

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2019), 28 (4), 594–609
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2019), 28 (4)
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2019), 28 (4), 594–609
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2019), 28 (4)
<http://iks.pn.sggw.pl>
DOI 10.22630/PNIKS.2019.28.4.54

Ewa ANIOŁ, Grzegorz MAJEWSKI

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Wiejskiego w Warszawie
Faculty of Civil and Environmental Engineering, Warsaw University of Life Sciences
– SGGW

Długoterminowe trendy widzialności oraz jej cechy charakterystyczne w wybranych regionach Polski **Long-term trends in visibility and its characteristics in selected regions of Poland**

Słowa kluczowe: widzialność, zanieczyszczenie powietrza, parametry meteorologiczne
Key words: visibility, air pollution, meteorological elements

Wprowadzenie

Zanieczyszczenie powietrza, wód i gleb jest nierozłącznie związane z historią rozwoju ludzkości. Zanieczyszczenie środowiska w minionych wiekach było problemem lokalnym, nie jak ówczesnie globalnym i transgenicznym. Od wielu lat prowadzone są dyskusje nad rozwojem cywilizacyjnym i jego niekoniecznie pozytywnym wpływie na środowisko naturalne. Postęp w zakresie technologii oraz duże tempo życia ludności powodują wiele niekorzystnych zmian w jego otoczeniu. Kreowanie idei zrównoważo-

nego rozwoju prowadzi do konkretnych rozwiązań zmierzających do ochrony i poprawy jakości środowiska, w którym żyją ludzie (Kukuła, 2014). Od dawna wiadomo, że zanieczyszczenie atmosfery może spowodować zmniejszenie widzialności atmosfery, zdefiniowanej jako maksymalna odległość, na której kontury celu mogą być rozpoznane na horyzoncie jako tło. Wraz z szybkim uprzemysłowieniem i urbanizacją zanieczyszczenie powietrza oraz związane z tym problemy z widzialnością stały się coraz poważniejsze w ciągu ostatnich lat. Aby lepiej zrozumieć przyczyny pogorszenia widzialności, należy monitorować stężenie pyłu zawieszonego (PM) i skład chemiczny aerozoli (Yu i in., 2016). Głównymi zanieczyszczeniami powietrza są m.in.: dwutlenek siarki (SO₂), tlenki azotu (NO_x) oraz

pyły (wśród nich PM_{10}). Aktualne zainteresowanie PM_{10} wynika głównie z jego wpływu na zdrowie człowieka i jego roli w zmianach klimatycznych. Szczegółowe badania właściwości chemicznych pyłu atmosferycznego są ważne zarówno do wyjaśnienia jego toksyczności, jak i wpływu na zmiany klimatyczne. Tlenki azotu są jednymi z groźniejszych składników skażających atmosferę. Uważa się, że są bardziej szkodliwe od tlenku węgla (CO) oraz kilkakrotnie od dwutlenku siarki, który jest jednym z najbardziej niebezpiecznych zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego. Wysokie stężenie SO_2 w powietrzu może doprowadzić do uszkodzenia dróg oddechowych, a u roślin powoduje obumieranie liści (Kostrz i Satora, 2017). Zagadnienia związane z ochroną środowiska, jak i również ochroną powietrza atmosferycznego rozpatruje się w bardzo szerokiej skali – od lokalnej do globalnej. Pogorszenie widzialności spowodowane zanieczyszczeniem atmosfery jest problemem globalnym. Występuje ona w wielu gęsto zaludnionych obszarach, które doświadczyły wzrostu liczby ludności i industrializacji. Widzialność jest bardzo złożonym zagadnieniem – bezpośrednio wynika z poziomu antropogenicznego zanieczyszczenia powietrza, ale kształtują ją także warunki meteorologiczne. Wpływ antropogenicznego zanieczyszczenia powietrza na zdrowie ludzkie i widzialność jest badany od dziesięcioleci. Przeprowadzono wiele badań nie tylko w celu oceny korzyści dla zdrowia ludzkiego wynikających ze zmniejszenia emisji zanieczyszczeń powietrza (Tang i in., 2017), ale również w celu zrozumienia, w jaki sposób zanieczyszczenia powietrza negatywnie wpły-

wają na widzialność. Ogólnie rzecz biorąc, widzialność stanowi dobry wskaźnik stopnia zanieczyszczenia powietrza i może być również stosowana jako substytut oceny wpływu na zdrowie człowieka (Majewski, Rogula-Kozłowska, Czechowski, Badyda i Brandyk, 2015). Niezależnie od najodpowiedniejszej definicji liczne badania przeprowadzone na całym świecie dostarczyły wystarczających dowodów na to, że redukcja widzialności wynika w dużej mierze z rozproszenia światła, którego stężenia zależą od warunków meteorologicznych i siły źródła emisji (Dayan i Levy, 2005). Wyniki pokazują, że drobne cząstki odgrywają ważną rolę w kontrolowaniu widzialności w Tianjin. Głównymi czynnikami przyczyniającymi się do zmniejszenia współczynnika ekstynkcji światła w tym mieście są siarczany (Han i in., 2012). W Chinach badany jest związek między widzialnością a niekorzystnymi skutkami zdrowotnymi. Wang oraz współautorzy (2019) sugerują możliwość wykorzystania widzialności jako substytutu oceny jakości powietrza w badaniach nad zdrowotnością. Badania pokazują, że w dni o dużym zamgleniu zwiększona frakcja w cząstkach aerozolu jest kluczowa, a spadek stężeń azotanów, siarczanów i ich gazów prekursorowych przyczyniłby się do lepszej widzialności. Dane dotyczące widzialności są rutynowo gromadzone na lotniskach lub w stacjach monitoringu jakości powietrza na całym świecie, a więc są dostępne do analizy brakujących pomiarów zanieczyszczeń w krajach rozwijających się. Zasadne jest postawienie hipotezy, że widzialność może być wykorzystana jako substytut zanieczyszczenia powietrza do oceny skutków zdrowotnych

w miejscach, gdzie rutynowy monitoring powietrza jest niedostępny (Huang i in., 2009).

W celu zbadania wpływu zanieczyszczeń powietrza PM_{10} , NO_2 oraz SO_2 na widzialność wraz z warunkami meteorologicznymi przeprowadzono analizę statystyczną wyników pomiarów uzyskanych z trzech wybranych stacji w Polsce (Gdańsk, Warszawa, Kraków). Analiza ta wykorzystuje zmienne meteorologiczne, takie jak: wilgotność względną powietrza, średnią dobową temperaturę powietrza, minimalną oraz maksymalną temperaturę powietrza, prędkość wiatru, ciśnienie powietrza atmosferycznego oraz wielkość opadu atmosferycznego.



RYСУNEK 1. Lokalizacja stacji pomiarowych poddanych analizie w Polsce
FIGURE 1. Location of the measuring station analyzed in Poland

Material i metoda

Zbadano wpływ zanieczyszczeń powietrza wraz z czynnikami meteorologicznymi na widzialność na przykładzie trzech miast w Polsce. Do analizy wybrano miejscowości różniące się położeniem geograficznym i strukturą emisji zanieczyszczeń. Przeprowadzono szeroko zakrojoną analizę na stacjach pomiarowych Warszawa – ul. Wokalna, Gdańsk – Nowy Port, oraz Kraków – al. Krasieńskiego (rys. 1).

Stacja pomiarowa Warszawa – ul. Wokalna znajduje w dzielnicy Ursynów ($52^{\circ}16'07''72$ N; $21^{\circ}03'38''19$ E). Dokonuje się na niej pomiarów zanieczyszczenia powietrza NO_2 , NO_x , SO_2 oraz pyłów zawieszonych PM_{10} , $PM_{2,5}$. Stacja pomiarowa Gdańsk – Nowy Port jest zlokalizowana przy ul. Wyzwolenia ($54^{\circ}39'44''67$ N; $18^{\circ}66'95''29$ E) i analizuje się na niej stężenie SO_2 , NO - NO_2 - NO_x

w powietrzu. Na stacji pomiarowej Kraków – al. Krasieńskiego ($19^{\circ}92'61''89$ E, $50^{\circ}05'76''78$ N) dokonywane są m.in. pomiary NO , NO_2 , NO_x , PM_{10} , $PM_{2,5}$.

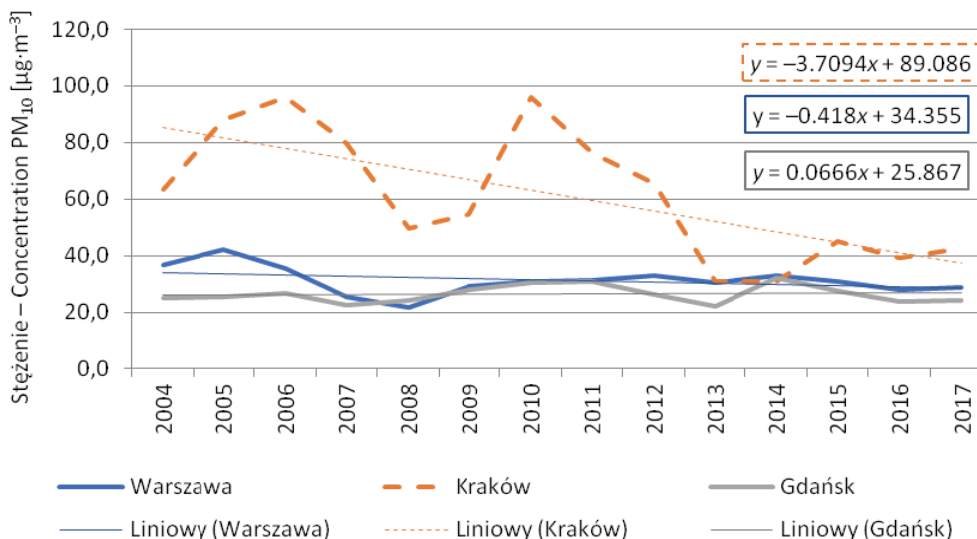
Do realizacji celu pracy wykorzystano dane z lat 2004–2017 na temat stężenia zanieczyszczeń powietrza, tj. PM_{10} , SO_2 , NO_2 , z Banku Danych Pomiarowych Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska oraz z portalu internetowego <https://www.ogimet.com>, z którego pobrano dane meteorologiczne wraz z danymi o widzialności. Zbadano związek między widzialnością a różnymi czynnikami, w tym PM_{10} , NO_2 i SO_2 , z wilgotnością względną powietrza, średnią, maksymalną i minimalną temperaturą powietrza, prędkością i kierunkiem wiatru, wielkością opadu atmosferycznego oraz ciśnieniem atmosferycznym. Obliczenia statystyczne wykonano za pomocą programu Statistica 10.0.

Wyniki

Na rysunkach 2, 3 i 4 przedstawiono średnie roczne stężenia PM_{10} , NO_2 oraz SO_2 na stacjach monitoringu Warszawa – ul. Wokalna, Gdańsk – Nowy Port oraz Kraków – al. Krasińskiego.

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska z 2012 roku w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu w ciągu roku kalendarzowego poziom PM_{10} nie powinien przekraczać normy wynoszącej $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Jedynie w Gdańsku w latach 2004–2017 norma PM_{10} nie została przekroczona (rys. 2). Jednym z głównych czynników, który przyczynił się do zadowalającego wyniku, jest położenie geograficzne. Gdańsk leży nad brzegiem morza i jego sąsiedztwo zapewnia doskonałą cyrkulację powietrza. W trakcie 14 lat prowadzonych analiz minimalne stężenie zanieczyszczeń pyłowych w Gdańsku nie przekroczyło poziomu $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ i było najniższe

w stosunku do stacji w Krakowie oraz w Warszawie. Nad morzem wieje częściej i mocniej niż w innych regionach Polski, co skutecznie przyczynia się do redukcji stężenia pyłu zawieszonego. Z przeprowadzonych analiz wynika, iż średnie roczne wartości stężenia PM_{10} w latach 2004–2012 na stacji Kraków – al. Krasińskiego znacznie przewyższają wartości dopuszczalne dla średnich rocznych stężeń. W latach 2006 i 2010 średnioroczne stężenia zanieczyszczeń osiągnęły największe wartości. Minimalne średnioroczne stężenia zarejestrowane w Krakowie są najwyższe spośród trzech badanych stacji. Jakość powietrza w Warszawie sukcesywnie się polepsza, jedynie w 2005 roku zanotowano przekroczenie średnich rocznych stężeń. Po 2005 roku nastąpił spadek stężenia zanieczyszczeń i utrzymuje się on na poziomie $30\text{--}35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ z dalszą tendencją spadkową. Analiza tempa zmian średnich dobowych stężeń PM_{10} w la-



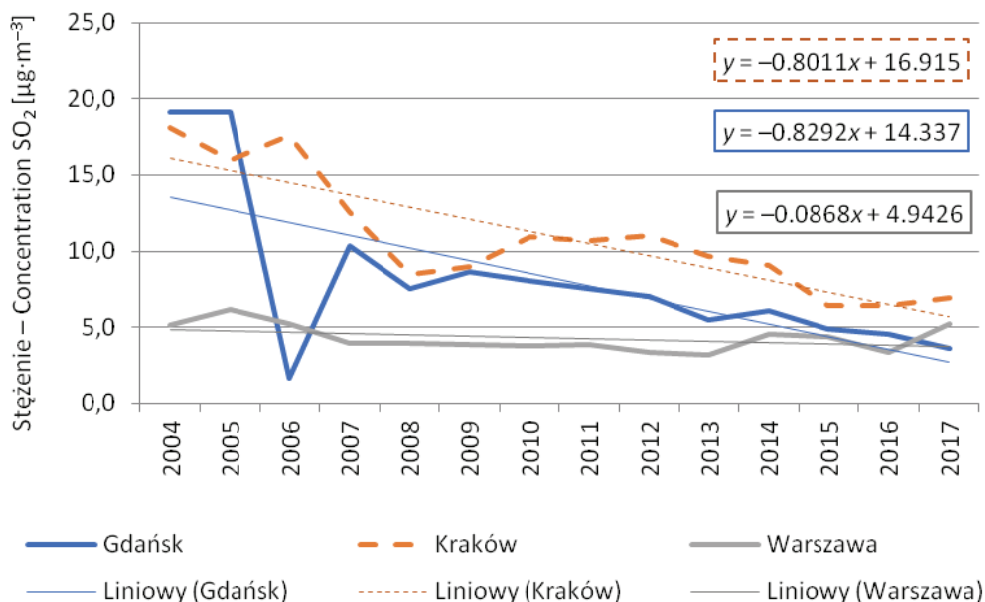
RYSUNEK 2. Roczne zmiany stężeń zanieczyszczeń PM_{10} w latach 2004–2017
FIGURE 2. Annual changes in concentrations of PM_{10} in 2004–2017

tach 2004–2017 pozwoliła wyznaczyć malejący trend w Krakowie, natomiast w Warszawie i Gdańsku nie wykazała istotnych statystycznie trendów.

Analizy średnich rocznych stężeń SO_2 (rys. 3) wskazują, że w ciągu 14 lat nie zostały przekroczone średnioroczne normy zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska z 2012 roku, wynoszące $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Najbardziej niekorzystna sytuacja (najwyższe średnie roczne stężenie) wystąpiła w 2005 roku w Gdańsku, po czym w 2006 nastąpił nagły spadek i od 2008 wartości pozostają na podobnym poziomie (rys. 3). W Krakowie w 2004 roku zanotowano najwyższe średnioroczne stężenia SO_2 , które następnie gwałtownie zmniejszyły się i od 2008 sukcesywnie spada. Na stacji Warszawa – ul. Wokalna szczegółowa analiza pozwoliła na wysunięcie wniosku, iż najwyższe stężenie SO_2 nastąpiło w latach

2004 i 2005 (rys. 3). Analiza tempa zmian średnich dobowych stężeń SO_2 w latach 2004–2017 wykazała malejący trend na poziomie istotności 5% we wszystkich badanych miastach. Siarczany są dominującymi składnikami odpowiedzialnymi za upośledzenie widzialności (Yu i in., 2016).

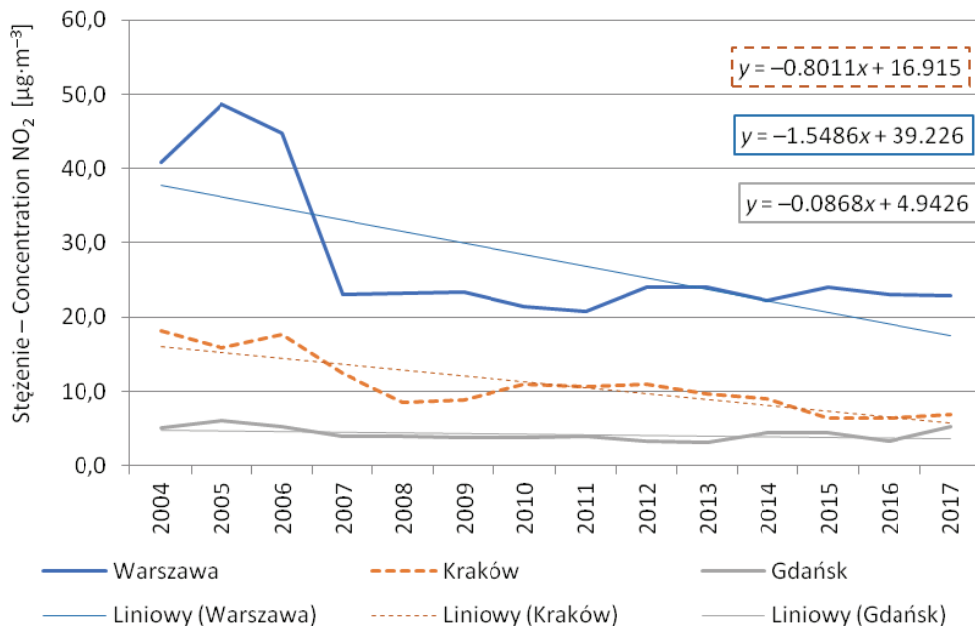
Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska z 2012 roku w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu w ciągu roku kalendarzowego poziom NO_2 nie powinien przekraczać normy wynoszącej $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. W Warszawie od 2004 do 2006 roku normy średniorocznych stężeń NO_2 zostały przekroczone (najmniej korzystnie wyglądała sytuacja w latach 2004, 2005 i 2006), a po 2007 wartości spadły poniżej granicy normy i kształtują się na podobnym poziomie. W Krakowie w analizowanym okresie pomiarowym nie odnotowano średnich



RYSunEK 3. Roczne zmiany stężeń zanieczyszczeń SO_2 w latach 2004–2017
 FIGURE 3. Annual changes in concentrations of SO_2 in 2004–2017

rocznych przekroczeń dopuszczalnych stężeń NO₂, podobnie było w Gdańsku (rys. 4).

wartości widzialności, stężeń zanieczyszczeń i parametrów meteorologicznych dla całego okresu badawczego oraz



RYSunEK 4. Roczne zmiany stężeń NO₂ w latach 2004–2017
FIGURE 4. Annual changes in concentrations of NO₂ in 2004–2017

Analiza trendu nie wykazała wartości spadkowej i pomimo braku przekroczeń wartości średniorocznych sytuacja nie jest korzystna, czego dowodzi 2017 rok i niewielki, lecz niepokojący wzrost stężenia NO₂, który trzeba dalej monitorować. Analiza tempa zmian średnich dobowych stężeń NO₂ w latach 2004–2017 wykazała malejący trend na poziomie istotności 5% we wszystkich badanych miastach.

Analiza korelacji stężeń wybranych zanieczyszczeń i parametrów meteorologicznych z widzialnością

Dokonano szczegółowej analizy współczynnika korelacji Pearsona obliczonego na podstawie średniodobowych

z podziałem na sezon letni i zimowy (grzewczy). Przeanalizowano zależność między poszczególnymi zanieczyszczeniami powietrza (PM₁₀, SO₂, NO₂) oraz wybranymi parametrami meteorologicznymi a widzialnością (tab. 1).

Dane w tabeli 1 wyraźnie wskazują na związek PM₁₀ oraz SO₂ z widzialnością. Gdy stężenie PM₁₀ rośnie, widzialność maleje. W sezonie zimowym współczynniki korelacji osiągały większe wartości niż w sezonie letnim. Analiza korelacji wykazała w Krakowie brak związku NO₂ z widzialnością w całym analizowanym okresie oraz w sezonie letnim. Niewielką istotną statystycznie zależność ($R = -0,07$) uzyskano dla sezonu zimowego. Stwierdzono istotną

TABELA 1. Współczynniki korelacji liniowej między zanieczyszczeniami powietrza wraz z wybranymi parametrami meteorologicznymi a widzialnością w Warszawie, Gdańsku oraz Krakowie w latach 2004–2017 z podziałem na sezon zimowy i letni

TABLE 1. Correlation coefficients between air pollution with selected meteorological parameters and visibility in Warsaw, Gdańsk and Kraków in 2004–2017 divided into winter and summer season

Widzialność Visibility (<i>Vis</i>)	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	T_{\max}	T_{\min}	T	H_r	W_s	<i>Pres.</i>	<i>Prec.</i>
Warszawa										
Cały okres All period	-0,26	-0,30	-0,18	0,56	0,46	0,59	-0,68	0,07	0,02	-0,13
Sezon zimowy Winter season	-0,20	-0,19	-0,16	0,28	0,16	0,32	-0,59	0,34	-0,02	-0,06
Sezon letni Summer season	-0,06	-0,11	-0,15	0,26	0,14	0,33	-0,52	0,02	0,21	-0,31
Gdańsk										
Cały okres All period	-0,43	-0,26	-0,32	0,48	0,46	0,44	-0,41	0,17	0,04	-0,01
Sezon zimowy	-0,42	-0,23	-0,30	0,24	0,25	0,25	-0,23	0,27	0,01	0,05
Sezon letni Summer season	-0,30	-0,14	-0,22	0,10	0,16	0,08	-0,19	0,12	0,08	-0,09
Kraków										
Cały okres All period	-0,44	-0,38	0,01	0,6	0,53	0,61	-0,71	0,22	-0,14	-0,09
Sezon zimowy Winter season	-0,37	-0,25	-0,07	0,35	0,31	0,38	-0,59	0,51	-0,21	0,05
Sezon letni Summer season	-0,24	-0,14	0,00	0,25	0,08	0,25	-0,58	0,18	0,10	-0,29

T – średnia dobowa temperatura powietrza [°C]; T_{\max} – maksymalna temperatura powietrza [°C]; T_{\min} – minimalna temperatura powietrza [°C]; H_r – wilgotność względna powietrza [%]; W_s – prędkość wiatru [km·h⁻¹]; *Pres.* – ciśnienie atmosferyczne [hPa]; *Prec.* – wielkość opadu atmosferycznego [mm].

Wytłuszczone dane oznaczają istotność statystyczną na poziomie $\alpha = 1$ lub 5%.

T – average daily air temperature [°C]; T_{\max} – maximum air temperature [°C]; T_{\min} – minimum air temperature [°C]; H_r – relative humidity of air [%]; W_s – wind speed [km·h⁻¹]; *Pres.* – atmospheric pressure [hPa]; *Prec.* – amount of precipitation [mm].

Bold data means statistical significance at level $\alpha = 1$ or 5%.

zależność statystyczną między NO₂ a widzialnością w Warszawie. Wzrost stężenia NO₂ w powietrzu wpływa na pogorszenie widzialności. Analiza korelacji w Gdańsku wykazała istotny wpływ sezonowości na oddziaływanie szkodliwych stężeń zanieczyszczeń (NO₂). Pomimo

że negatywny wpływ NO₂ na widzialność można stwierdzić zarówno zimą, jak i latem, to w sezonie zimowym NO₂ mocniej ogranicza widzialność. Badania prowadzone w Nanjing, w Chinach są sprzeczne z wynikami analizy zawartymi w tabeli 1. Deng, Xing, Zhuang i Du

(2014) wykluczyli wpływ sezonowości na widzialność, co wyraźnie dowiedziono na podstawie analizy korelacji (tab. 1), kiedy warunki meteorologiczne wraz ze stężeniami zanieczyszczeń mocniej oddziałują na widzialność w sezonie zimowym niż letnim. Według Denga i współautorów (2014) występują słabe wahania sezonowe: odpowiednio 9,2 km wiosną (marzec – maj), 9,8 km latem (czerwiec – sierpień), 8,2 km jesienią (wrzesień – listopad) i 8,1 km zimą (grudzień – luty) (Deng i in., 2011). Wysokość temperatury powietrza ma duży wpływ na widzialność. Na podstawie analizy wykazano, iż wraz ze wzrostem temperatury powietrza widzialność pozioma się wydłuża. Maksymalna temperatura powietrza ma większy wpływ na widzialność niż minimalna. Analiza wykazała, iż największy wpływ na widzialność w Krakowie, Warszawie oraz Gdańsku ma wilgotność względna powietrza – wraz z jej wzrostem widzialność maleje najintensywniej. Z kolei pozytywny wpływ na widzialność ma prędkość wiatru, ponieważ wraz z jej wzrostem widzialność pozioma się wydłuża. Jest to szczególnie wyraźne w sezonie zimowym (grzewczym). Według badań Zhao i współautorów (2013) prędkość wiatru była głównym czynnikiem meteorologicznym wpływającym zarówno na widzialność, jak i koncentrację masy cząstek. Małe prędkości wiatru w połączeniu z inwersjami temperatury powietrza wskazywały na stabilne warunki meteorologiczne podczas procesu zanieczyszczenia, co ograniczało dyspersję zanieczyszczeń i mogło wywoływać wyższe stężenie PM i mniejszą widzialność. Wysokie temperatury powietrza, szczególnie latem, mogą prowadzić do intensywnego

pionowego rozproszenia zanieczyszczeń, które indukują odwrotną zależność między temperaturą powietrza a PM, zwłaszcza w kategoriach drobnych cząstek. Jednakże, gdy wilgotność względna jest mała, wzrost higroskopijności aerozolu jest słaby, co może spowodować zmniejszenie zdolności rozpraszania aerozolu i zwiększenie widzialności (Zhao i in., 2013). W Singapurze higroskopijny wzrost cząstek powoduje silnie nieliniowy związek między widzialnością a stężeniem aerozolu w wilgotnych warunkach. Tak więc nawet w tropikalnym nadmorskim mieście rozważanie względnej wilgotności względnej jest pożądane przy prognozowaniu pogorszenia widzialności spowodowanego przez aerozole zamglone (Lee, Gan i Chew, 2016). Częstość występowania ograniczonej widzialności cechuje się wyraźną sezonowością (zimą ok. 60%, latem ok. 10%). Ograniczenie widzialności było najczęściej spowodowane przez zamglenie (ok. 15% wszystkich obserwacji), którego częstość była największa w miesiącach zimowych (ok. 30–31% wszystkich obserwacji). W miesiącach tych notowano ograniczenie widzialności przez śnieg, z maksymalnym udziałem w lutym (prawie 20% wszystkich obserwacji). Roczne maksimum częstości mgły wystąpiło w listopadzie (ponad 12% wszystkich obserwacji). W miesiącach letnich widzialność najczęściej ograniczał deszcz (Moskal i Nowosad, 2014). Na widzialność mają również wpływ inne elementy meteorologiczne. Duża prędkość wiatru sprzyja rozpraszaniu zanieczyszczeń, zmniejsza stężenie zanieczyszczeń powietrza i zwiększa widzialność (Zhang i in., 2019). Stwierdzono, że zamglenie miało większy wpływ na śmiertel-

ność w porównaniu z widzialnością, a efekty zostały złagodzone po skorygowaniu o pojedyncze zanieczyszczenia (PM₁₀, NO₂ i SO₂). Pył zawieszony jest uważany za główny czynnik wpływający na pogorszenie widzialności i zamglenia (Liu i in., 2014; Gu i in., 2017). Analiza statystyczna pomiarów przeprowadzonych na stacji Warszawa – ul. Wokalna nie wykazała związku ciśnienia atmosferycznego z widzialnością. Lee, Jo i Chun (2015) w swojej publikacji na temat długoterminowych trendów widzialności i jej związku ze śmiertelnością oraz jakością powietrza otrzymali ujemne korelacje, podobnie jak w Gdańsku między widzialnością a wilgotnością względną powietrza i temperaturą powietrza, podczas gdy ogólnie były dodatnie korelacje między widzialnością a wielkością opadu atmosferycznego i prędkością wiatru (Lee i in., 2015).

wsteczną (wszystkie zmienne w modelu są istotne statystycznie).

Tabela 2 przedstawia równanie regresji opisujące związek między stężeniami zanieczyszczeń wraz z parametrami meteorologicznymi a widzialnością. Do analizy regresji wykorzystano osiem zmiennych niezależnych. Nie wszystkie z analizowanych zmiennych okazały się istotne statystycznie ($p < 0,05$), do postaci modelu w żadnym z analizowanych miast nie wszedł NO₂ oraz SO₂. Przeprowadzona analiza wykazała, że w Krakowie występuje największa wariancja ($R^2 = 0,6585$). Otrzymany wynik stwierdza zależność między parametrami meteorologicznymi oraz stężeniami szkodliwych zanieczyszczeń a widzialnością na poziomie około 66%. W Warszawie stwierdzono zależność na poziomie $R^2 = 0,1969$ (ok. 20%), a w Gdańsku $R^2 = 0,3787$ (40%). Ze szkodliwych

TABELA 2. Równania regresji wyznaczone między widzialnością a stężeniem zanieczyszczeń i parametrami meteorologicznymi

TABLE 2. Regression equations determined between the unit and the total concentration and meteorological parameters

	<i>N</i>	Model	<i>R</i>	<i>R</i> ²	<i>R</i> ² _{popr.}	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>SD</i>
Warszawa	3243	$\bar{V}is = (-0,0034PM_{10}) + (-0,0044T) + (-0,025W_s)$	0,4437	0,1969	0,1961	264,71	0,00	0,32
Gdańsk	3414	$\bar{V}is = (-0,015PM_{10}) + (0,3541T_{\min}) + (-0,2861H_r) + (0,0807Pres)$	0,6154	0,3787	0,3780	519,63	0,00	7,89
Kraków	3483	$\bar{V}is = (-0,036PM_{10}) + (-0,3509T_{\max}) + (-0,7597T) + (-0,5764H_r) + (0,3969W_s)$	0,8114	0,6585	0,6580	1341,1	0,00	6,74

Analiza statystyczna, analiza regresji

W tabeli 2 zaprezentowano podstawowe charakterystyki statystyczne wraz z równaniami regresji z danych pobranych ze stacji pomiarowych z widzialnością. Wybrano typ regresji krokowo

stężeń zanieczyszczeń główny wpływ na postać modelu miał PM₁₀. Jego oddziaływanie miało największy związek z widzialnością w Krakowie ($p = -0,036$), a najmniejszy w Warszawie ($p = -0,0034$). Model regresji wykazał istotny związek

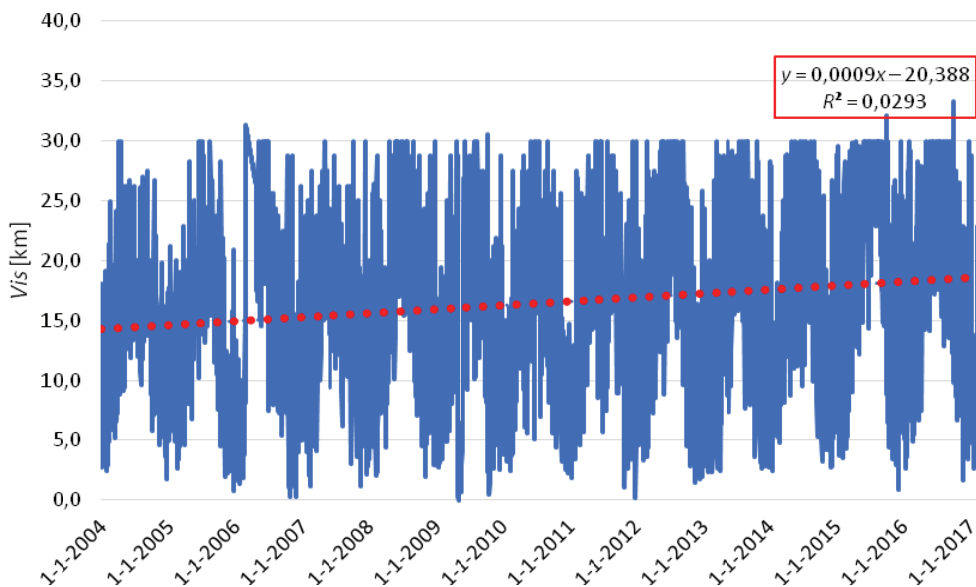
ciśnienia atmosferycznego z widzialnością poziomą w Gdańsku ($p = 0,0807$). W pozostałych stacjach, których dane zostały poddane analizie, nie stwierdzono związku widzialności z ciśnieniem atmosferycznym. Model ukazuje pozytywny związek prędkości wiatru z widzialnością poziomą, zwiększając ją poprzez wydajniejszą cyrkulację zanieczyszczonego powietrza w Krakowie ($p = 0,3969$). Liczba przypadków, tzn. dni, których dane spełniały wymogi do poddania analizie, wynosiła 3243 w Warszawie, 3414 w Gdańsku oraz 3483 w Krakowie. Wilgotność powietrza miała wpływ na postać modelu w Gdańsku oraz Krakowie, w Warszawie nie stwierdzono wpływu wilgotności powietrza na widzialność. Analiza statystyczna wykazała, że modele regresji zostały dobrze dopasowane do modelu. Analiza re-

gresji potwierdziła postawioną hipotezę o istnieniu związku widzialności ze stężeniami zanieczyszczeń i z parametrami meteorologicznymi.

Długoterminowe trendy widzialności

Na rysunkach 5, 6 i 7 przedstawiono szeregi czasowe średniej dobowej widzialności wraz z trendem regresji liniowej w Warszawie, Krakowie oraz Gdańsku w latach 2004–2017.

Analiza wykazała, że wraz z biegiem lat widzialność pozioma na stacji pomiarowej Warszawa – ul. Wokalna wyraźnie się poprawia (rys. 5). W porównaniu do stacji w Gdańsku lub Krakowie trend ten jest najbardziej wyraźny. Średnia widzialność w badanym okresie wynosiła 16,59 km. Z przeprowadzonej analizy równania linii trendu wynika, że wi-



RYSUNEK 5. Szeregi czasowe średniej dobowej widzialności wraz z trendem regresji liniowej w Warszawie w latach 2004–2017

FIGURE 5. Time series of visibility of the daily average with the linear regression trend in Warsaw in 2004–2017

działność w Warszawie co roku wzrasta o 0,33 km.

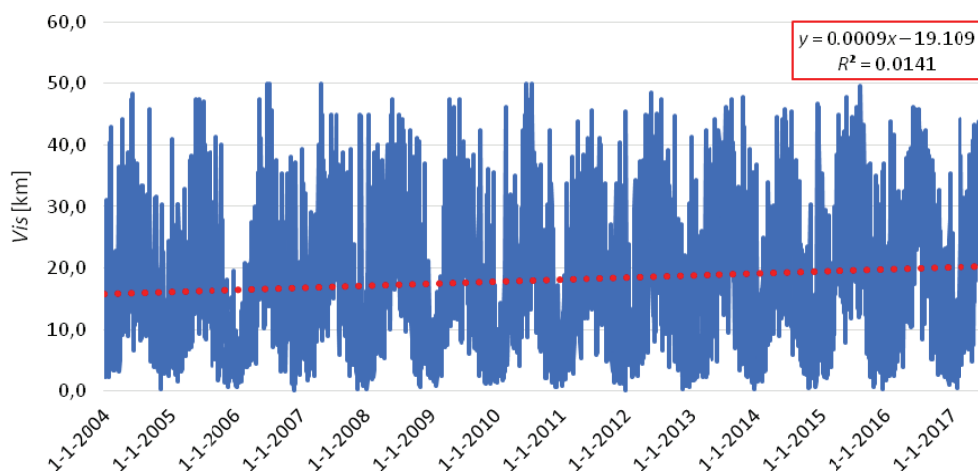
Na podstawie długoterminowych trendów widzialności dla miasta Kraków (rys. 6) wykazano, że widzialność pozioma w latach 2004–2017 została zintensyfikowana. Średnia widzialność w Krakowie wynosiła 18,08 km i przy obecnym trendzie wzrasta corocznie o 0,33 km.

Na stacji pomiarowej Gdańsk – Nowy Port średnia widzialność w analizowanym przedziale czasowym wynosiła 20,37 km. Z przeprowadzonej analizy równania linii trendu wynika, że widzialność w tym mieście maleje o 0,18 km na rok (rys. 7).

Średnia roczna widzialność w Krakowie wynosiła w 2004 roku 16,70 km, a już 21,50 km w 2017. W Warszawie na początku analizowanego okresu badawczego widzialność pozioma wynosiła 14,73 km, a pod koniec 2017 roku już 18,92 km. W Gdańsku widzialność

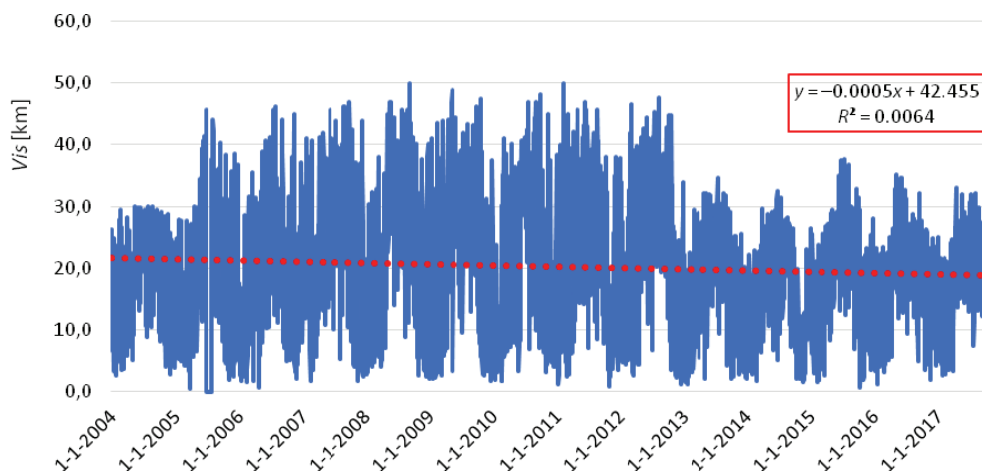
w 2004 roku mierzyła 19,07 km, a 17,92 km w 2017. Najistotniejsze i decydujące o składzie chemicznym i właściwościach aerozoli w regionie nadmorskim są ich źródła pochodzenia. Należą do nich morze i ląd z naturalnymi i antropogenicznymi składnikami. Związki węgla, siarki, azotu i chloru mogą stanowić nad morzem nawet do 90% składu aerozoli (Lewandowska i in., 2012).

Tabela 3 przedstawia średnie wartości widzialności w Polsce oraz w wybranych krajach azjatyckich. Problem widzialności w Azji jest najszerzej rozpatrywany na świecie z powodu przeludnienia, postępującej urbanizacji i wzrostu stężenia szkodliwych stężeń zanieczyszczeń mających bezpośredni wpływ na komfort życia człowieka. Stężenie drobnych cząstek stałych jest determinującym czynnikiem mającym wpływ na zasięg widzialności, niewielki spadek wilgotności względnej może przynieść korzyść, lecz



RYSunEK 6. Szeregi czasowe średniej dobowej widzialności wraz z trendem regresji liniowej w Krakowie w latach 2004–2017

FIGURE 6. Time series of average daily visibility with the linear regression trend in Krakow in 2004–2017



RYSunEK 7. Szeregi czasowe średniej dobowej widzialności wraz z trendem regresji liniowej w Gdańsku w latach 2004–2017

FIGURE 7. Time series of average daily visibility with the linear regression trend in Gdansk in 2004–2017

TABELA 3. Średnia widzialność w Polsce oraz na świecie

TABLE 3. Average visibility in Poland and in the world

Średnia widzialność Average visibility [km]	Okres badań [lata] Research period [year]	Obszar badań Research area		Literatura References
		miasto city	państwo state	
16,59	2004–2017	Warszawa	Polska	ta praca
18,08	2004–2017	Kraków		
20,37	2004–2017	Gdańsk		
10,67	1973–2007	Pekin	Chiny	Chang, Song i Liu, 2009
8,59	1973–2007	Szanghaj		Chang i in., 2009
8,50	1973–2011	Tajpej	Tajwan	Deng i in., 2014
7,50	2010–2011	Hangzhou	Chiny	Cheng i in., 2013

w ograniczonym stopniu (Cheng i in., 2013). Średnie roczne wartości widzialności dla sześciu miast w Chinach (Pekin, Chengdu, Kanton, Szanghaj, Shenyang i Xi'an) wyniosły odpowiednio 10,67, 8,60, 10,76, 8,59, 8,16 i 9,74 km. W regionach południowych i środkowo-zachodnich (Chengdu, Kanton, Szanghaj i Xi'an) widzialność była najlepsza

latem, podczas gdy w regionach północnych (Pekin i Shenyang) wiosną. Średnia widzialność wiosną była najgorsza w Kantonie, podczas gdy dla pozostałych pięciu miast widzialność zimą była gorsza prawdopodobnie z powodu spalania węgla w okresie grzewczym.

Pył zawieszony PM_{2,5} odegrał ważną rolę w pogorszeniu widzialności.

Wysoka temperatura powietrza i niskie ciśnienie atmosferyczne są korzystne dla zwiększenia zakresu widzialności. Analiza głównych składowych potwierdziła wpływ wysokich stężeń zanieczyszczeń powietrza oraz dużej wilgotności względnej na pogorszenie widzialności (Deng i in., 2014).

Podsumowanie i wnioski

Analiza statystyczna średnich dobowych wartości widzialności z lat 2004–2017 wykazała trend rosnący na poziomie istotności 5%. Widzialność poprawiła się w Warszawie oraz Krakowie. W Gdańsku stwierdzono ograniczenie widzialności poziomej spowodowane rosnącym z roku na rok stężeniem PM_{10} . Kontrola spalania węgla i biomasy, spalin samochodowych i emisji przemysłowych może doprowadzić do znacznej poprawy widzialności atmosferycznej w wybranych miastach, gdyż one mają największy wpływ na wartości stężeń szkodliwych zanieczyszczeń. Zanieczyszczenia atmosferyczne mogą powodować zmniejszenie widzialności, dlatego ma ona zasadnicze znaczenie w zainteresowaniu badaniami zanieczyszczenia powietrza i klimatologią. Wpływ emisji zanieczyszczeń i parametrów meteorologicznych na widzialność nadal wymaga dogłębnego badania, ponieważ mają one wpływ na życie i zdrowie człowieka.

1. Średnia widzialność na analizowanych stacjach pomiarowych w latach 2004–2017 wyniosła: 16,59 km (Warszawa), 18,8 km (Kraków) i 20,37 km (Gdańsk). W badanym okresie zaznaczyła się jej wyraźna zmienność

sezonowa – większa latem, a mniejszą zimą w okresie grzewczym.

2. W Warszawie oraz Krakowie zwiększenie zakresu widzialności poziomej spowodowane zostało wzrostem stężeń PM_{10} , NO_2 oraz SO_2 , a wyraźny związek między widzialnością a stężeniem PM_{10} oznacza, że drobne cząstki są najważniejszym czynnikiem wpływającym na pogorszenie widzialności.
3. W zespole elementów meteorologicznych najsilniej skorelowanych z widzialnością największą rolę odgrywały wilgotność względna powietrza i temperatura powietrza (T , T_{max}).
4. Analiza związków statystycznych między widzialnością a stężeniem zanieczyszczeń powietrza i parametrami meteorologicznymi wykazała, że w uzyskanych równaniach regresji wystąpiło od trzech do pięciu zmiennych niezależnych. Uzyskana wartość współczynnika korelacji wielokrotnej (R) dla związku między widzialnością a stężeniem zanieczyszczeń i parametrami meteorologicznymi wyniosła: 0,44 (Warszawa), 0,62 (Gdańsk) oraz 0,81 (Kraków).
5. Widzialność w analizowanych miastach najsilniej zmienia się wraz ze zmianami wartości: stężenia PM_{10} , średniej dobowej temperatury powietrza, prędkości wiatru (Warszawa), stężenia PM_{10} , minimalnej temperatury powietrza, wilgotności względnej powietrza i ciśnienia atmosferycznego (Gdańsk), stężenia PM_{10} , maksymalnej temperatury powietrza, średniej dobowej temperatury powietrza, wilgotności względ-

nej powietrza i prędkości wiatru (Kraków).

6. Wyniki analizy i studium przypadku przyniosą korzyści innym dużym miastom i aglomeracjom, ponieważ dostarczają wskazówek, w jaki sposób można ustalić przyczyny pogorszenia widzialności. Warto również powtórzyć, że wizualne skutki zanieczyszczenia powietrza to tylko jedna kwestia. Rzeczywiście wpływ zanieczyszczenia powietrza na zdrowie publiczne i szerzej na środowisko ma takie samo, jeśli nie większe znaczenie niż pogorszenie widzialności.

Literatura

- Chang, D., Song, Y. i Liu, B. (2009). Visibility trends in six megacities in China 1973–2007. *Atmospheric Research*, 94(2), 161-167.
- Cheng, Z., Wang, S., Jiang, J., Fu, Q., Chen, C., Xu, B., Yu, J., Fu, X. i Hao, J. (2013). Long-term trend of haze pollution and impact of particulate matter in the Yangtze River Delta, China. *Environmental Pollution*, 182, 101-110.
- Dayan, U. i Levy, I. (2005). The influence of meteorological conditions and atmospheric circulation types on PM10 and visibility in Tel Aviv. *Journal of Applied Meteorology*, 44(5), 606-619.
- Deng, J., Wang, T., Jiang, Z., Xie, M., Zhang, R., Huang, X. i Zhu, J. (2011). Characterization of visibility and its affecting factors over Nanjing, China. *Atmospheric Research*, 101(3), 681-691.
- Deng, J., Xing, Z., Zhuang, B. i Du, K. (2014). Comparative study on long-term visibility trend and its affecting factors on both sides of the Taiwan Strait. *Atmospheric Research*, 143, 266-278.
- Gu, S., Yang, J., Woodward, A., Li, M., He, T., Wang, A., Lu, B., Liu, X., Xu, G. i Liu, Q. (2017). The short-term effects of visibility and haze on mortality in a coastal city of China: A time-series study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(11), 1419. <https://doi.org/10.3390/ijerph14111419>
- Han, S., Bian, H., Zhang, Y., Wu, J., Wang, Y., Tie, X., Li, Y., Li, X. i Yao, Q. (2012). Effect of aerosols on visibility and radiation in spring 2009 in Tianjin, China. *Aerosol and Air Quality Research*, 12, 211-217.
- Huang, W., Tan, J., Kan, H., Zhao, N., Song, W., Song, G., Chen, G., Jiang, L., Jang, Ch., Chen, R. i Chen, B. (2009). Visibility, air quality and daily mortality in Shanghai, China. *Science of the Total Environment*, 407(10), 3295-3300.
- Kostrz, M. i Satora, P. (2017). Związki odpowiedzialne za zanieczyszczenie powietrza. *Inżynieria Ekologiczna*, 18(6), 89-95.
- Kukuła, K. (2014). Wybrane problemy ochrony środowiska w Polsce w świetle wielowymiarowej analizy porównawczej. *Metody Ilościowe w Badaniach Ekonomicznych*, 15(3), 169-188.
- Lee, J.Y., Jo, W.K. i Chun, H.H. (2015). Long-term trends in visibility and its relationship with mortality, air-quality index, and meteorological factors in selected areas of Korea. *Aerosol and Air Quality Research*, 15(2), 673-681.
- Lee, S.Y., Gan, C. i Chew, B.N. (2016). Visibility deterioration and hygroscopic growth of biomass burning aerosols over a tropical coastal city: a case study over Singapore's airport. *Atmospheric Science Letters*, 17(12), 624-629.
- Lewandowska, A., Staniszevska, M., Falkowska, L., Witkowska, A., Bełdowska, M., Machuta, M. i Mróz, D. (2012). *Węgiel elementarny i organiczny, benzo (a) piren oraz alkilofenole w funkcji rozmiarów cząstek aerozoli w zurbanizowanej strefie brzegowej Zatoki Gdańskiej*. Gdańsk: Instytut Oceanografii Uniwersytetu Gdańskiego.
- Liu, T., Zhang, Y.H., Xu, Y.J., Lin, H.L., Xu, X.J., Luo, Y., Xiao, J., Zeng, W.L., Zhang, W.F., Chu, C., Keogh, K., Rutherford, S., Qian, Z., Du, Y.D., Hu, M. i Ma, W.J. (2014). The effects of dust-haze on mortality are modified by seasons and individual characteristics in Guangzhou, China. *Environmental Pollution*, 187, 116-123.
- Majewski, G., Rogula-Kozłowska, W., Czechowski, P., Badyda, A. i Brandyk, A. (2015). The

impact of selected parameters on visibility: First results from a long-term campaign in Warsaw, Poland. *Atmosphere*, 6(8), 1154-1174.

- Moskal, K. i Nowosad, M. (2014). Widzialność pozioma w Krakowie-Balicach i jej uwarunkowania w latach 2008-2012. *Przegląd Geofizyczny*, 3-4, 141-155.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 sierpnia 2012 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu. Dz.U. 2012, poz. 1031.
- Tang, G., Zhao, P., Wang, Y., Gao, W., Cheng, M., Xin, J., Li, X. i Wang, Y. (2017). Mortality and air pollution in Beijing: The long-term relationship. *Atmospheric Environment*, 150, 238-243.
- Wang, Y., Wang, Y., Wang, L., Petäjä, T., Zha, Q., Gong, C., Li, S., Pan, Y., Hu, B., Xin, J. i Kulmala, M. (2019). Increased inorganic aerosol fraction contributes to air pollution and haze in China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(9), 5881-5888.
- Yu, X., Ma, J., An, J., Yuan, L., Zhu, B., Liu, D., Wang, J. Yang, Y. i Cui, H. (2016). Impacts of meteorological condition and aerosol chemical compositions on visibility impairment in Nanjing, China. *Journal of Cleaner Production*, 131, 112-120.
- Zhang, J., Tong, L., Peng, C., Zhang, H., Huang, Z., He, J. i Xiao, H. (2019). Temporal variability of visibility and its parameterizations in Ningbo, China. *Journal of Environmental Sciences*, 77, 372-382.
- Zhao, H., Che, H., Zhang, X., Ma, Y., Wang, Y., Wang, H. i Wang, Y. (2013). Characteristics of visibility and particulate matter (PM) in an urban area of Northeast China. *Atmospheric Pollution Research*, 4(4), 427-434.

Streszczenie

Długoterminowe trendy widzialności oraz jej cechy charakterystyczne w wybranych regionach Polski. Jakość powietrza w Polsce jest determinowana wieloma czynnikami. Zbadano wpływ zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego i warunków meteorologicznych na widzialność atmosferyczną w Polsce. Do realizacji artykułu wykorzystano

analizę statystyczną wykorzystującą parametry meteorologiczne (temperatura powietrza, wilgotność względna powietrza, wielkość opadu atmosferycznego, prędkość i kierunek wiatru oraz ciśnienie atmosferyczne), a także stężenia zanieczyszczeń powietrza (PM₁₀, SO₂, NO₂) zarejestrowane latach 2004–2017. Dane pochodziły z trzech polskich miast zlokalizowanych na północy, w centralnej części oraz na południu Polski. Wykazano, że stężenie pyłu zawieszonego PM₁₀ było najważniejszym parametrem wpływającym na widzialność we wszystkich stacjach monitoringu. Zanieczyszczenie powietrza NO₂ oraz SO₂ oddziałuje negatywnie na widzialność, lecz w mniejszym stopniu niż PM₁₀. Wykazano wpływ warunków meteorologicznych, w szczególności wilgotności względnej powietrza, na pogorszenie widzialności oraz stymulujący wpływ prędkości wiatru na poprawę warunków widzialności.

Summary

Long-term trends in visibility and its characteristics in selected regions of Poland. Air quality in Poland is determined by a large number of factors. The influence of atmospheric air and meteorological conditions on atmospheric visibility in Poland was examined. The article is based on statistical analysis of meteorological elements parameters (air temperature, relative humidity, precipitation amount, wind speed and direction, and atmospheric pressure) and air pollution concentrations (PM₁₀, SO₂, NO₂) in 2004–2017. Data was provided from three Polish cities, located in the north, central and south Poland. It was shown that PM₁₀ concentration was the most important parameter affecting visibility in all monitoring stations. Air pollutants NO₂ and SO₂ have a negative effect on visibility, but to a lesser extent than PM₁₀. The influence of meteorological conditions on the effect of the air humidity on the deterioration of the visibility ratio and the stimulating effect of wind speed on the improvement of visibility conditions has been demonstrated.

Authors' address:

Ewa Anioł

(<https://orcid.org/0000-0002-5903-0592>)

Grzegorz Majewski

(<https://orcid.org/0000-0002-0122-1409>)

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

w Warszawie

Instytut Inżynierii Środowiska

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

Poland

e-mail: ewa_aniol@sggw.pl

grzegorz_majewski@sggw.pl