

EPIZODY WYSOKICH STĘŻEŃ ZANIECZYSZCZEŃ POWIETRZA W WYBRANYCH KOTLINACH POLSKICH KARPAT ZACHODNICH

Angelika PALARZ¹, Daniel CELIŃSKI-MYSŁAW²

¹Zakład Klimatologii, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński, ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków, angelika.palarz@doctoral.uj.edu.pl

²Zakład Klimatologii, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński, ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków, daniel.celinski-myslaw@doctoral.uj.edu.pl

Palarz A., Celiński-Mysław D., 2017, *Epizody wysokich stężeń zanieczyszczeń powietrza w wybranych kotlinach polskich Karpat Zachodnich*, „Czasopismo Geograficzne”, 88(1-2): 3-20.

Streszczenie

Występowanie wysokich stężeń zanieczyszczeń powietrza stanowi istotny problem badawczy rozwijany od wielu lat zarówno w literaturze polskiej, jak i światowej. Prowadzone do tej pory badania koncentrowały się niemal wyłącznie w silnie uprzemysłowionych i zurbanizowanych obszarach miejskich. Celem niniejszego opracowania jest objaśnienie przyczyn wystąpienia wysokich stężeń zanieczyszczeń powietrza w miastach relatywnie małych zlokalizowanych w wybranych kotlinach polskich Karpat Zachodnich. Analizie zostały poddane dwa epizody wysokiej koncentracji pyłu zawieszonego PM 10 i dwutlenku siarki SO₂. Badania dowiodły, iż długotrwałe utrzymywanie się bardzo wysokich stężeń zanieczyszczeń powietrza w dniach od 30 grudnia 2015 do 11 stycznia 2016 i od 18 stycznia 2016 do 27 stycznia 2016 było związane zarówno z lokalną rzeźbą terenu, jak i wystąpieniem wybitnie niekorzystnych pod względem dyspersji zanieczyszczeń powietrza warunków synoptycznych

Słowa kluczowe: zanieczyszczenia powietrza, inwersje temperatury powietrza, Polskie Karpaty Zachodnie

Wprowadzenie

Występowanie wysokich stężeń zanieczyszczeń powietrza jest powszechnie uznawane za zjawisko negatywne wywierające istotny wpływ na funkcjonowanie organizmu ludzkiego. Prowadzone dotychczas badania dowiodły, iż długotrwałe przekroczenia dopuszczalnych norm prowadzą do wzrostu zapadalności na infekcje układu oddechowego oraz choroby kardiologiczne i onkologiczne [Pascal i in. 2013, Dholaria i in. 2014, Kim i in. 2015, Lu et.al. 2015]. Omawiany praktyczny wymiar zagadnienia skutkuje dużym zainteresowaniem badaczy zarówno czasową i przestrzenną

zmiennością, jak i przyczynami występowania ekstremalnie wysokich stężeń zanieczyszczeń powietrza. Problem ten w ostatnich latach był najczęściej poruszany w odniesieniu do silnie zurbanizowanych obszarów Ameryki Północnej [Whiteman i in. 2014], Europy [Unal i in. 2011; Russo i in. 2014] oraz Azji Południowej i Południowo-Wschodniej [Wang i in. 2014, Trivedi i in. 2014]. Badania te wykazały, iż niezależnie od lokalizacji rozkład stężeń pyłów zawieszonych – PM 10 i PM 2,5 – charakteryzował się wyraźną zmiennością sezonową osiągając maksimum w porze chłodnej. Podobne wyniki uzyskano również w obszarze Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego [Leśniok i in. 2010; Radomski, Widawski 2011; Błażek i in. 2013] i Krakowa [Bokwa 2011, Bielec-Bąkowska i in. 2011], gdzie stężenia pyłu zawieszonego PM 10, dwutlenku siarki i dwutlenku azotu osiągały najwyższe wartości zimą. Było to związane z ograniczonym usłonecznieniem, niskimi temperaturami i zwiększoną emisją zanieczyszczeń powietrza z palenisk domowych. Ponadto opracowania M. Leśnioka i in. [2010] oraz Z. Bielec-Bąkowskiej i in. [2011] dowiodły, iż przekroczenia dopuszczalnych norm notowano najczęściej w słabogradentowych, blokujących sytuacjach antycyklonalnych – centrum wyżu i klinie antycyklonalnym oraz przy adwekcji powietrza z sektora południowego.

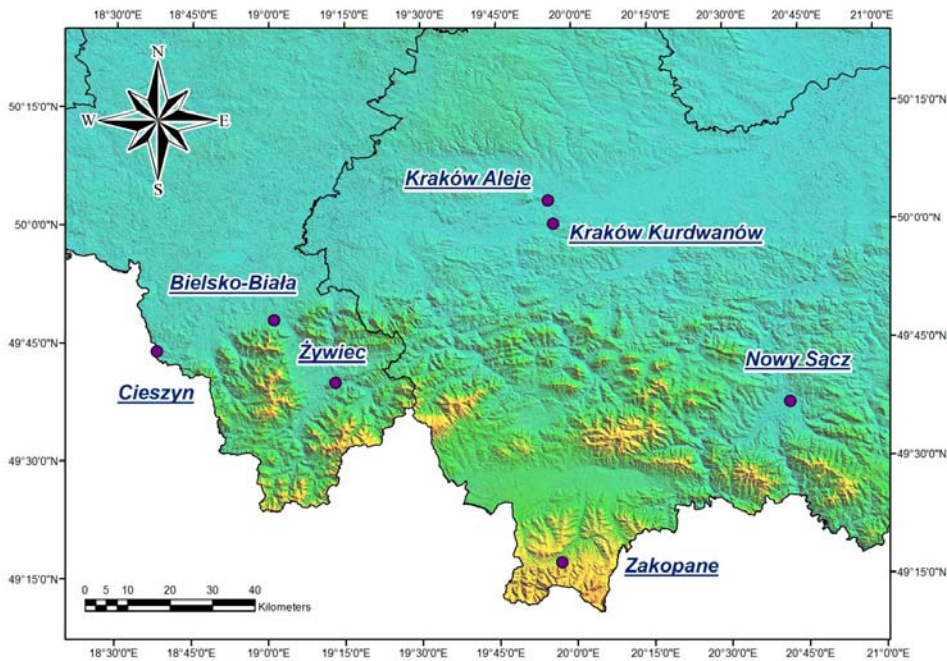
Odrębną grupę opracowań stanowią szczegółowe analizy epizodów smogowych, których celem było określenie związku jakości powietrza z warunkami synoptycznymi i wybranymi elementami meteorologicznymi [Kukkonen i in. 2005; Malek i in. 2006, Fu i in. 2008]. Ponadto w części artykułów podejmowano próby identyfikacji potencjalnych źródeł napływu pyłów i gazów [Ji i in. 2012; Lee i in. 2013; Segura i in. 2013]. Mimo szerokiego zainteresowania omawianym problemem, do tej pory badania nad jakością powietrza koncentrowały się niemal wyłącznie w dużych ośrodkach miejskich. Wyjątek stanowi praca E. Malek i in. [2006] dotycząca meteorologicznych i środowiskowych uwarunkowaniach wystąpienia jednego z najsilniejszych epizodów smogowych w Stanach Zjednoczonych. Notowane w styczniu 2004 roku w zamieszkałym przez około 100 tys. osób Logan skrajnie wysokie stężenia pyłu zawieszonego PM 2,5 było związane zarówno z położeniem miasta w wybitnie wklęsłej formie terenu, jak i utrudniającymi dyspersję zanieczyszczeń powietrza warunkami meteorologicznymi – wystąpieniem inwersji termicznej wzmocnionej przez silny układ wysokiego ciśnienia i utrzymywaniem się pokrywy śnieżnej.

Niniejsze opracowanie nawiązuje do badań nad stanem aerosanitarnym w miastach relatywnie małych. Jego głównym celem jest objaśnienie przyczyn wystąpienia epizodów wysokich stężeń zanieczyszczeń powietrza w miastach zlokalizowanych

w wybranych kotlinach Polskich Karpat Zachodnich – Cieszyn, Nowy Sącz, Zakopane i Żywiec. Porównawczo zostały wykorzystane również dane pomiarowe stacji zlokalizowanych w Bielsku-Białej i Krakowie.

Obszar badań

Zasięg przestrzenny prowadzonych badań obejmuje obszar pięciu położonych w polskiej części Karpat Zachodnich mezoregionów – Dolina Wisły (Kraków), Kotlina Sądecka (Nowy Sącz), Kotlina Żywiecka (Żywiec), Pogórze Śląskie (Bielsko-Biała i Cieszyn) i Rów Podtatrzanski (Zakopane) [Kondracki 2002]. Kotlina Sądecka, Kotlina Żywiecka i Rów Podtatrzanski stanowią formy wklęsłe otoczone wzniesieniami i szczytami górskimi. Ich dna są zlokalizowane na wysokości od 280-300 m n.p.m. w Kotlinie Sądeckiej, 340-500 m n.p.m. w Kotlinie Żywieckiej do 750 do 1000 m n.p.m. w Rowie Podtatrzanskim, zaś deniwelacje wysokości oscylują w granicach od 500 do 1600 m (ryc. 1).



Ryc. 1. Położenie obszaru badań
Fig. 1. Location of the study area

Topografia omawianych obszarów jest czynnikiem wybitnie sprzyjającym stagnacji chłodnego powietrza w kotlinach i tworzeniu się tzw. „zastoisk chłodu”, a także występowaniu warstw inwersyjnych hamujących mieszanie powietrza. Ponadto, w Kotlinie Żywieckiej istotny wpływ na kształtowanie warunków pogodowych wywiera zbiornik retencyjny. Sprzyja on częstszemu tworzeniu się lokalnych mgieł i zamglenia.

Dane i metody

Opracowanie obejmuje analizę dwóch epizodów wysokich stężeń zanieczyszczeń powietrza, które wystąpiły w południowej Polsce w dniach od 30 grudnia 2015 do 11 stycznia 2016 i od 18 stycznia do 27 stycznia 2016. Badania zostały wykonane na podstawie średnich dobowych i godzinowych stężeń pyłu zawieszonego PM₁₀ i dwutlenku siarki – SO₂ pozyskanych za pośrednictwem portali informacyjnych wojewódzkich inspektoratów ochrony środowiska w Katowicach (<http://powietrze.katowice.wios.gov.pl/>) i Krakowie (<http://monitoring.krakow.pios.gov.pl/>). Dane pozyskano dla stacji: Bielsko-Biała, Cieszyn, Kraków (Aleja Krasińskiego – PM₁₀, Kurdwanów – SO₂), Nowy Sącz, Zakopane i Żywiec. Warunki synoptyczne zostały scharakteryzowane przy użyciu reanaliz ERA-Interim o rozdzielczości przestrzennej 0.125×0.125° (<http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>), dolnych i górnych map synoptycznych (<http://www.pogodynka.pl/>, <http://www1.wetter3.de/>), sondaży aerologicznych stacji Poprad-Gánovce i Prostejov (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>) oraz depesz SYNOP stacji Bielsko-Biała, Kraków, Kasprowy Wierch, Nowy Sącz i Zakopane (<http://www.ogimet.com/>). Ponadto celem określenia kierunków napływu mas powietrza zostały wykorzystane trajektorie wsteczne modelu HYSPLIT (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>).

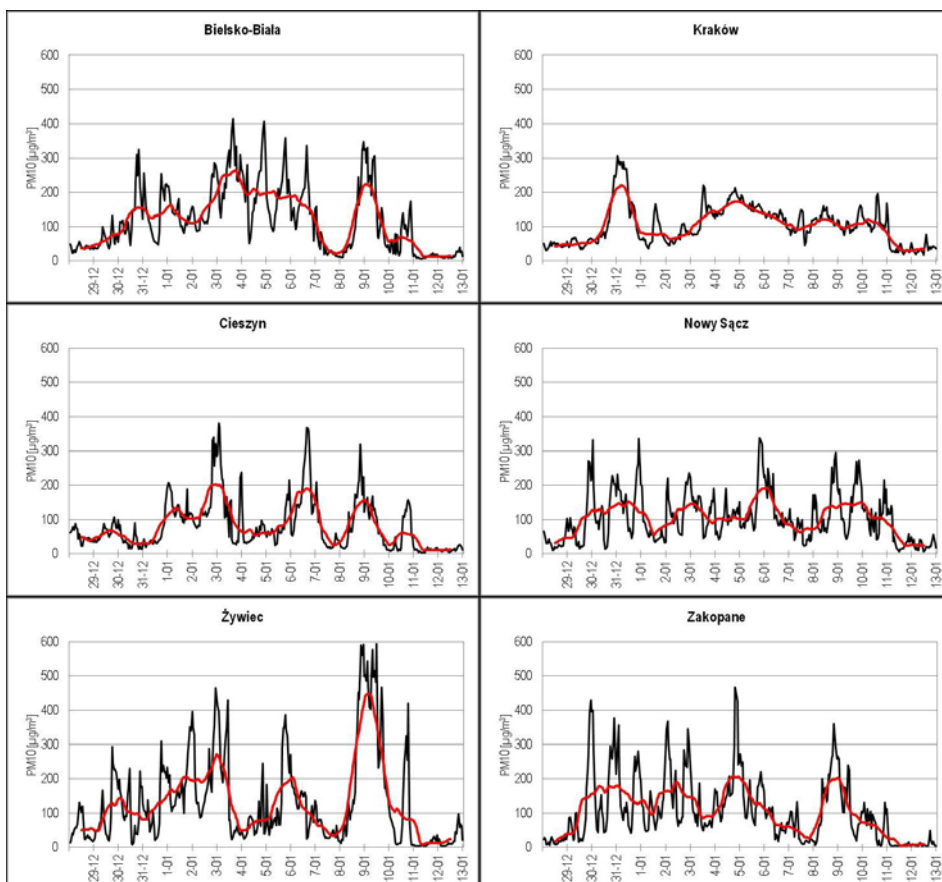
Wyniki

Epizod I: 30 grudnia 2015 - 11 stycznia 2016

Stężenie pyłu zawieszonego PM₁₀ i dwutlenku siarki

Średnie dobowe stężenie pyłu zawieszonego PM₁₀ przekraczało dopuszczalne normy na większości stacji pomiarowych w prawie całym okresie od 30 grudnia 2015 do 11 stycznia 2016. Dobowe maksimum jego koncentracji nie występowało równocześnie we wszystkich punktach pomiarowych. Odpowiednio zostało ono zanotowane 1. stycznia w Nowym Sączu (161 µg/m³) i Krakowie (191 µg/m³), 3. stycznia w Zakopanem (201 µg/m³), 4. stycznia w Bielsku-Białej

(261 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 7. stycznia w Cieszynie (182 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) oraz 10. stycznia w Żywcu (374 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Wyraźny spadek koncentracji pyłu zawieszono stwierdzono 8 stycznia 2016, kiedy dopuszczalne normy nie zostały przekroczone w Bielsku-Białej, Zakopanem i Żywcu (ryc. 2).



Ryc. 2. Średnie godzinowe stężenie pyłu zawieszono PM 10 na wybranych stacjach pomiarowych w dniach od 29 grudnia 2015 do 13. stycznia 2016

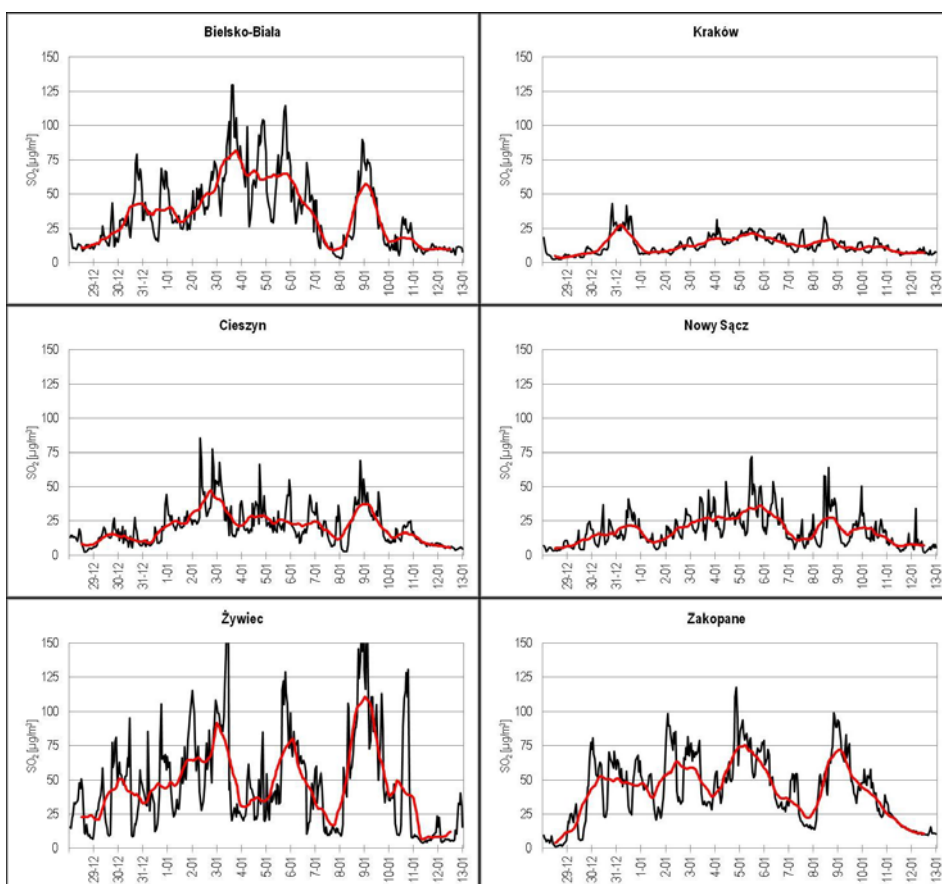
Fig. 2. The hourly average concentration of particulate matter PM 10 at selected air quality measurement stations from 29 December 2015 to 13 January 2016

Warto dodać, że w Krakowie mimo największej liczby ludności i stopnia urbanizacji, notowane wartości omawianej charakterystyki były porównywalne, a nawet niższe niż

w przypadku znacznie mniejszych miast zlokalizowanych w kotlinach karpackich. Koncentracja pyłu zawieszonego PM 10 charakteryzowała się znaczną zmiennością dobową z maksimum po zachodzie Słońca tj. w godzinach 17-00 UTC. Wyjątek stanowi stacja komunikacyjna Kraków Aleja Krasińskiego, gdzie w związku ze wzmożonym ruchem drogowym maksymalne stężenia występowały w godzinach popołudniowych tj. 12-17 UTC. Największą zmiennością stężenia PM 10 w badanym okresie cechowały się Żywiec, Zakopane i Cieszyn. Współczynnik zmienności wynosił odpowiednio 99% dla Żywca, 89% dla Zakopanego i 90% dla Cieszyna. Zdecydowanie najmniejszą zmiennością charakteryzowała się natomiast stacja w Krakowie – współczynnik zmienności równy 56%. Brak wyraźnego cyklu dobowego koncentracji PM 10 w Krakowie należy tłumaczyć emisją pyłów z palenisk domowych w godzinach nocnych oraz zwiększonym natężeniem ruchu drogowego w ciągu dnia. Analizowany epizod cechował się występowaniem kilku wyraźnych wzrostów koncentracji zanieczyszczeń powietrza, których liczba i długotrwałość była zależna od położenia stacji. Maksymalne średnie godzinowe stężenia PM 10 wynosiły odpowiednio 304 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ w Krakowie, 338 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ w Nowym Sączu, 382 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ w Cieszynie, 414 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ w Bielsku-Białej, 469 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ w Zakopanem i 595 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ w Żywcu.

Średnie dobowe stężenie dwutlenku siarki charakteryzowało się znaczną zmiennością czasową oraz dużymi różnicami między poszczególnymi stacjami pomiarowymi. Dobowe maksimum jego wartości wystąpiło odpowiednio 3. stycznia w Cieszynie (41,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 4. stycznia w Bielsku-Białej (79,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 6. stycznia w Krakowie (22,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Nowym Sączu (35,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) i Zakopanem (74,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) oraz 9. stycznia w Żywcu (85,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Dopuszczalne normy dobowego i godzinowego stężenia dwutlenku siarki nie zostały przekroczone na żadnej z analizowanych stacji (ryc. 3). Duże różnice w koncentracji omawianego polutanta wynikały ze zróżnicowanego udziału palenisk domowych, w których wykorzystywano paliwa kopalne o zwiększonej zawartości siarki. Najniższe stężenia SO_2 były notowane na stacji Kraków Kurdwanów, która otoczona jest głównie wielorodzinną zabudową mieszkaniową korzystającą z miejskiej sieci ciepłowniczej. Analizowane stacje charakteryzują się wyraźnymi różnicami w dobowym przebiegu stężenia SO_2 . W przypadku Zakopanego i Żywca występują dwa wyraźne maksima jego koncentracji w godzinach porannych i wieczornych oraz minimum około południa. Odmiernym rozkładem cechują się pozostałe stacje – jedno maksimum w godzinach 17-19 UTC w Bielsku-Białej i w godzinach 19-23 UTC w Cieszynie oraz dwa maksima w godzinach 10-12 UTC i 17-21 UTC w Nowym Sączu. Wyjątek stanowi stacja Kraków Kurdwanów, gdzie dobowy przebieg omawianej charakterystyki nie wykazywał wyraźnego minimum

i maksimum dobowego. Godzinowe stężenie SO_2 na wszystkich stacjach pomiarowych charakteryzowało się umiarkowaną zmiennością. Najwyższą wartość współczynnika zmienności wyznaczono dla Żywca (76%), zaś najniższą dla Krakowa (55%). Maksymalne średnie godzinowe stężenia SO_2 wynosiły odpowiednio $42,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w Krakowie, $72,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w Nowym Sączu, $85,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w Cieszynie, $117,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w Zakopanem, $129,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w Bielsku-Białej i $211,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w Żywcu.



Ryc. 3. Średnie godzinowe stężenie dwutlenku siarki na wybranych stacjach pomiarowych w dniach od 29.grudnia 2015 do 13. stycznia 2016

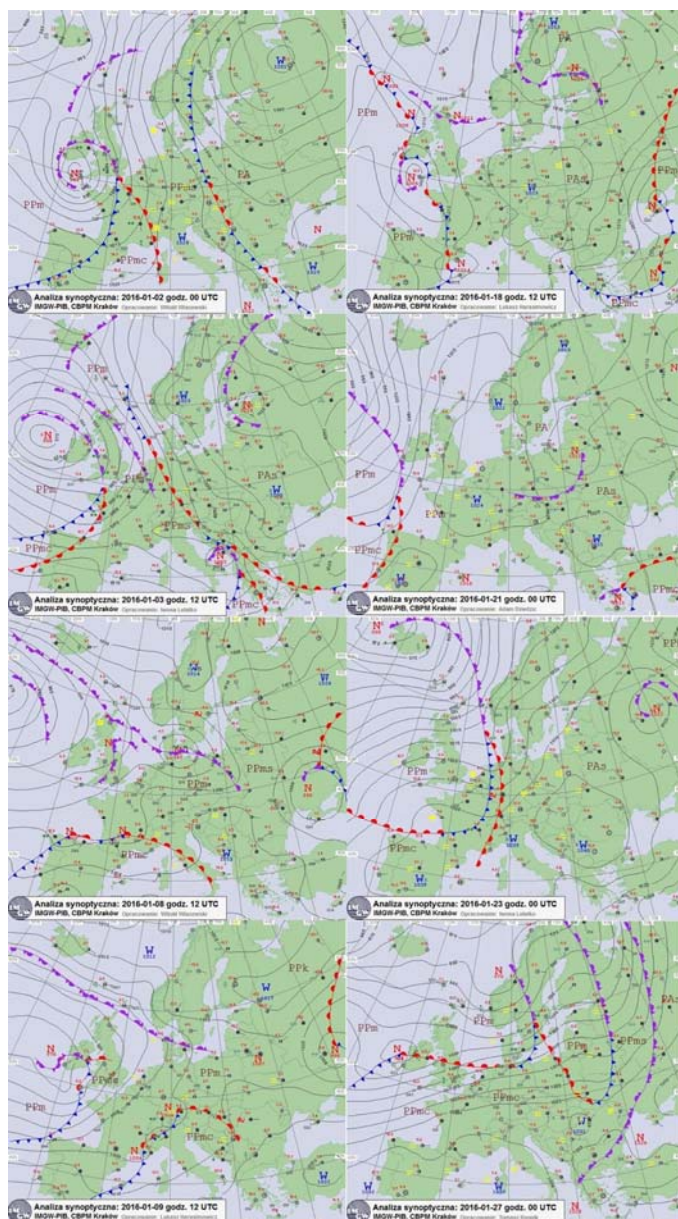
Fig. 3. The hourly average concentration of sulfur dioxide at selected air quality measurement stations from 29 December 2015 to 13 January 2016

Warunki synoptyczne

Analizowany epizod zanieczyszczeniowy ukształtował się w sytuacji dominacji stref podwyższonego ciśnienia nad Europą Środkową. W fazie początkowej południowa Polska pozostawała pod wpływem klina wysokiego ciśnienia związanego z rozległym układem wyżowym, w którego znajdującym się nad Morzem Białym centrum ciśnienie osiągało ponad 1050 hPa. Wyraźne różnice dobowe w stężeniach pyłu zawieszonego i dwutlenku siarki między stacjami wynikały wówczas z położenia obszaru badań na skraju rozległego ośrodka wysokiego ciśnienia blokującego przemieszczanie się frontów atmosferycznych. Skutkowało to większym gradientem ciśnienia w zachodniej części obszaru badań, gdzie stężenia zanieczyszczeń w tym okresie były znacząco niższe.

Przemieszczający się z kierunku wschodniego płytki ośrodek niżowy spowodował w dniu 3. stycznia przebudowanie się pola barycznego, w efekcie czego południowa Polska do 5. stycznia znajdowała się w strefie oddziaływania wału wysokiego ciśnienia, a następnie do 7. stycznia w słabogradientowym obszarze podwyższonego ciśnienia – siodło baryczne. Znaczne spadki stężeń pyłu zawieszonego PM 10 i dwutlenku siarki w dniu 8. stycznia były skutkiem przemieszczania się frontu okluzji związanego z ośrodkiem niżowym z centrum nad Półwyspem Jutlandzkim. Przemieszczaniu się frontu towarzyszył wyraźny wzrost prędkości wiatru sprzyjający dyssypacji warstw hamujących i wymianie powietrza. Kolejny wzrost stężeń zanieczyszczeń powietrza w dniach od 9. do 11. stycznia był uwarunkowany położeniem obszaru w strefie rozmytego pola ciśnienia atmosferycznego (ryc. 4).

Dla przypadków najwyższych średnich dobowych stężeń pyłu zawieszonego zostały zanalizowane sondáže aerologiczne. Początkowo w dniach od 31. grudnia do 2. stycznia procesy mieszania były hamowane poprzez występowanie rozległej inwersji osiadania powstałej na skutek zstępujących ruchów powietrza w sięgającym aż do środkowej troposfery ośrodka wysokiego ciśnienia. Sprzyjało to także utrzymywaniu się powstających w godzinach nocnych przypowierzchniowych inwersji radiacyjnych. Analiza trajektorii wstecznych sugeruje, że subsydencja powietrza następowała najintensywniej w Polsce Południowej. Kolejny wyraźny wzrost stężeń zanieczyszczeń powietrza został zanotowany 4. stycznia w zachodniej części obszaru badań. Było to skutkiem występowania inwersji związanej z przemieszczaniem się dwóch frontów okluzji i napływem cieplejszego powietrza ponad warstwą graniczną. Ostatni silny wzrost koncentracji omawianych polutantów został odnotowany 10. stycznia w Żywcu, co należy utożsamiać ze wzmoczoną adwekcją relatywnie ciepłego i suchego powietrza w swobodnej atmosferze (na poziomach izobarycznych 850 i 700 hPa), która była związana z przemieszczaniem się w kierunku Europy Środkowej układów niskiego ciśnienia (ryc. 5 i 6).

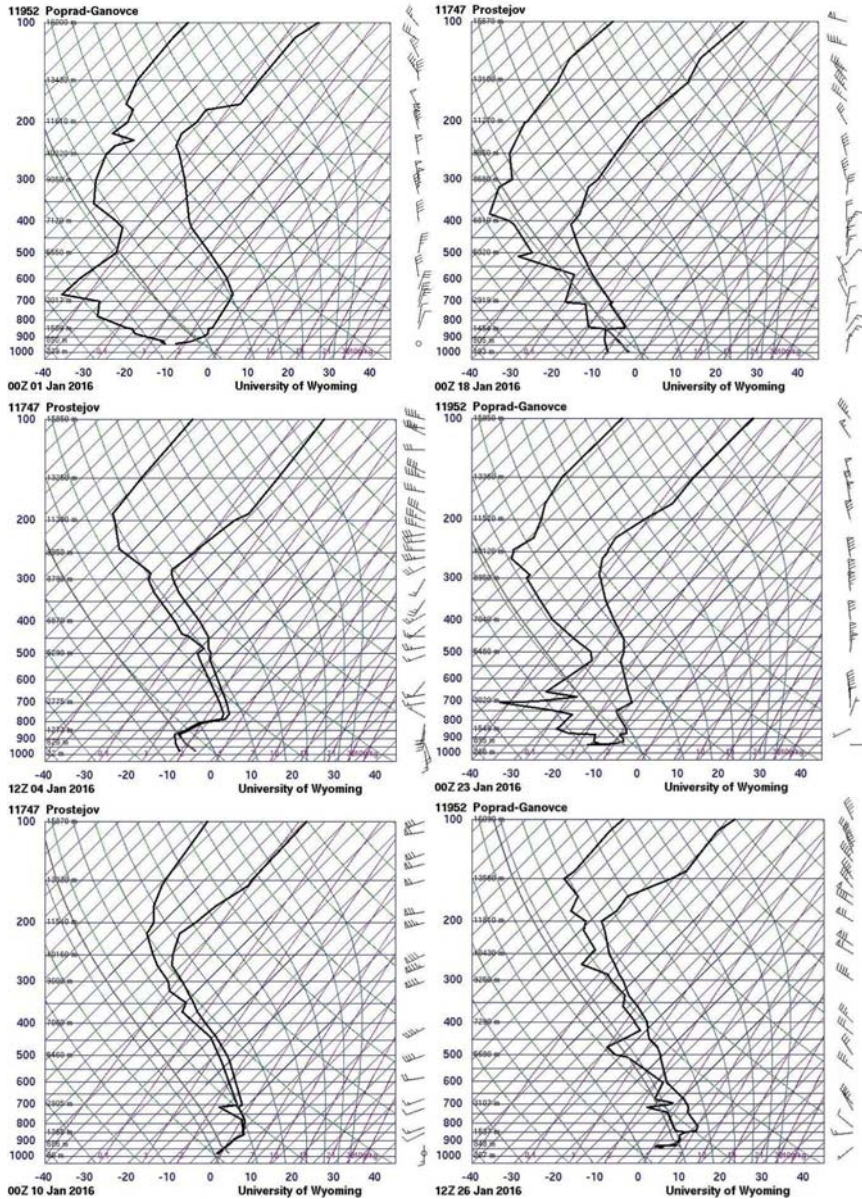


Ryc. 4. Mapy synoptyczne dla wybranych terminów – epizod I. (lewa kolumna)

i epizod II. (prawa kolumna) – <http://www.pogodynka.pl/>

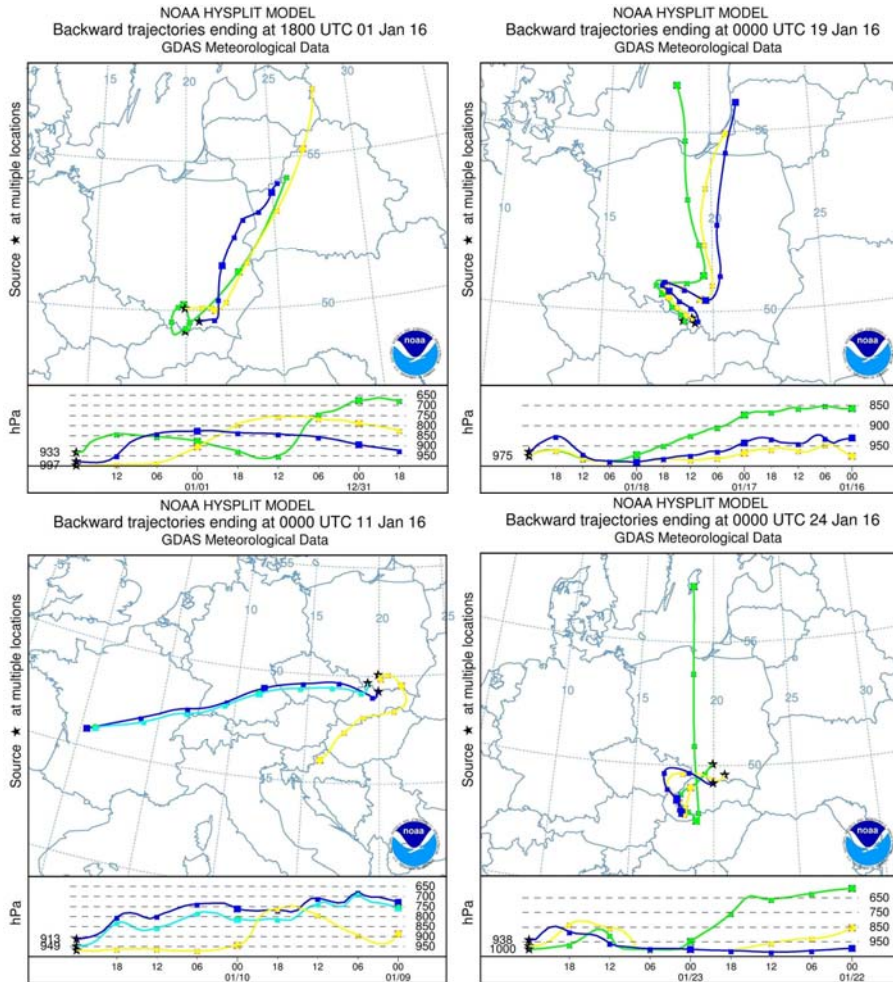
Fig. 4. MSL pressure map for selected dates – episode I. (left column)

and episode II (right column) – <http://www.pogodynka.pl/>



Ryc. 5. Sondaże aerologiczne dla wybranych terminów – epizod I. (lewa kolumna) i epizod II. (prawa kolumna) – <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

Fig. 5. Upper air sounding plots for selected dates – episode I. (left column) and episode II (right column) – <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>



Ryc. 6. Trajektorie wsteczne dla wybranych terminów – epizod I. (lewa kolumna)

i epizod II. (prawa kolumna) – <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>

Fig. 6. Backward trajectories for selected dates – episode I. (left column)

and episode II (right column) – <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>

Epizod II: 18 stycznia 2016 - 27 stycznia 2016

Stężenie pyłu zawieszonego PM 10 i dwutlenku siarki

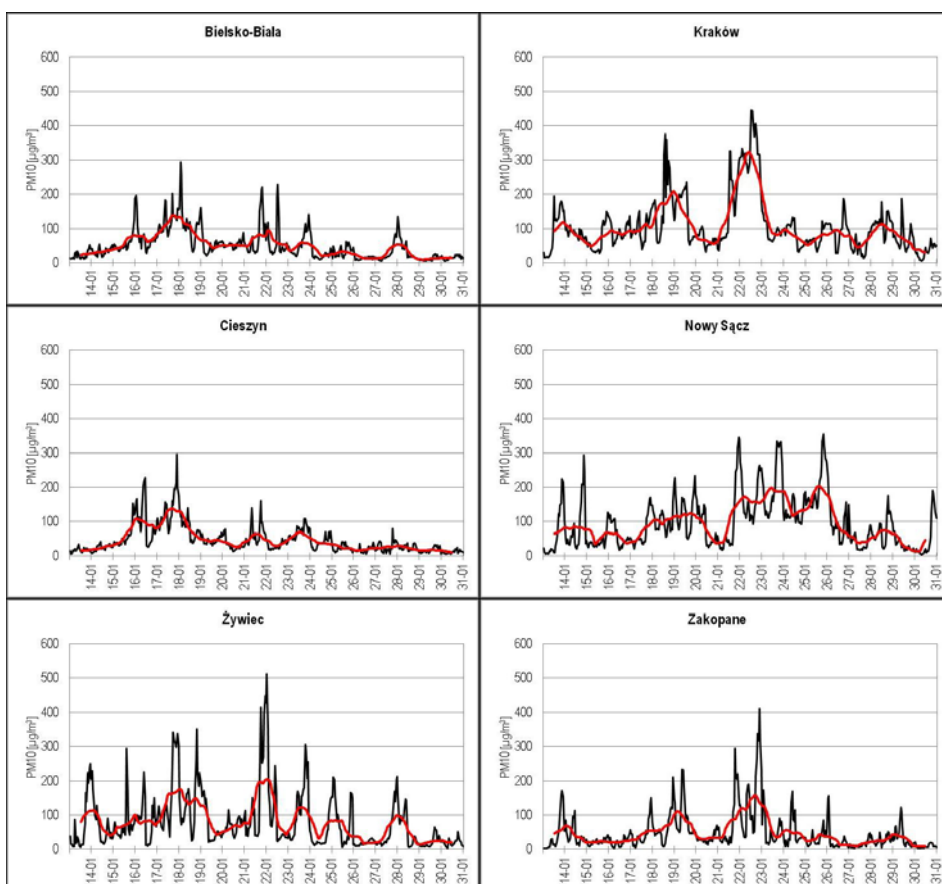
Średnie dobowe stężenie pyłu zawieszonego PM 10 przekraczało dopuszczalne normy w prawie całym okresie od 18 stycznia do 27 stycznia 2016 na stacjach w Krakowie i Nowym Sączu. Dobowe maksimum jego koncentracji było silnie

zróżnicowane w zależności od punktu pomiarowego. Odpowiednio zostało ono zanotowane 18. stycznia w Bielsku-Białej ($122 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Cieszynie ($137 \mu\text{g}/\text{m}^3$), i Żywcu ($167 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 23. stycznia w Zakopanem ($155 \mu\text{g}/\text{m}^3$) i Krakowie ($329 \mu\text{g}/\text{m}^3$) oraz 26. stycznia w Nowym Sączu ($206 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Spadek koncentracji PM 10 zaobserwowano 21 stycznia 2016. W drugiej fazie omawianego epizodu wyraźnie wyższe wartości omawianej charakterystyki notowano w Nowym Sączu – w dniach od 24 do 26. stycznia stężenie pyłu zawieszonego było znacząco wyższe niż w Krakowie. Stężenie omawianego polutanta wykazywało wyraźny cykl dobowy z maksimum głównym w godzinach 17-01 UTC i maksimum wtórnym w godzinach 08-10 UTC. Analogicznie do pierwszego epizodu wyjątek stanowi stacja komunikacyjna Kraków Aleja Krasińskiego. Na skutek wzmożonego ruchu drogowego maksymalne stężenia występowały tam w godzinach 11-23 UTC. Największą zmiennością stężenia PM 10 w badanym okresie charakteryzowały się stacje w Zakopanem i Żywcu (ryc. 7), gdzie współczynnik zmienności wyniósł odpowiednio 117% i 102%. Analizowany epizod cechował się występowaniem dwóch wyraźnych wzrostów stężeń zanieczyszczeń powietrza. Pierwszy z nich w dniach od 17 do 20. stycznia silniej zaznaczył się na stacjach w województwie śląskim, zaś drugi w dniach od 22 do 25. stycznia w województwie małopolskim. Maksymalne średnie godzinowe stężenia PM 10 wynosiły odpowiednio $294 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w Bielsku-Białej, $296 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w Cieszynie, $355 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w Nowym Sączu, $412 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w Zakopanem, $444 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w Krakowie i $511 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w Żywcu.

Podobnie do pierwszego epizodu, średnie dobowe stężenia dwutlenku siarki wykazywało znaczną zmienność czasową oraz duże różnice między poszczególnymi stacjami pomiarowymi. Dobowe maksimum jego wartości wystąpiło odpowiednio 18. stycznia na trzech stacjach województwa śląskiego (Cieszyn – $43,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Bielsko-Biała – $48,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Żywiec – $74,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) oraz 23. stycznia w Krakowie ($47,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) i Zakopanem ($63,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), a 24. stycznia w Nowym Sączu ($37,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Dopuszczalne normy dobowego i godzinowego stężenia dwutlenku siarki nie zostały przekroczone na żadnej z analizowanych stacji. Cechowały się one wyraźną zmiennością dobową w badanym okresie. W Krakowie, Nowym Sączu i Zakopanem występowały dwa wyraźne dobowe maksima koncentracji dwutlenku siarki. Pierwsze z nich pojawiało się w godzinach przedpołudniowych, a drugie rozpoczynało się po zachodzie Słońca i trwało do północy. Stacje województwa śląskiego wykazywały natomiast jedno maksimum dobowe występujące odpowiednio w godzinach 08-11 UTC w Cieszynie i 16-02 UTC w Bielsku-Białej. Stacja

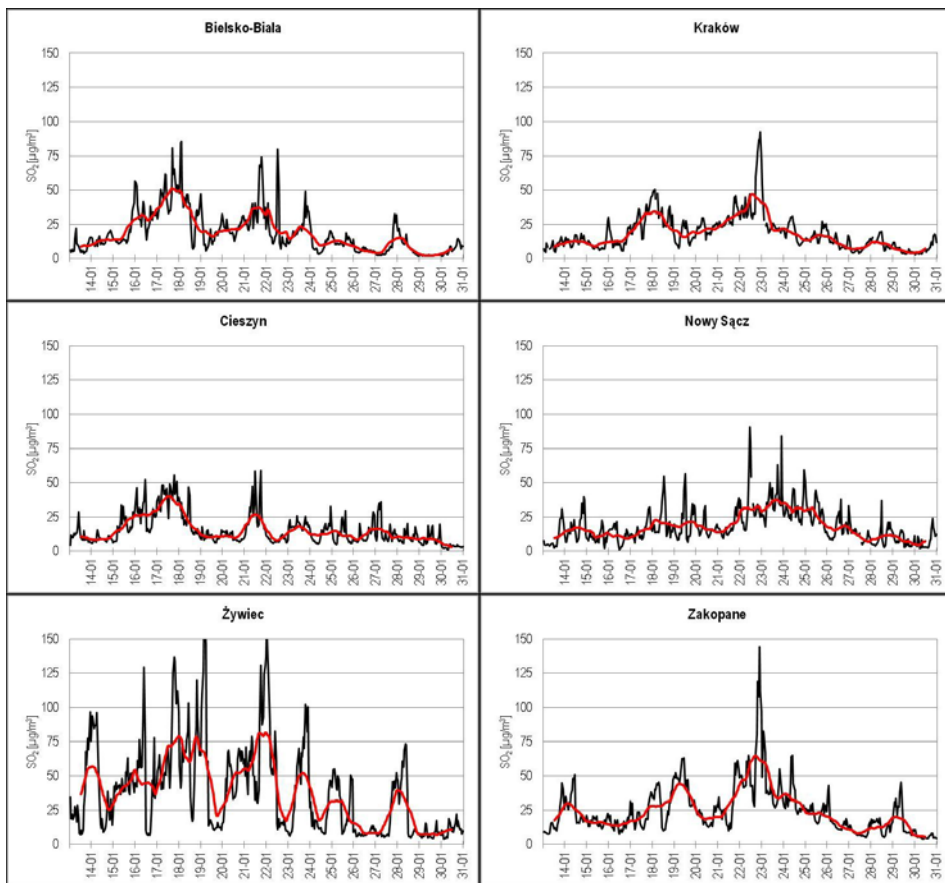
w Żywcu charakteryzowała się wysokimi stężeniami SO_2 w godzinach od 17 do 10 UTC. Godzinowe stężenie SO_2 na wszystkich stacjach pomiarowych charakteryzowało się umiarkowaną zmiennością z godziny na godzinę (ryc. 8).

Maksymalne średnie godzinowe stężenia SO_2 wynosiły odpowiednio $59,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w Cieszynie, $85,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w Bielsku-Białej, $90,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w Nowym Sączu, $92,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w Krakowie, $144,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w Zakopanem i $160,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ w Żywcu.



Ryc. 7. Średnie godzinowe stężenie pyłu zawieszonego PM 10 na wybranych stacjach pomiarowych w dniach od 14. do 31. stycznia 2016

Fig. 7. The hourly average concentration of particulate matter PM 10 at selected air quality measurement stations from 14 to 31 January 2016



Ryc. 8. Średnie godzinowe stężenie dwutlenku siarki na wybranych stacjach pomiarowych w dniach od 14. do 31. stycznia 2016

Fig. 8. The hourly average concentration of sulfur dioxide at selected air quality measurement stations from 14 to 31 January 2016

Warunki synoptyczne

Warunki pogodowe podczas drugiego epizodu zanieczyszczeniowego kształtował rozległy układ wysokiego ciśnienia, którego centrum przemieszczało się nad obszaru Niemiec w dniu 18. stycznia przez Czechy w dniu 19. stycznia aż do Rumuni w dniu 20 stycznia. Krótkotrwale spadki stężeń zanieczyszczeń powietrza na wszystkich stacjach pomiarowych w dniu 21. stycznia były spowodowane przemieszczaniem się nad obszarem południowej Polski frontu okluzji związanym

z płytkim ośrodkiem niskiego ciśnienia z centrum nad Morzem Bałtyckim. Za frontem atmosferycznym ponownie rozbudowywał się układ wyżowy, w którego centrum ciśnienie osiągało maksymalnie 1040 hPa w dniach 23. i 24. stycznia, powodując ponowny wzrost stężeń pyłu zawieszonego i dwutlenku siarki. Przebudowywanie się pola barycznego nad Europą i dominacja cyrkulacji cyklonalnej od 26. stycznia skutkowałą wyraźną poprawą stanu aerosanitarneego. Liczne ośrodki niskiego ciśnienia z systemami frontów atmosferycznych, które przemieszczały się nad północną częścią kontynentu, powodowały wzrost prędkości wiatru sprzyjający dyssypacji warstw hamujących i wymianie powietrza (ryc. 4).

Czynnikiem inicjującym wzrost zanieczyszczeń powietrza w trakcie drugiego z analizowanych epizodów był rozległy ośrodek wysokiego ciśnienia, w którego centrum następowały intensywne zstępujące ruchy powietrza. Prowadziły one do występowania inwersji osiadania, którym okresowo przy powierzchni Ziemi towarzyszyły inwersje radiacyjne. Dnia 18. stycznia inwersja osiadania wyraźnie zaznaczyła się na poziomie izobarycznym 850 hPa. Subsydencja cząstek powietrza, której towarzyszył wzrost temperatury powietrza i spadek temperatury punktu rosy, uwidaczniała się przede wszystkim w południowej części Polski. Kolejno w dniu 23. stycznia, poza osiadaniami powietrza, w kształtowaniu warunków pogodowych duże znaczenie odgrywały mgły i zamglenia. W przypadku Krakowa długotrwałe ich zaleganie skutkowało stagnacją chłodnego powietrza w warstwie przypowierzchniowej. Temperatura powietrza o godzinie 07 UTC w Krakowie wyniosła $-17,5^{\circ}\text{C}$, a na Kasprowym Wierchu $-12,0^{\circ}\text{C}$. Najwyższe średnie dobowe stężenie pyłu zawieszonego występujące w Nowym Sączu 26. stycznia było spowodowane występowaniem silnej inwersji radiacyjnej powodującej zaleganie mgieł przez cały dzień. Dodatkowym czynnikiem ją wzmacniającym było niewielkie osiadanie na wysokości 850 hPa (ryc. 5 i 6).

Dyskusja i wnioski

Analogicznie do wspomnianego we wstępie opracowania Fu i in. [2008], a także długookresowych analiz stężeń zanieczyszczeń powietrza Leśnioka i in. [2010] oraz Bielec-Bąkowskiej i in. [2011], utrzymywanie się bardzo silnego epizodu wysokich stężeń zanieczyszczeń powietrza było związane z oddziaływaniem rozległych ośrodków wysokiego ciśnienia. Sprzyjały one subsydencji cząstek powietrza i zwiększaniu stabilności atmosfery, co w konsekwencji doprowadziło do powstania inwersji osiadania w dolnej i środkowej troposferze. Ponadto, podobnie do artykułu Malek i in.

[2006] zidentyfikowane zostało występowanie inwersji radiacyjnych będących skutkiem intensywnego wypromieniowania ciepła z podłoża w godzinach nocnych wzmocnianego prawdopodobnie katabatycznymi spływami chłodnego powietrza z otaczających analizowane obszary wzniesień i masywów górskich. Przeprowadzone analizy dowiodły, iż poza opisywanymi wielokrotnie w literaturze naukowej sytuacjami antycyklonalnymi, wzrostowi zanieczyszczeń powietrza może sprzyjać także położenie w obrębie siodła barycznego, wału wyżowego lub w strefie rozmytego pola ciśnienia atmosferycznego. Dotyczy to w szczególności przypadków, gdy w górnej i środkowej troposferze następuje napływ ciepłego i suchego powietrza. Przyczyną wystąpienia wysokich stężeń zanieczyszczeń w analizowanych epizodach było tworzenie się także inwersji adwekcyjnych, które towarzyszyły powolnemu przemieszczaniu się frontów atmosferycznych spowalnianych przez występujące tam obszary podwyższonego ciśnienia.

Porównanie stężeń zanieczyszczeń powietrza w małych miastach zlokalizowanych w kotlinach karpackich z Bielsko-Białą i Krakowem dowodzą, iż stan aerosanitarny powietrza nie jest uwarunkowany wyłącznie stopniem urbanizacji. Główną rolę w kształtowaniu poziomu zanieczyszczeń powietrza odgrywała aktualna sytuacja synoptyczna i lokalna rzeźba terenu. Niższa koncentracja omawianych polutantów w Krakowie w trakcie badanych epizodów mogła być uwarunkowana m.in. rozwojem efektu miejskiej wyspy ciepła i związaną z nią większą emisją ciepła ułatwiającą dyssypację warstw hamujących. Analogicznie do pracy Z. Błażek i in. (2013) zidentyfikowano istnienie dużych różnic w koncentracji dwutlenku siarki między analizowanymi stacjami, co prawdopodobnie wynika ze zróżnicowanego udziału palenisk domowych wykorzystujących słabej jakości paliwa kopalne o zwiększonej zawartości siarki.

Literatura

- Bielec-Bąkowska Z., Knozová G., Leśniok M., Matuszko D., Piotrowicz K., 2011, *High suspended dust concentration in Brno, Sosnowiec and Krakow (the year 2009 as an example)*, Prace Geograficzne UJ, 126: 67-84.
- Błażek Z., Černíkovský L., Krajny E., Krejčí B., Ośródko L., Volná V., Wojtylak M., 2013, *Wpływ warunków meteorologicznych na jakość powietrza w obszarze przygranicznym Śląska i Moraw*, Český hydrometeorologický ústav, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa.
- Bokwa A., 2011, *Influence of the air temperature inversions on the air pollution dispersion conditions in Krakow*, Prace Geograficzne UJ, 126: 41-51.

- Dholakia H.H., Bhadra D., Garg A.**, 2014, *Short term association between ambient air pollution and mortality and modification by temperature in five Indian cities*, Atmospheric Environment, 99: 168-174.
- Fu Q., Zhuang G., Wang J., Xu Ch., Huang K., Li J., Hou B., Lu T., Street D.G.**, 2008, *Mechanism of formation of the heaviest pollution episode ever recorded in the Yangtze River Delta, China*, Atmospheric Environment, 42: 2023-2036.
- Ji D., Wang Y., Wang L., Chen L., Hu B., Tang G., Xin J., Song T., Wen T., Sun Y., Pan Y., Liu Z.**, 2012, *Analysis of heavy pollution episodes in selected cities of northern China*, Atmospheric Environment, 50: 338-348.
- Kim K.H., Kabir E., Kabir S.**, 2015, *A review on the human health impact of airborne particulate matter*, Environment International, 74: 136-143.
- Kondracki J.**, 2002, *Geografia regionalna Polski*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Kukkonen J., Pohjola M., Sokhi R.S., Luhana L., Kitwiroon N., Fragkou L., Rantamäki M., Berge E., Ødegaard V., Slørdal L.H., Denby B., Finardi S.**, 2005, *Analysis and evaluation of selected local-scale PM10 air pollution episodes in four European cities, Helsinki, London, Milan and Oslo*, Atmospheric Environment 39: 2759-2773.
- Lee S., Ho Ch., Lee Y.G., Choi H., Song Ch.**, 2013, *Influence of transboundary air pollutants from China on the high PM10 episode in Seoul, Korea for the period October 16-20, 2008*, Atmospheric Environment, 77: 430-439.
- Leśniok M., Małarzewski Ł., Niedźwiedz T.**, 2010, *Classification of circulation types for Southern Poland with an application to air pollution concentration in Upper Silesia*, Physics and Chemistry of the Earth, 35: 516-522.
- Lu F., Xu D., Cheng Y., Dong S., Guo Ch., Jiang X.**, 2015, *Systematic review and meta-analysis of the adverse health effects of ambient PM 2.5 and PM 10 pollution in the Chinese population*, Environmental Research, 136: 196-204.
- Malek E., Davis T., Martin R.S., Silva P.J.**, 2006, *Meteorological and environmental aspects of one of the worst national air pollution episodes (January, 2004) in Logan, Cache Valley, Utah, USA*, Atmospheric Research, 79: 108-122.
- Pascal M., Corso M., Chanel O., Declercq C., Badaloni C., Cesaroni G., Henschel S., Meister K., Haluza D., Martin-Olmedo P., Medina S.**, 2013, *Assessing the public health impacts of urban air pollution in 25 European cities, Results of the Aphekom project*, Science of the Total Environment, 449: 390-400.
- Radomski J., Widawski A.**, 2011, *Influence of circulation types on the SO₂ concentration in the Silesian Upland*, Prace Geograficzne UJ, 126: 53-65.
- Russo A., Trigo R.M., Martins H., Mendes M.**, 2014, *NO₂, PM10 and O₃ urban concentrations and its association with circulation weather types in Portugal*, Atmospheric Environment, 89: 768-785.
- Segura S., Estellés V., Esteve A.R., Utrillas M.P., Martínez-Lozano J.A.**, 2013, *Analysis of a severe pollution episode in Valencia (Spain) and its effect on ground level particulate matter*, Journal of Aerosol Science: 5641-52.

- Trivedi D.K., Ali K., Beig G.**, 2014, *Impact of meteorological parameters on the development of fine and coarse particles over Delhi*, Science of the Total Environment, 478: 175-183.
- Unal Y.S., Toros H., Deniz A., Incecik S.**, 2011, *Influence of meteorological factors and emission sources on spatial and temporal variations of PM10 concentrations in Istanbul metropolitan area*, Atmospheric Environment, 45: 5504-5513.
- Wang Y., Ying Q., Hu J., Zhang H.**, 2014, *Spatial and temporal variations of six criteria air pollutants in 31 provincial capital cities in China during 2013 – 2014*, Environment International, 73: 413-422.
- Whiteman C.D., Hoch S.W., Horel J.D., Charland A.**, 2014, *Relationship between particulate air pollution and meteorological variables in Utah's Salt Lake Valley*, Atmospheric Environment, 94: 742-753.

Strony internetowe

- <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>, 10.05.2016.
- <http://www1.wetter3.de/>, 08.05.2016.
- <http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>, 10.05.2016.
- <http://www.pogodynka.pl/>, 08.05.2016.
- <http://www.ogimet.com/>, 10.05.2016.
- <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>, 10.05.2016.
- <http://powietrze.katowice.wios.gov.pl/>, 04.05.2016.
- <http://monitoring.krakow.pios.gov.pl/>, 28.04.2016.

Summary

HEAVY AIR POLLUTION EPISODES IN SELECTED POLISH WESTERN CARPATHIANS BASINS

The issue of air pollution is an important research problem which has been studied over many years in different parts of the world. Despite widespread interest in the discussed topic, to date the research on air quality has focused almost exclusively on highly industrialized and urbanized cities. The objective of this study was to clarify the causes of high concentration of particulate matter PM 10 and sulfur dioxide occurring in relatively small cities located in the selected basins of Polish Western Carpathians. The results confirmed that persistence of extremely high concentration of air pollutants occurring from 30 December 2015 to 11 January 2016 and from 18 January 2016 to 27 January 2016 was associated with the local relief, as well as with the unfavourable dispersion condition.

Keywords:: air pollution, temperature inversion, Polish Western Carpathians