietrza (Nowa Huta oraz Kurdwanów) - między innymi w styczniu, sierpniu oraz we wrześniu (ryc. 2)(należy jednak podkreślić, iż pomimo wysokiej korelacji wynoszącej 0,7 – może być ona nie istotna statystycznie ze względu na małą próbę [2005-2012]). Charakterystyczny dla Krakowa rosnący trend średnich miesięcznych stężeń pyłu PM10 zapoczątkowany w sierpniu - nie związany bezpośrednio z rozpoczęciem sezonu grzewczego może wynikać zarówno z większej frekwencji stagnacyjnych typów pogody jak i zwiększonej częstości południowego przenoszenia mas powietrza zawierających pyły niesione w wyniku dalekiego transportu.



Ryc. 2. Średnie miesięczne stężenie PM10 we wrześniu oraz wskaźnik cyrkulacji południkowej (S) w latach 2005-2012.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych z kalendarza typów cyrkulacji dla dorzecza górnej Wisły T. Niedźwiedzia oraz danych Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska w Krakowie (2005-2012).

Jak wynika z przeprowadzonych analiz, również wartości średniego dobowego stężenia pyłu PM10 na wyżej wymienionych stacjach wykazywały zróżnicowanie w zależności od typu sytuacji synoptycznej (ryc. 3).



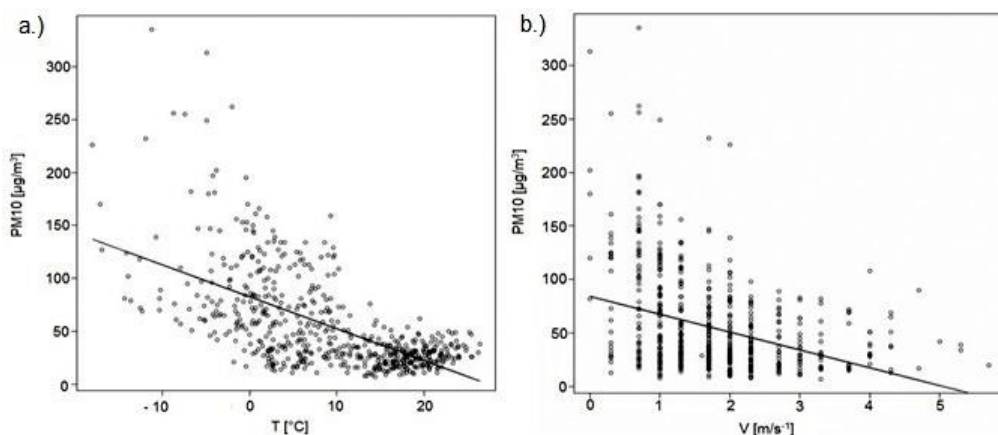
Ryc. 3. Średnie dobowe stężenie PM10 na tle typów cyrkulacji w latach 2011-2012.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych z kalendarza typów cyrkulacji dla dorzecza górnej Wisły T. Niedźwiedzia oraz danych Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska w Krakowie (2011-2012).

Najkorzystniejsze warunki dla dużej koncentracji pyłów determinuje pogoda antycyklonalna z centrum wyżu (Kurdwanów 94,5 µg/m<sup>3</sup>, Nowa Huta 91,6 µg/m<sup>3</sup>) oraz klinem antycyklonalnym (Kurdwanów 84,7 µg/m<sup>3</sup>, Nowa Huta 81,3 µg/m<sup>3</sup>). Wysokie

stężenie dobowe pyłu notowano również podczas antycyklonalnej pogody z adwekcją powietrza z południowego zachodu (Kurdwanów  $79,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , Nowa Huta  $89,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Występowanie wysokich stężeń pyłów PM10 w sytuacjach z adwekcją z kierunków S i SW wiąże się najprawdopodobniej z wpływem efektu fenowego; ciepłe powietrze przepływa nad zalegającą poniżej warstwą inwersji (Niedźwiedz i Olecki, 1994). W toku analizy wykazano także, iż przy adwekcji z sektora południowego, południowo-wschodniego oraz południowo-zachodniego zarówno w cyklonalnych jak i antycyklonalnych typach pogody, wyższe stężenie notowano na stacji w Nowej Hucie – średnio o  $9,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Z kolei przy kierunku adwekcji z sektora północnego, północno-wschodniego jak i północno-zachodniego stężenie PM10 było wyższe na stacji w Kurdwanowie – średnio o  $5,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Powyższe obserwacje mogą wskazywać na wpływ lokalnych emitorów lub warunków dyspersji na zróżnicowanie poziomu stężenia na poszczególnych stacjach. Możliwy jest również udział zanieczyszczeń przenoszonych w wyniku dalekiego transportu (Pietras, 2013; Michalik, Wilczyńska-Michalik, Tyrała, Pietras, Rzeźnikiewicz, 2013).

Analizując meteorologiczne uwarunkowania koncentracji pyłu zawieszonego należy również zwrócić uwagę na wartości poszczególnych parametrów meteorologicznych - determinowanych w znacznym stopniu poprzez sytuacje synoptyczne oraz warunki cyrkulacyjne. Decydujące znaczenie może mieć tutaj kierunek i prędkość wiatru – współodpowiedzialne za dyspersję zanieczyszczeń, jak i temperatura powietrza – warunkująca między innymi natężenie emisji zanieczyszczeń na obszarach gdzie wykorzystywane są indywidualne systemy grzewcze. Badania zależności pomiędzy koncentracji pyłu PM10 a temperaturą powietrza wykazały, iż najwyższe średnie dobowe stężenia pyłu PM10 – przekraczające  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  obserwowano w dniach ze średnią dobową temperaturą powietrza poniżej  $0^\circ\text{C}$  (ryc. 4a). W przypadku warunków anemometrycznych, najwyższe średnie dobowe stężenia pyłu PM10 występowały w dniach, ze średnią dobową prędkością wiatru nie przekraczającą  $2 \text{m}/\text{s}^{-1}$  (ryc. 4b).



Ryc. 4. Zależność pomiędzy stężeniem PM10 a średnią dobową temperaturą powietrza (a) oraz średnią dobową prędkością wiatru (b) (2011-2012).

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska w Krakowie (2011-2012).

Należy jednak podkreślić, iż powyższych parametrów meteorologicznych nie powinno się rozpatrywać indywidualnie - ale raczej uznać za zespół czynników współodpowiedzialnych za pogorszenie warunków aerosanitarnych w Krakowie.

### **Napływ pyłów w wyniku przemieszczania się mas powietrza oraz próba określenia pochodzenia cząstek**

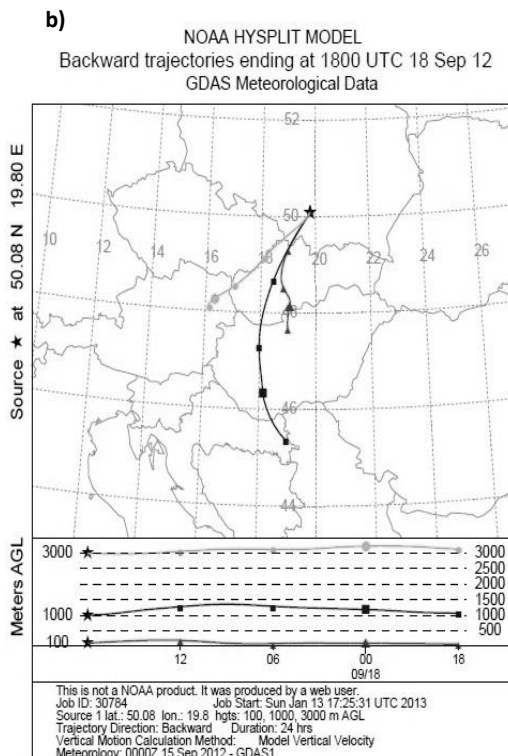
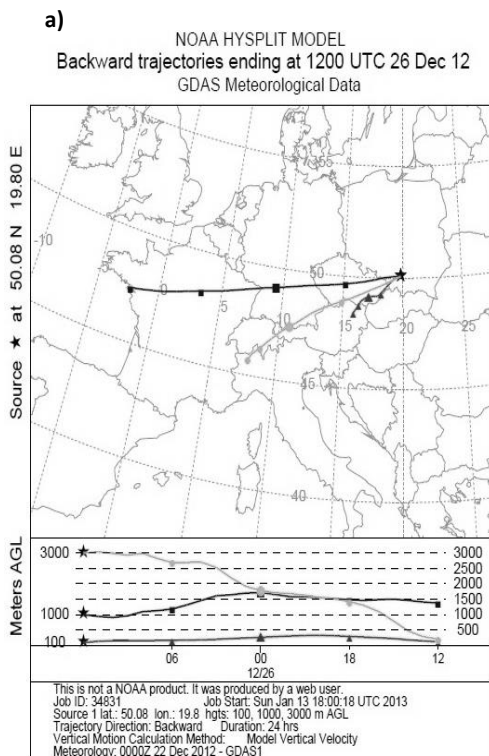
Jak wcześniej wspomniano, oprócz zanieczyszczeń z lokalnych emitorów znaczący wpływ na poziom stężenia PM10 odgrywają również odległe źródła emisji (w tym również transgraniczne przenoszenie zanieczyszczeń). Dystans jaki może pokonać pył zawieszony uzależniony jest od czasu przebywania w atmosferze a ten z kolei uwarunkowany jest w znacznym stopniu rozmiarem, własnościami fizycznymi i składem chemicznym cząstek, jak i warunkami meteorologicznymi. Średni czas przebywania aerozoli w powietrzu wynosi od jednego do sześciu dni (Stefan, Necula, Georgescu, 2010).

Jak wykazała Godłowska (2010), odległe źródła emisji wpływające na koncentracje zanieczyszczeń w Krakowie zidentyfikowano między innymi w krajach Beneluksu, w Niemczech w pobliżu Frankfurtu, Hamburga oraz Drezna i Lipska, na granicy słowacko-węgierskiej w okolicach Budapesztu oraz w Austrii w okolicy Wiednia. Znaczący wpływ na koncentracje pyłów w Krakowie mogą mieć także emitory znajdujące się w Rosji w okolicy Moskwy, na Nizinie Czarnomorskiej oraz na Nizinie Rumuńskiej.

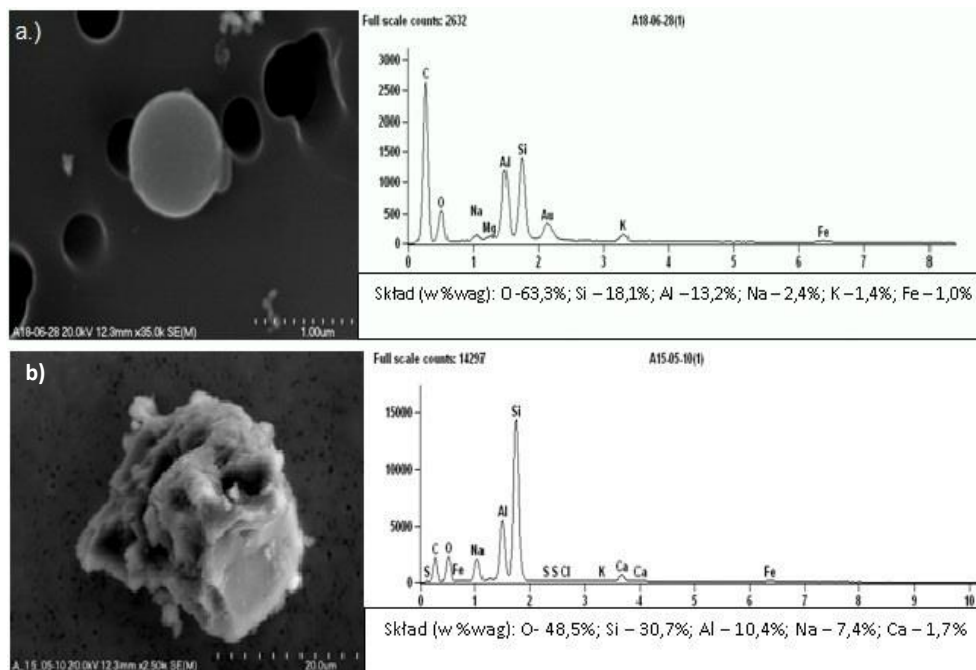
W świetle powyższych badań oraz w wyniku analiz zależności koncentracji pyłu PM10 od kierunku napływu mas powietrza, podczas poboru próbek pyłów szczególną uwagę skupiono na sektorach: zachodnim, południowo-zachodnim oraz południowym. Przykładowe trajektorie wsteczne cząstek powietrza z modelu HYSPLIT - podczas napływu mas powietrza z wybranych sektorów przedstawiono na rycinie 5.

Podczas wyznaczania trajektorii cząstek powietrza w oparciu o model HYSPLIT należy uwzględnić odmienny charakter procesów zachodzących w troposferze w zależności od pory roku – między innymi konwekcję, poziomy inwersji, wysokość mieszania powietrza w profilu pionowym. Pod uwagę należy również wziąć proces wymywania oraz suchej depozycji na torze napływu cząstek powietrza. Szacuje się, iż w umiarkowanych szerokościach geograficznych deszcz usuwa 70-80% masy aerozoli z atmosfery (Falkowska i Lewandowska, 2009). Dlatego też przed wykonaniem czynności pobierania próbki należy sprawdzić czy na trajektorii napływu powietrza nie wystąpił opad w formie ciekłej lub stałej.

Skład chemiczny aerozoli uwarunkowany jest ich pochodzeniem (naturalne, antropogeniczne) oraz rodzajem obszaru źródłowego (warunki fizycznogeograficzne, pokrycie, szorstkość i zagospodarowanie terenu) z którego napływają. W świetle tych informacji i przy wykorzystaniu metody opartej o mikroskop skaningowy z emisją polową ze spektrometrem dyspersji energii (EDS) możliwe jest zaklasyfikowanie analizowanych cząstek ze względu na pochodzenie jak i obszar źródłowy - oraz określenie udziału pyłów danego typu w badanej próbce.



Ryc. 5. Trajektorie wsteczne cząstek powietrza z modelu HYSPLIT: 26 grudnia 2012 (a) oraz 18 września 2012 (b).  
Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych ze strony internetowej <http://www.ready.arl.noaa.gov/>.



Ryc. 6. Mikrofotografie i widma EDS oraz skład chemiczny pyłów pochodzenia antropogenicznego (a) oraz naturalnego (b) (źródło: Opracowanie własne).



Morfologia cząstek również może wskazywać na ich pochodzenie np. kuliste formy glinokrzemianów pochodzą najczęściej z energetyki (głównie elektrownie węglowe) (ryc. 6a), zaś kuliste formy metalicznego Fe lub tlenków Fe z procesów metalurgicznych. Cząstki pochodzenia naturalnego charakteryzują się najczęściej nieregularnymi kształtami (ryc. 6b).

Przedstawione powyżej wyniki analiz zależności pomiędzy koncentracją pyłu PM10 oraz warunkami meteorologicznymi jak i przykładowe analizy składu chemicznego cząstek, stanowią wstępne wyniki badań w ramach rozprawy doktorskiej: „Meteorologiczne uwarunkowania wysokich koncentracji drobnych pyłów w powietrzu w Krakowie i próba określenia ich pochodzenia”.

## **WNIOSKI**

Podsumowując, głównym czynnikiem wpływającym na wysokie koncentracje pyłu zawieszonego w Krakowie nie jest zazwyczaj gwałtowny wzrost emisji (choć ten pośrednio może być związany ze spadkiem temperatury) lecz pogorszenie się warunków sprzyjających rozpraszaniu zanieczyszczeń w przygruntowej warstwie powietrza. Dominujący wpływ na wystąpienie ograniczonych warunków dyspersji zanieczyszczeń, a co z tym związane - dni z niekorzystnymi warunkami aerosanitarnymi miały sytuacje wyżowe, charakteryzujące się niewielkim poziomym gradientem ciśnienia oraz inwersyjnym rozkładem temperatury. Ponadto sytuacje synoptyczne związane z adwekcją mas powietrza z kierunku zachodniego, południowego oraz południowo-wschodniego wpływały na zwiększenie stężenia pyłu PM10 w Krakowie w wyniku napływu zanieczyszczeń z naduprzemysłowionych obszarów państw sąsiednich (transgraniczne przenoszenie zanieczyszczeń na dalekie odległości).

Zaobserwowany w zebranych oraz analizowanym materiale, udział aerozoli naturalnego pochodzenia może wskazywać na to, iż przekroczenia dopuszczalnego poziomu stężenia zanieczyszczeń mogą być częściowo powodowane przez udział pyłów pochodzenia naturalnego. Badane cząsteczki aerozoli pochodzenia antropogenicznego charakteryzowały się podwyższonym udziałem chromu, żelaza oraz manganu. W przypadku aerozoli naturalnych w składzie chemicznym badanych cząstek dominował krzem, glin, wapń i magnez.

W celu dokładnego wyjaśnienia przyczyn wysokich koncentracji pyłu PM10 w Krakowie niezbędne jest kompleksowe podejście do powyższego zagadnienia. Istotny wkład w poszerzenie zakresu wiedzy może stanowić interdyscyplinarne studium oparte zarówno o uwarunkowania meteorologiczne (kierunek napływu mas powietrza, typ sytuacji synoptycznej, procesy zachodzące w atmosferze) jak i analizę cząstek (skład chemiczny, kształt, wielkość) przy równoczesnym określeniu ich pochodzenia (antropogeniczne, naturalne) oraz możliwie precyzyjnym zdefiniowaniu ich obszaru źródłowego.

## LITERATURA:

Bielec-Bąkowska Z., Knozova G., Leśnik M., Matuszko D., Piotrowicz K., (2011). High suspended dust concentrations in Brno, Sosnowiec and Krakow (The year 2009 as an example). *Prace Geograficzne Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego*, Kraków, 126; 67-84.

Bokwa A., (2007). Zanieczyszczenie powietrza. (W:) *Klimat Krakowa w XX wieku*, (red:) Matuszko D., Wydawnictwo Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków, 187-198.

Bokwa A., (2012). Zanieczyszczenie powietrza pyłem zawieszonym PM10 a sytuacje synoptyczne i warunki termiczne w Krakowie. *Rola cyrkulacji atmosfery w kształtowaniu klimatu*. 275-286.

Draxler, R.R., (1999). HYSPLIT4 user's guide. *NOAA Tech. Memo. ERL ARL-230*, NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.

Draxler, R.R. and Rolph, G.D., (2013). HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.

Falkowska L., Lewandowska A. (2009). *Aerozole i gazy w atmosferze ziemskiej – zmiany globalne*. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego. Gdańsk.

German K. (2007). Środowisko przyrodnicze Krakowa i jego wpływ na warunki klimatyczne. (W:) *Klimat Krakowa w XX wieku*, (red:) Matuszko D., Wydawnictwo Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków, s. 11-18.

Godłowska J. (2010). Próba identyfikacji potencjalnych odległych źródeł emisji wpływających na stężenie PM10 w zimie na Śląsku i w Małopolsce przy użyciu modelu trajektorii HYSPLIT. *Ochrona powietrza w teorii i praktyce*, Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, Zabrze, Tom 2, 69-80.

Hajto M., Rozwoda W. (2010). Wykorzystanie danych sodarowych do oceny warunków rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w warstwie granicznej atmosfery w Krakowie. *Ochrona powietrza w teorii i praktyce*, Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, Zabrze, Tom 2, 81-92.

Michalik M., Wilczyńska-Michalik W., Tyrała Ł., Pietras B., Rzeźnikiewicz K., (2013). Analiza cząstek aerozoli w Krakowie. II Śląskie Seminarium Aerzolowe, Materiały pokonferencyjne, Sosnowiec (w druku).

Morawska-Horawska M., Lewik P., (1997). Termiczne warstwy hamujące w przyziemnej 100-metrowej warstwie powietrza nad Krakowem, *Folia Turistica*, nr 7, s. 53-76.

Niedźwiedź T., (1988). Kalendarz sytuacji synoptycznych dla dorzecza górnej Wisły, *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne*, Kraków, 76: 37-86.

Niedźwiedź T., Olecki Z., (1994). Wpływ sytuacji synoptycznych na zanieczyszczenie powietrza w Krakowie, *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne*, Kraków, 96: 55-66.

Niedźwiedź T., (1993). Changes of atmospheric circulation (using the P, S, C, M indices) in the winter season and their influence on air temperature in Cracow. Early Meteorological Instrumental Records in Europe. *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne*, 95: 107-113.

Pietras B., (2013). Meteorologiczne uwarunkowania występowania epizodów wysokich stężeń pyłu PM10 w Krakowie, Materiały II Śląskiego Seminarium Aerozolowego, Sosnowiec (w druku).

Raport o stanie środowiska w województwie małopolskim w 2011 roku (BMŚ), 2012. [www.krakow.pios.gov.pl](http://www.krakow.pios.gov.pl)

Realizacja Programu Ochrony Powietrza w Aglomeracji Krakowskiej, 2012, Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska

Rozporządzenie ministra środowiska w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu, pozycja 1031, 2012. Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej.

Stefan S., Necula C., Georgescu F., (2010). Analysis of long-range transport of particulate matters in connection with air circulation over Central and Eastern part of Europe, *Physics and Chemistry of the Earth* 35, 523-529.

Tomaszewska A., (2010). Analiza zależności występowania wysokich stężeń PM10 od typów cyrkulacji Lityńskiego. *Ochrona powietrza w teorii i praktyce*, Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, Zabrze, Tom 2, 375-387.

Walczewski J., (2009). Niektóre dane o występowaniu całodziennych warstw inwersyjnych w atmosferze Krakowa i uwarunkowania tego zjawiska. *Przegląd Geofizyczny*. 3-4. 183-191.

#### **źródła internetowe**

Niedźwiedź T., (2013). Kalendarz typów cyrkulacji dla obszaru Polski południowej- zbiór komputerowy, Uniwersytet Śląski, Katedra Klimatologii, Sosnowiec, <http://klimat.wnoz.us.edu.pl/>

strona internetowa NOAA Air Resources Laboratory: <http://www.ready.arl.noaa.gov>

#### *cytacja:*

Pietras B. (2013). Czynniki meteorologiczne wpływające na koncentracje aerozoli w Krakowie oraz analiza cząstek aerozoli: *Prace Studenckiego Koła Naukowego Geografów Uniwersytetu Pedagogicznego w Krakowie. Darmowe dane i open source w badaniach środowiska.*, 2, 90-100.