

WPLYW CYRKULACJI ATMOSFERYCZNEJ NA TRANSPORT I IMISJĘ ZANIECZYSZCZEŃ DEPONOWANYCH Z WODAMI OPADOWYMI W GÓRACH NISKICH I NA POGÓRZU W EUROPIE ŚRODKOWEJ

Witold Bochenek, Rafał Kozłowski, Marek Józwiak

Bochenek W., Kozłowski R., Józwiak M., 2016: Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na transport i imisję zanieczyszczeń deponowanych z wodami opadowymi w górach niskich i na pogórzu w Europie Środkowej (*The impact of atmospheric circulation on the transport and wet deposition of pollutants in low mountains and foothills of Central Europe*), *Monitoring Środowiska Przyrodniczego*, Vol. 18(2), s. 29-41.

Zarys treści: W niniejszej pracy dokonano określenia wpływu typów cyrkulacji atmosferycznej i rodzaju mas powietrza na wielkość opadów, pH i przewodność elektrolityczną (SEC) wody opadowej. Badania przeprowadzono w Stacji Bazowej ZMŚP Święty Krzyż w centralnej części Gór Świętokrzyskich i w Stacji Bazowej ZMŚP Szymbark w Beskidzie Niskim w latach 2004–2009. Równania regresji obliczone na podstawie liczebności poszczególnych typów cyrkulacji i średnich wartości pH i SEC w miesiącach w latach 2004–2009 wskazują na wpływ częstości sytuacji na wielkość omawianych parametrów fizykochemicznych wód opadowych.

Słowa klucze:

Key words:

Witold Bochenek, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, Stacja Naukowa w Szymbarku, Szymbark 430, 38-311 Szymbark

Rafał Kozłowski, Marek Józwiak, Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach, Katedra Ochrony i Kształtowania Środowiska, ul. Świętokrzyska 15, 25-406 Kielce

1. Wprowadzenie

Działalność gospodarcza i bytowa człowieka powoduje emisję zanieczyszczeń do środowiska. Człowiek oddziałuje na powietrze atmosferyczne, emitując zanieczyszczenia z palenisk domowych, środków transportu (zanieczyszczenia komunikacyjne) i obiektów związanych z działalnością produkcyjną. Zanieczyszczenia mogą mieć pochodzenie lokalne (głównie emisja z palenisk domowych) lub zdalne, przynoszone z odległości 100–200 km, znad obszarów uprzemysłowionych. W takim przypadku znaczącą rolę odgrywają typy cyrkulacji atmosferycznej i rodzaj mas powietrza. To one

w sposób decydujący wpływają na wielkość opadu, a wraz z nim dostawę substancji gazowych i pyłowych nad dany obszar. Częstokroć najsilniejsze oddziaływania emitera zanieczyszczeń występują w odległości kilkudziesięciu lub stukilkudziesięciu kilometrów. Tematyka niniejszego artykułu dotyczy zagadnienia już poruszonego przez autorów (Bochenek 2005; Kowalkowski i in. 2002; Kozłowski i in. 2011; Józwiak 2001), ale ograniczonego do jednego obszaru. Niniejszy artykuł jest pierwszą próbą porównania wyników pH i przewodności elektrolitycznej właściwej (SEC) z dwóch stacji pomiarowych odległych od siebie o 136 km i podlegających oddziaływaniu zanieczyszczeń z różnych

źródeł. Stacja w Szymbarku podlega głównie wpływowi lokalnych źródeł emisji, którymi są paleniska domowe. Sawicka-Kapusta (2003), na podstawie koncentracji metali ciężkich w plechach porostów, wnioskuje o występowaniu tutaj zanieczyszczeń transgranicznych, z uprzemysłowionych obszarów na terenie Słowacji. Stacja na Świętym Krzyżu jest eksponowana na napływ zdalnych zanieczyszczeń z obszaru aglomeracji górnośląskiej i z północnych Czech.

2. Cel i metody badań

Podstawowym celem niniejszego opracowania jest określenie wpływu typów cyrkulacji atmosferycznej i rodzaju mas powietrza na wielkość opadów, pH i przewodność elektrolityczną (SEC) wody opadowej. Analiza ma również na celu porównanie wyników: sum i średnich oraz szeregów czasowych na obydwu Stacjach. Dla realizacji postawionego celu posłużono się wynikami pomiarów wysokości opadów, pH i SEC prób zbieranych do chwytnicy na obydwu stacjach w latach 2004–2009. Każdy chwytniczy ma powierzchnię wlotową 0,25 m², co daje łączną powierzchnię recepcyjną 0,50 m². W Szymbarku chwytniczy zlokalizowano na otwartej przestrzeni, na wysokości 1,5 m nad powierzchnią gruntu, natomiast na Świętym Krzyżu, wystawiono je na wysokości 30 metrów nad gruntem, tj. 4 m nad koronami drzew. Pomiarów wykonywano bezpośrednio w terenie, wykorzystując pH-metr CP-401 i konduktometr CC-401 (Elmetron). Do określenia typów cyrkulacji

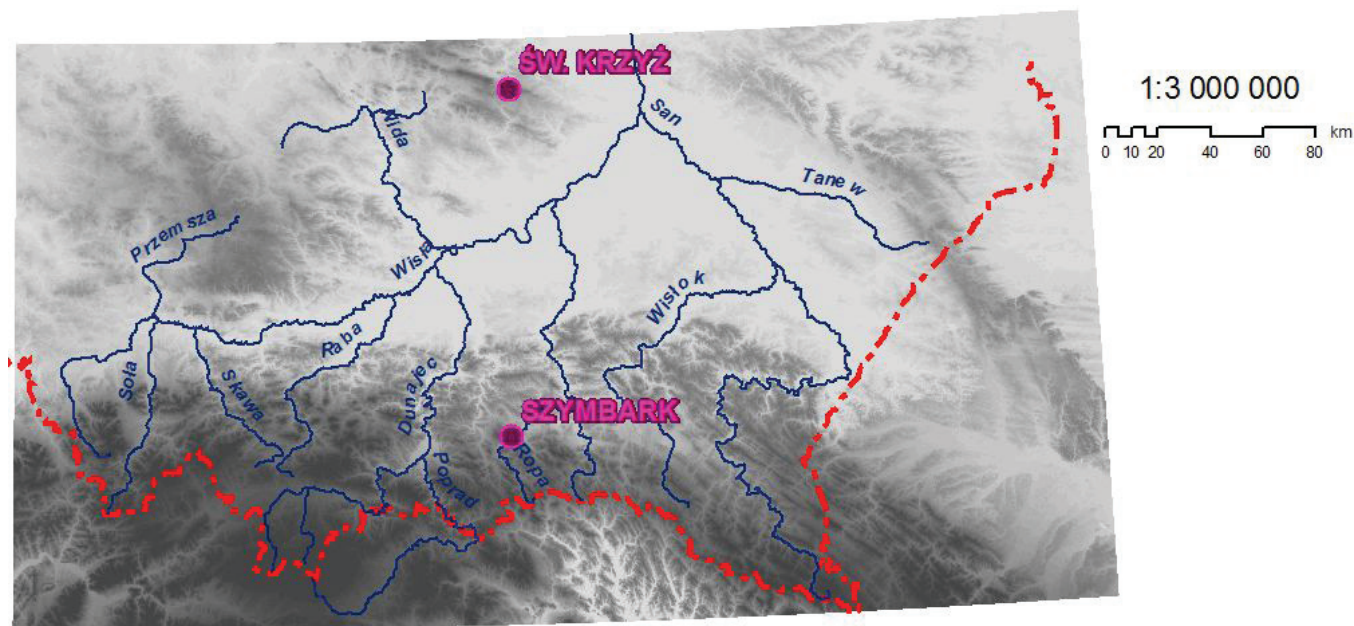
i rodzaju mas powietrza wykorzystano kalendarz sytuacji synoptycznych T. Niedźwiedzia (2011) dla obszaru dorzecza górnej Wisły.

3. Obszar badań

Obydwa obszary badawcze reprezentują geoko-systemy gór niskich Polski (ryc. 1). Stacja na Świętym Krzyżu (Stacja Bazowa ZMŚP) położona jest w centralnej części Gór Świętokrzyskich w najwyższym paśmie górskim na Wyżynie Kielecko-Sandomierskiej, na wysokości 513,5 m n.p.m. Stacja w Szymbarku (Stacja Naukowa IGiPZ PAN) reprezentuje pogranicze beskidzko-pogórskie Karpat Polskich (Beskid Niski/Doły Jasielsko-Sanockie), a punkt poboru prób wody znajduje się na wysokości 325 m n.p.m.

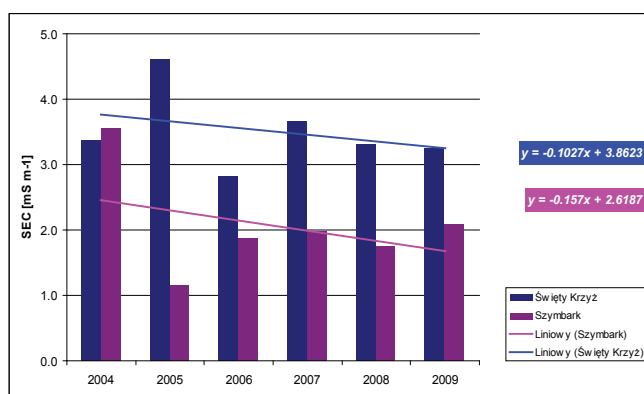
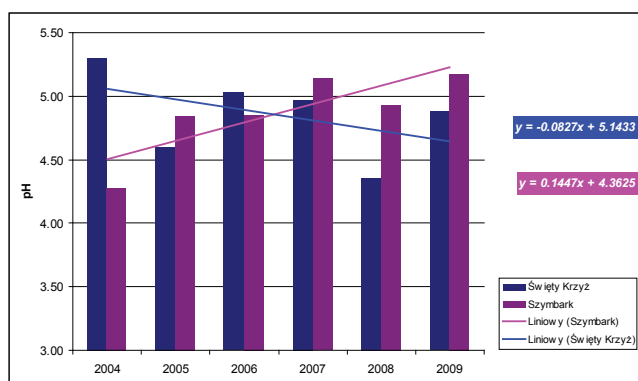
4. Wyniki badań

W latach 2004–2009 roczne sumy opadów atmosferycznych na Świętym Krzyżu wyniosły 573,8–835,0 mm, w Szymbarku zaś 862,8–998,3 mm; we wszystkich latach wyższe roczne wskaźniki opadu zanotowano w Szymbarku. Rozkład opadów w poszczególnych miesiącach na obydwu Stacjach wykazywał nieznaczne zróżnicowanie. Najwyższe średnie miesięczne sumy opadów przypadły na czerwiec w Szymbarku (135,1 mm) i na lipiec na Świętym Krzyżu (105,2 mm), natomiast najniższe wystąpiły w grudniu w Szymbarku (40,9 mm) i w lutym na Świętym Krzyżu (28,7 mm)



Ryc. 1. Lokalizacja obszarów badawczych
Fig. 1. Localisation of research areas

Analiza przeprowadzona na danych zebranych w ciągu 6 lat (2004–2009) w dwóch geosystemach górskich Polski wskazuje na zróżnicowanie sezonowe analizowanych parametrów: pH i przewodności elektrolitycznej właściwej. Średnia wieloletnia wartość pH jest identyczna na obydwu Stacjach i wynosi 4,76. Średnie przewodności elektrolitycznej wykazują duże zróżnicowanie i wynoszą 2,06 mS*m⁻¹ w Szymbarku i 3,51 mS*m⁻¹ na Świętym Krzyżu. Analiza zmian w wieloleciu wskazuje na występowanie wyraźnej i statystycznie istotnej tendencji wzrostowej pH w Szymbarku i znacznie słabszej, lecz spadkowej tendencji na Świętym Krzyżu (ryc. 2). W 2004 r. wystąpiła najwyższa średnia roczna SEC w Szymbarku, przewyższająca analogiczną wartość obliczoną na podstawie prób opadu na Świętym Krzyżu. Z kolei w roku następnym stwierdzono najwyższą wartość SEC w opadzie na Świętym Krzyżu i największą różnicę pomiędzy średnimi rocznymi na badanych Stacjach. Tendencje wartości rocznych na obydwu stacjach są spadkowe, o podobnych współczynnikach trendu, wynoszących 0,32 i 0,37 (statystycznie nieistotnych).

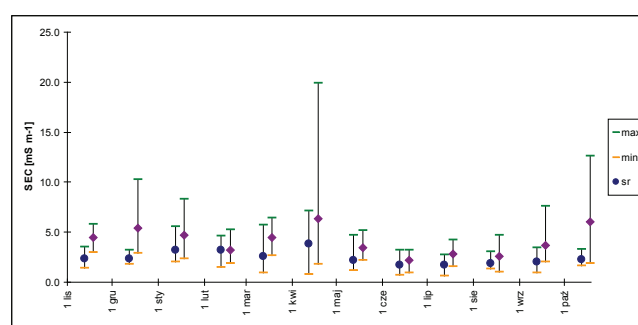
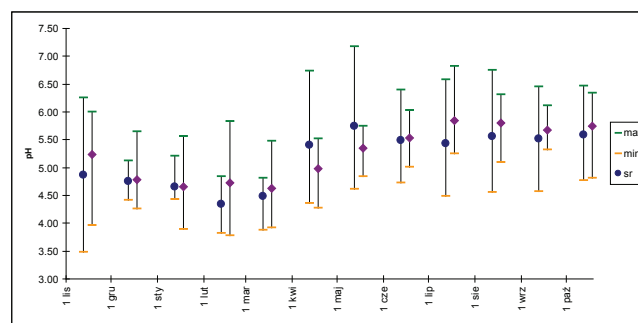


Ryc. 2. Średnie roczne pH i przewodność elektrolityczna właściwa (SEC) na Stacjach: Święty Krzyż i Szymbark w latach 2004–2009

Fig. 2. Annual mean pH and conductivity (SEC) values in the Święty Krzyż and Szymbark stations in 2004–2009

W poszczególnych miesiącach roku hydrologicznego, w większości przypadków, obserwuje się niższe pH w Szymbarku, z wyjątkiem kwietnia i maja (ryc. 3). Przewodność elektrolityczna właściwa charakteryzuje się wyższymi wartościami na Świętym Krzyżu we wszystkich miesiącach roku, a największe różnice średnich miesięcznych na obydwu Stacjach występują w grudniu i październiku (ryc. 3). Charakterystyczne są różnice w zakresie zmienności średnich miesięcznych SEC – w Szymbarku zróżnicowanie jest znacznie mniejsze niż na Świętym Krzyżu.

Na podstawie kryteriów Jansena i in. (1988) dokonano klasyfikacji pH i SEC zmierzonych w pobranych w próbach opadu (ryc. 4). Na obydwu stacjach przeważają opady o pH w klasie „normalne”, stwierdzone na Świętym Krzyżu podczas 39%, a w Szymbarku podczas 27% pomiarów; tylko w 2005 i 2006 r. w Szymbarku przeważały opady o pH w klasie „znacznie obniżony”, a w 2009 r. – w klasie „podwyższony”, natomiast na Świętym Krzyżu w 2009 r. przeważały opady w klasie „znacznie obniżony”. Na Stacji Święty Krzyż obserwuje się tendencję wzrostową liczby prób opadu w klasach „kwaśnych” (pH < 5,10) przy spadkowej tendencji w klasach „podwyższonych” (pH > 6,10). Na Stacji w Szymbarku obserwowane

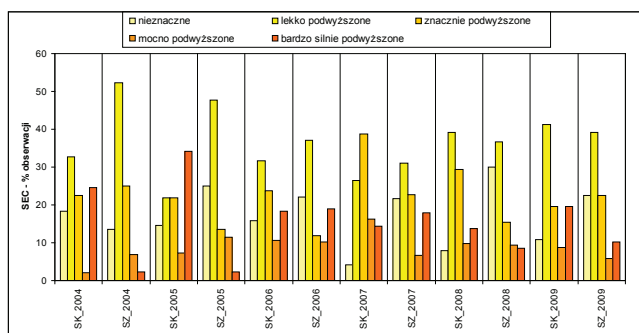
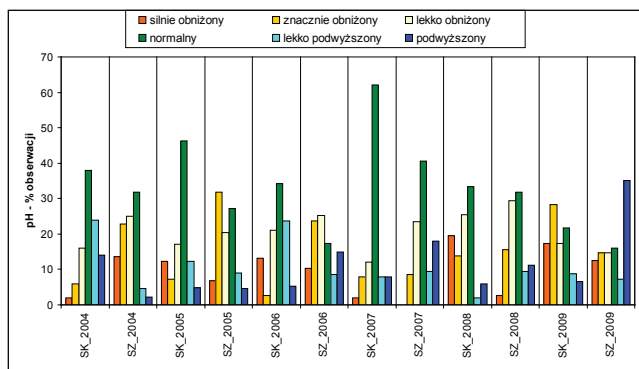


Ryc. 3. Zróżnicowanie średnich i ekstremalnych miesięcznych pH i przewodności elektrolitycznej właściwej na Stacjach: Święty Krzyż (znacznik fioletowy) i Szymbark (znacznik granatowy)

Fig. 3. The diversity of monthly mean and extreme values of pH and conductivity (SEC) in the Święty Krzyż (violet marker) and Szymbark (blue marker) stations

są tendencje odwrotne (tab. 1).

Na obydwu stacjach najwięcej pomierzonych prób przewodności elektrolitycznej właściwej (SEC) znalazło się w klasie „lekkopodwyższona”, stanowiących ogółem 32% na Świętym Krzyżu i 41% w Szymbarku. W Szym-



Ryc. 4. Częstość pH i SEC w poszczególnych przedziałach klasyfikacji Jansena i in. (1987) (na podstawie tygodniowych prób opadu; SK – Święty Krzyż, SZ – Szymbark)

Fig 4. The frequency of pH and SEC in the classes given by Jansen et al. [1987] (based on the weekly precipitation samples; SK – Święty Krzyż, SZ – Szymbark)

barku we wszystkich latach objętych analizą przeważały opady w tej klasie SEC, natomiast na Świętym Krzyżu w 2005 r. dominowały opady w klasie „bardzo silnie podwyższony” a w 2007 r. – w klasie „znacznie podwyższony”. Analiza tendencji udziałów opadów w poszczególnych klasach wskazuje na wyraźny wzrost w klasie „lekkopodwyższona” i obniżanie się w klasie „nieznaczna” i „bardzo silnie podwyższona” na Świętym Krzyżu. W Szymbarku obserwowane są odwrotne prawidłowości: wzrost udziału prób w klasie „nieznaczna” i obniżanie w klasie „lekkopodwyższona” (tab. 1).

Zbadano zależność SEC i koncentracji jonów H⁺ od wysokości opadu. Na podstawie przebiegu linii regresji widać wyraźnie wyższe wartości przewodności elektrolitycznej właściwej (SEC) w wodzie opadowej zebranej na Świętym Krzyżu niż przy tej samej sumie opadu w Szymbarku. Podobna prawidłowość obserwowana jest podczas analizy wpływu sumy opadu na koncentrację H⁺, świadcząca o większym zakwaszeniu wody opadowej na Stacji Święty Krzyż (ryc. 5).

Porównano także wpływ wysokości opadu na wartości tych parametrów w obydwu półroczach hydrologicznych: zimowym (XI–IV) i letnim (V–X) (tab. 2). Zależność SEC od wysokości opadu ma charakter logarytmiczny lub potęgowy, przy czym na Świętym Krzyżu obserwuje się „równoległy” przebieg obydwu krzywych i wyższe wartości SEC w półroczu zimowym niż w półroczu letnim dla analogicznej wysokości opadu. Współczynniki determinacji są względnie wysokie i istotne statystycznie (p < 0,05). W Szymbarku obserwowana jest względnie wyraźna zależność SEC od opadu w półroczu zimowym, natomiast dla półroczu letniego występuje duże rozproszenie punktów, niski współczynnik deter-

Tabela 1. Tendencje liczebności opadów w klasach Jansena na podstawie danych rocznych
Table 1. Number tendencies of precipitation in the classes by Jansen (based on annual data)

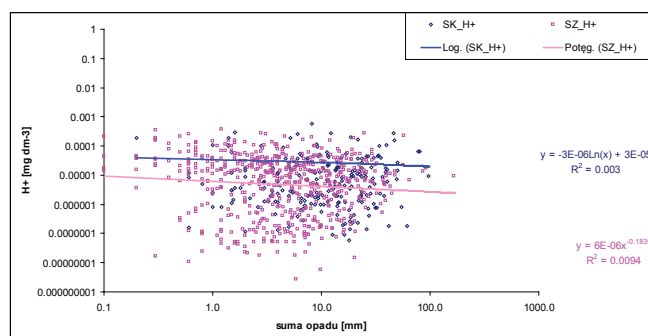
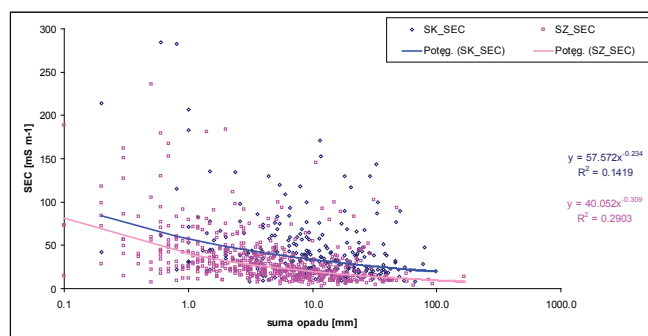
	Święty Krzyż		Szymbark	
	pH*	SEC**	pH*	SEC**
1	2,52x + 2,26	-1,98x + 18,89	-0,83x + 10,52	1,67x + 16,61
2	3,88x + 2,60	2,57x + 23,21	-2,99x + 29,93	-2,99x + 51,12
3	0,66x + 15,85	0,66x + 23,67	-0,77x + 25,73	0,10x + 18,15
4	-2,64x + 48,53	1,33x + 4,46	-1,19x + 31,66	-0,42x + 9,83
5	-3,51x + 25,38	-2,57x + 29,77	0,45x + 6,51	1,63x + 4,28
6	-0,90x + 10,59		5,33x - 4,35	

Objaśnienia/Explanation:

pH*: 1 – silnie obniżony, 2 – znacznie obniżony, 3 – lekko obniżony, 4 – normalny, 5 – lekko podwyższony, 6 – podwyższony
SEC**: 1 – nieznaczne, 2 – lekko podwyższone, 3 – znacznie podwyższone, 4 – mocno podwyższone, 5 – bardzo silnie podwyższone

pH*: 1 – much lower, 2 – considerably lower, 3 – somewhat lower, 4 – normal, 5 – somewhat higher, 6 – higher

SEC**: 1 – negligible, 2 – somewhat higher, 3 – considerably higher, 4 – much higher, 5 – very much higher



Ryc. 5. Zależność przewodności elektrolitycznej właściwej (SEC) i koncentracji H^+ od wysokości opadu

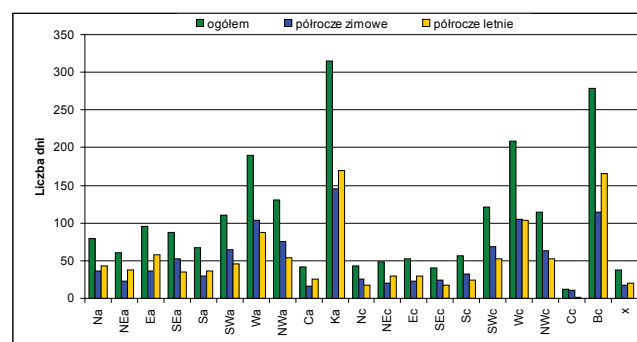
Fig. 5. The relationship between conductivity, H^+ concentration and precipitation amount

minacji, statystycznie nieistotny. Na przewodność elektrolityczną wody opadowej wpływają tu inne czynniki niż wysokość opadów: długość okresu poprzedzającego wystąpienie opadów, a przede wszystkim występowanie opadów orograficznych, tzw. komórek burzowych, które wytwarzają się we względnie krótkim okresie czasu, a chmury konwekcyjne wychwytyją zanieczyszczenia sięgające górnej granicy atmosfery. Zróżnicowanie sezonowe obserwowane jest również podczas wpływu wysokości opadu na stężenie jonów H^+ . Wyraźniej zróżnicowanie sezonowe obserwuje się w Szymbarku, gdzie w półroczu zimowym stężenie jonów wodorowych jest wyraźniej wyższe niż w półroczu letnim (tab. 2).

Na wielkość parametrów mierzonych w opadzie

Tabela 2. Typ regresji i współczynnik korelacji między wartościami SEC i koncentracją H^+ w opadzie a jego wysokością
Table 2. Regression type and correlation coefficient between the values of SEC, H^+ concentration and precipitation amount

		Święty Krzyż		Szymbark	
		H^+	SEC	H^+	SEC
rok	typ regresji	logarytm	potęga	potęga	potęga
	wsp. korelacji r	-0,05	-0,38	-0,10	-0,54
zima	typ regresji	potęga	logarytm	potęga	potęga
	wsp. korelacji r	0,12	-0,33	-0,14	-0,52
lato	typ regresji	potęga	logarytm	potęga	logarytm
	wsp. korelacji r	-0,08	-0,43	-0,13	-0,05



Ryc. 6. Liczebność typów cyrkulacji atmosferycznej na obszarach badawczych w latach 2004–2009

Fig. 6. The number of atmospheric circulation types in the research areas in 2004–2009

wpływ mają zanieczyszczenia zdalne, przynieszone z odległości 100–200 km przez ośrodki baryczne. Analizę kierunków napływu zanieczyszczeń oparto na typach cyrkulacji atmosferycznej i typach mas powietrza, określonych dla Polski południowo-wschodniej przez T. Niedźwiedzia. Autor wyróżnia 21 typów cyrkulacji atmosferycznej: 10 typów cyklonalnych (8 związanych

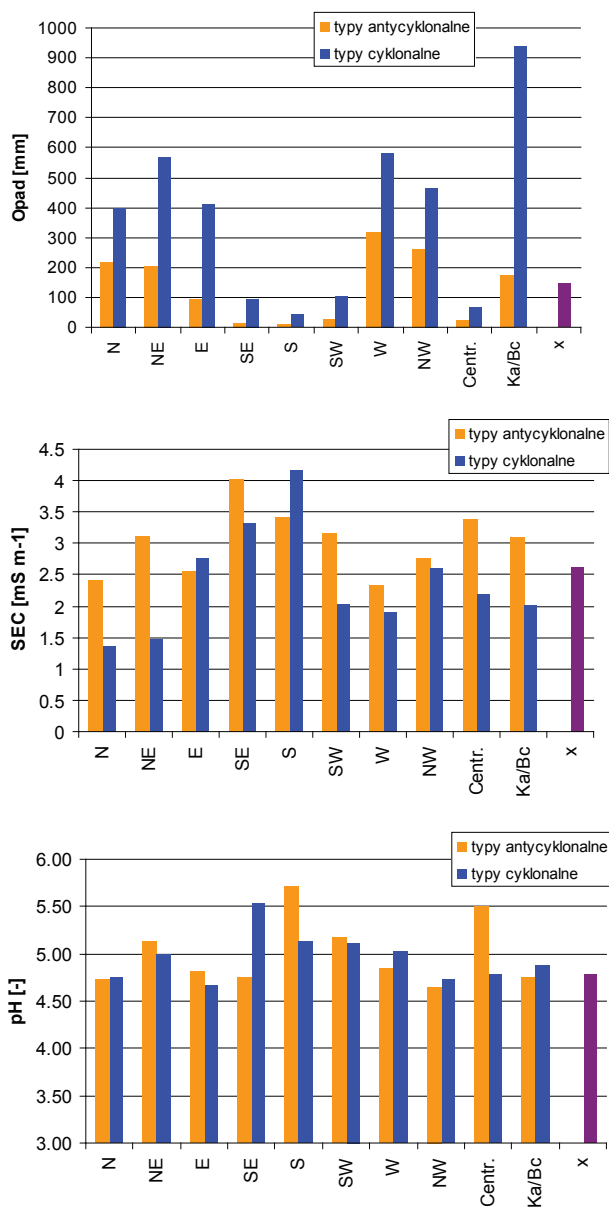
z kierunkami, centrum niżu [Cc] i bruzdę cyklonalną [Bc]), 10 typów antycyklonalnych (8 związanych z kierunkami, centrum wyżu [Ca] i klin antycyklonalny [Ka]) i typ „x” – trudny do określenia. Klasyfikacja typów cyrkulacji i rodzaju mas powietrza dotyczy Polski południowo-wschodniej, z ograniczeniem do obszaru $\phi = 49\text{--}51^\circ\text{N}$ i $\lambda = 18\text{--}24^\circ\text{E}$. Odległość między obszarami badawczymi wynosi ok. 136 km i obydwa spełniają kryterium lokalizacji wyznaczone przez autora klasyfikacji.

Największą liczebność dni stwierdzono dla sytuacji z klinem antycyklonalnym i bruzdą cyklonalną (ryc. 6). Biorąc pod uwagę frekwencję typów cyrkulacji według kierunków – zarówno dla typów antycyklonalnych, jak i cyklonalnych – dominację wykazuje sektor zachodni (SW–NW), z przeważającym udziałem kierunku zachodniego (W).

Dla każdego typu cyrkulacji atmosferycznej obliczo-

no wysokość opadu (jeśli wystąpił) oraz średnią wartość przewodności elektrolitycznej (SEC) i pH. Ze względu na zróżnicowaną rozdzielczość danych: tygodniową dla Stacji Święty Krzyż i dobową dla Stacji Szymbark, możliwe było wykonanie takiej analizy wyłącznie dla Stacji w Szymbarku, zakładając niezmienność typu cyrkulacji w ciągu doby.

Występowanie opadów atmosferycznych jest w głównej mierze związane z cyklonalnymi typami cyrkulacji, podczas których dostarczonych zostało 74% łącznej sumy opadów. Przeważają opady podczas wy-



Ryc. 7. Wysokość opadów oraz średnia pH i SEC wody opadowej podczas występowania różnych typów cyrkulacji atmosferycznej

Fig. 7. Precipitation amount, mean pH and SEC values during the occurrence of different atmospheric circulation types

stępowania bruzdy cyklonalnej – ok. 940 mm (ryc. 7).

Odczyn wody opadowej wykazuje zróżnicowanie uzależnione od kierunku i charakteru typu cyrkulacji (antycyklonalny lub cyklonalny). Najwyższe wartości pH, przekraczające 5,50, występują przy typach: Sa, SEc i Ca. Można tutaj wnioskować na temat występowania zanieczyszczeń pyłowych związanych z niską częstotliwością i wysokością opadów podczas tych typów cyrkulacji. Ponadto przy takich sytuacjach barycznych opady są względnie niskie, co skutkuje wysokim „zateżeniem” wody opadowej. Przewodność elektrolityczna właściwa (SEC) wykazuje w większości przypadków wyraźnie wyższe wartości podczas występowania sytuacji antycyklonalnych, co jest związane z niższymi sumami opadów, które im towarzyszą. Najniższe wartości przewodności w opadzie (1,4–1,5 mS*m⁻¹) występują przy typach cyklonalnych z kierunków N i NE, które na ogół towarzyszą wydajnym opadom, związanym głównie z oceanicznymi masami powietrza. Z kolei wartości najwyższe, przekraczające 4 mS*m⁻¹, występują przy typach cyrkulacji z sektora południowego: SEa i Sc.

Na podstawie liczebności poszczególnych typów cyrkulacji i średnich wartości pH i SEC w miesiącach obliczono równania regresji, wskazujące na wpływ częstości sytuacji na wielkość omawianych parametrów fizykochemicznych wód opadowych. Analiza została przeprowadzona dla wyników z wszystkich miesięcy oraz z podziałem na półrocza hydrologiczne (tab. 3).

Na stężenie H⁺ w Szymbarku wyraźny dodatni wpływ mają typy cyrkulacji SEa, SWa i Sc oraz ujemny wpływ typu cyrkulacji Ka i Bc, natomiast na Świętym Krzyżu dodatni wpływ wywiera cyrkulacja Wa, natomiast ujemny – Ca, Ka i Sc. Taki sam typ cyrkulacji może odmiennie wpływać na koncentrację jonów H⁺ w półroczu zimowym i letnim. Tak odmienny wpływ zaobserwować można głównie w Szymbarku przy typach cyrkulacji Ea, SEa, SA i Nwa, co może świadczyć o tym, że przez część roku występowanie danej sytuacji barycznej powoduje zakwaszenie, a przez pozostałą część – alkalizację wody opadowej. Na Świętym Krzyżu nie występują tak duże dysproporcje między półroczami hydrologicznymi, chociaż obserwowane są w czasie występowania typów antycyklonalnych SWa i Wa. Zdecydowanie najbardziej wyraźny wpływ na wzrost stężenia jonów wodorowych w półroczu letnim wywiera występowanie sytuacji centrum niżu (Cc), świadczące o oddziaływaniu lokalnych źródeł zanieczyszczeń. Odwrotne oddziaływanie na koncentrację H⁺ w wodzie opadowej występuje przy sytuacjach Ca, Ka i Sc, co potwierdza prawidłowość stwierdzoną wcześniej.

Przewodność elektrolityczna właściwa (SEC) zmierzona w opadzie pobieranym w Szymbarku wykazuje

Tabela 3. Korelacja pH i SEC wody opadowej z liczebnością typów cyrkulacji (na podstawie danych miesięcznych)
 Table 3. The correlation between precipitation pH, SEC and the number of a given circulation type (based on monthly data)

		Święty Krzyż		Szymbark	
		pH	SEC	pH	SEC
Na	rok	0,068	-0,027	0,042	0,193
	zima	0,165	-0,008	0,071	0,440
	lato	0,165	-0,032	0,184	0,114
NEa	rok	-0,102	-0,046	-0,116	-0,023
	zima	-0,002	-0,007	-0,125	0,285
	lato	-0,211	-0,001	0,250	-0,136
Ea	rok	-0,170	-0,115	0,073	0,051
	zima	-0,146	-0,136	0,292	0,395
	lato	-0,022	-0,018	-0,072	-0,047
SEa	rok	0,081	0,052	0,240	0,024
	zima	0,055	-0,327	0,368	0,060
	lato	-0,079	0,443	-0,215	-0,138
Sa	rok	-0,076	-0,020	0,136	0,026
	zima	-0,051	-0,223	0,300	0,264
	lato	-0,123	0,275	-0,177	-0,150
SWa	rok	0,136	0,157	0,247	0,080
	zima	0,109	0,057	0,254	0,000
	lato	-0,109	0,246	0,186	0,037
Wa	rok	0,205	0,133	0,115	0,061
	zima	0,221	0,094	0,110	-0,054
	lato	-0,120	0,166	-0,075	0,179
NWa	rok	0,105	0,029	-0,024	0,155
	zima	0,031	-0,016	-0,156	-0,013
	lato	0,098	0,002	0,209	0,236
Ca	rok	-0,216	0,058	-0,059	-0,011
	zima	-0,252	0,281	-0,001	0,040
	lato	-0,153	-0,087	0,018	0,107
Ka	rok	-0,243	0,183	-0,178	-0,077
	zima	-0,294	0,240	-0,207	-0,042
	lato	-0,035	0,141	0,018	-0,058
Nc	rok	0,047	-0,207	0,153	0,106
	zima	-0,035	-0,183	0,126	0,179
	lato	0,239	-0,390	0,041	-0,232
NEc	rok	-0,034	-0,052	-0,136	-0,249
	zima	0,050	0,203	-0,153	-0,105
	lato	0,033	-0,236	-0,085	-0,331
Ec	rok	0,049	0,087	-0,017	-0,181
	zima	0,148	0,441	0,048	-0,186
	lato	0,192	-0,208	-0,096	-0,149

SEc	rok	-0,064	-0,105	-0,006	0,074
	zima	-0,140	-0,111	-0,048	0,063
	lato	-0,006	-0,142	0,031	0,033
Sc	rok	-0,198	-0,026	0,292	0,172
	zima	-0,338	-0,226	0,371	0,102
	lato	-0,124	0,263	-0,086	0,220
SWc	rok	0,088	0,112	-0,125	0,089
	zima	0,062	0,013	-0,246	0,081
	lato	-0,125	0,196	-0,120	-0,015
Wc	rok	-0,019	-0,097	-0,112	-0,044
	zima	-0,033	-0,147	-0,177	-0,112
	lato	0,009	-0,031	0,064	0,032
NWc	rok	0,133	-0,137	-0,099	-0,137
	zima	0,157	-0,091	-0,186	-0,391
	lato	-0,136	-0,263	-0,027	0,088
Cc	rok	0,167	0,149	0,102	0,100
	zima	-0,001	0,134	-0,025	-0,154
	lato	0,555	-0,120	-0,113	0,279
Bc	rok	-0,075	-0,163	-0,173	-0,227
	zima	0,093	0,074	-0,094	-0,178
	lato	0,214	-0,354	0,001	-0,007
x	rok	-0,094	-0,033	-0,128	-0,021
	zima	-0,159	0,017	-0,152	-0,100
	lato	0,442	-0,085	-0,156	0,118

Pogrubiona czcionka – współczynniki korelacji statystycznie istotne ($p < 0,05$)

Statistically significant correlation coefficients ($p < 0,05$) given in bold

istotny ujemny wpływ tylko przy typach cyrkulacji NEc i Bc, i dodatni – przy występowaniu typu Na. W półroczu zimowym występuje najwyższa zależność między antycyklonalnymi typami cyrkulacji z kierunków N, NE i E a wartością SEC, natomiast wyraźny ujemny wpływ na SEC wywiera typ NWc. W półroczu letnim jedyny statystycznie istotny związek EC – typ cyrkulacji występuje podczas typu Cc. Na Świętym Krzyżu obserwowana jest duża sezonowa zmienność SEC, która może być wynikiem zróżnicowania intensywności procesów produkcyjnych w zakładach cementowo-wapienniczych na obszarze tzw. Białego Zagłębia (przy typie cyrkulacji SEa, Sa) lub intensywnego spalania paliw w okresie grzewczym (Ec).

Na parametry fizykochemiczne wody opadowej wywierają wpływ masy powietrza. Miejsce wytworzenia się masy powietrza, kierunek jej przepływu i długość okresu utrzymywania się nad danym obszarem, pozwala określać wydajność, intensywność i częstotliwość opa-

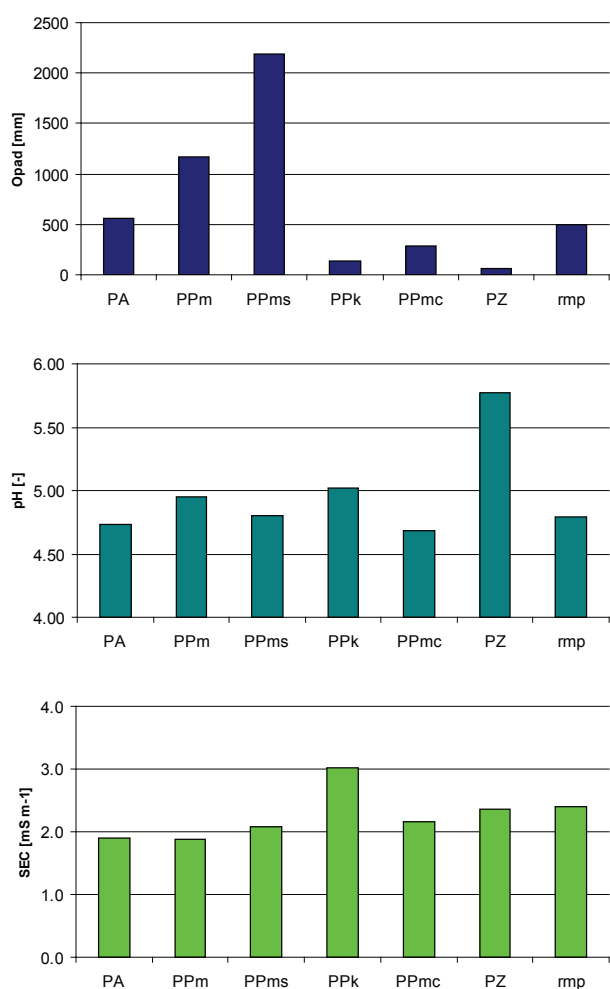
dów. Cechy te w dużym stopniu wywierają znaczący wpływ na właściwości chemiczne wody.

Niedźwiedź (1981) wyróżnia 7 rodzajów mas powietrza: arktyczne (PA), polarne morskie (PPm), polarne morskie stare (PPms), polarne morskie ciepłe (Ppm), polarne kontynentalne (PPk), zwrotnikowe (PZ) oraz różne masy powietrza (rmp), przy bardzo dynamicznym i trudnym dla jednoznacznej interpretacji układzie ośrodków barycznych. Podobnie, jak wcześniej, obliczono średnie wartości pH i przewodności elektrolitycznej właściwej (SEC) wody opadowej w czasie występowania różnych mas powietrza. Posłużono się dobowymi sumami opadów, zbieranymi na Stacji w Szymbarku.

Najwyższą sumę opadów za 6-letni okres analizy zaobserwowano podczas występowania mas polarno-morskich starych (PPms) – ponad 44% sumy (ryc. 8). Są to mocno rozbudowane nad Atlantykiem ośrodki niskiego ciśnienia, zasobne w wilgoć, przemieszczające się nad kontynent europejski, skutkując wysokimi opadami głę-

boko nad lądem. Najwyższą wartość odczynu – 5,77 – zaobserwowano w wodach opadowych, które towarzyszyły występowaniu masy powietrza zwrotnikowego (PZ) (ryc. 8). Na ogół jest to powietrze ciepłe i suche, a opady mogą mieć charakter konwekcyjny, na styku mas suchych i gorących z chłodnymi i wilgotnymi. Czasem masy zwrotnikowe przynoszą ziarna pyłu z południa Afryki, co sporadycznie skutkuje „zabrudzeniem” wody opadowej i jej zasadowym odczynem. Przy pozostałych rodzajach mas powietrza odczyn jest lekko kwaśny ($4,60 < \text{pH} < 5,10$ wg klasyfikacji Jansena [1988]) i wykazuje nieznaczne zróżnicowanie, mieszczące się w granicach 4,68–5,02.

Najwyższa średnia SEC, $3,0 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ występuje przy masach powietrza polarnego kontynentalnego (PPk), związanego ze stacjonarnymi ośrodkami wysokiego ciśnienia nad wschodnią Europą, które przynoszą zanieczyszczenia z obszaru Ukrainy i Półwyspu Bałkań-



Ryc. 8. Wysokość opadów oraz średnia pH i SEC wody opadowej podczas występowania różnych rodzajów mas powietrza
Fig. 8. Precipitation amount, mean pH and SEC values during the occurrence of different types of air masses

skiego. Stosunkowo niską średnią SEC obserwuje się przy względnie niskich opadach towarzyszących masom arktycznym (PA), które kształtują się w obszarach wysokich szerokości geograficznych północnej Europy, na obszarach o znikomym zanieczyszczeniu atmosfery.

Dla wyróżnionych przez T. Niedźwiedzia siedmiu rodzajach mas powietrza obliczono zależności stężenia jonów H^+ i przewodności elektrolitycznej właściwej (SEC), i liczebności dni z danym rodzajem masy powietrza (tab. 4). W Szymbarku zaobserwowano statystycznie istotną dodatnią zależność H^+ w wodzie opadowej przy występowaniu mas polarnych morskich ciepłych (PPmc) i ujemną przy masach polarnych morskich (PPm), natomiast na Świętym Krzyżu istotna statystycznie dodatnia zależność z H^+ wystąpiła w opadach podczas występowania mas arktycznych (PA) i ujemna, gdy opady towarzyszyły masom zwrotnikowym (PZ). W Szymbarku najbardziej wyraźna dodatnia zależność między rodzajem masy powietrza a SEC dotyczyła mas arktycznych (PA), a zależność ujemna – mas polarnych morskich (PPm) i zwrotnikowych (PZ).

Na Stacji Święty Krzyż obserwuje się wysoką dodatnią korelację między SEC a frekwencją mas polarnych morskich ciepłych (PPmc) i ujemną – w czasie oddziaływania różnych mas powietrza (mp). Frekwencja mas polarnych morskich (PPm) wykazuje ujemny związek z wielkością analizowanych parametrów, gdyż masy te są wilgotne i wywołują intensywne opady. Jednakże w wyniku dłuższego okresu stagnacji nad kontynentem przechwytywane zanieczyszczenia atmosferyczne, a opad przez nie dostarczany jest „zasobny” w rozpuszczone jony.

5. Przegląd wybranej literatury i dyskusja wyników

Publikacje dotyczące czasowej zmienności pH i przewodności elektrolitycznej wody opadowej są bardzo liczne, również w Polsce. Warto tu wspomnieć wybrane publikacje dotyczące tego zagadnienia, przygotowane na podstawie badań w Wielkopolskim Parku Narodowym (Walna, Siepak 1995; Walna, Siepak 1999), w Sudetach (Dore et al. 1999), w Ojcowskim Parku Narodowym (Leśniok 2009). Dla wyników pomiarów zanieczyszczeń opadów atmosferycznych autorzy niniejszego opracowania przygotowali i opublikowali wcześniej kilka prac. Do najważniejszych zaliczyć należy publikacje: Kowalkowskiego et al. (2003), Józwiaka (2001), Kozłowskiego (2011) i Bochenka (2008).

W Polsce przynajmniej kilku autorów dokonywało klasyfikacji typów cyrkulacji atmosferycznej. Najbardziej znanymi są klasyfikacje Lityńskiego (1969) i Osuchowskiej-Klein (1992), sporządzone dla obszaru całej Polski.

Tabela 4. Korelacja pH i SEC wody opadowej z liczebnością mas powietrza (na podstawie danych miesięcznych)

Table 4. The correlation between precipitation pH, SEC and the number of a given air mass type (based on monthly data)

		Święty Krzyż		Szymbark	
		pH	SEC	pH	SEC
PA	rok	0,273	-0,080	0,097	0,338
	zima	0,123	-0,193	-0,064	0,148
	lato	0,529	-0,136	0,131	0,345
PPm	rok	-0,132	-0,146	-0,211	-0,328
	zima	0,126	0,013	-0,161	-0,421
	lato	-0,111	-0,147	0,037	-0,025
PPms	rok	0,171	0,176	-0,009	0,058
	zima	0,062	0,360	-0,205	-0,080
	lato	0,096	-0,252	0,295	-0,073
PPk	rok	-0,100	-0,005	0,037	0,046
	zima	-0,105	-0,182	0,125	0,294
	lato	-0,154	0,255	-0,187	-0,171
PPmc	rok	-0,096	0,224	0,269	0,086
	zima	-0,258	0,102	0,316	-0,004
	lato	0,016	0,346	-0,018	0,049
PZ	rok	-0,247	0,012	-0,084	-0,261
	zima	-0,191	0,037	0,192	-0,160
	lato	-0,139	0,164	-0,234	-0,110
rmp	rok	0,116	-0,225	-0,015	0,021
	zima	0,102	-0,218	-0,066	-0,146
	lato	0,457	-0,302	-0,060	0,113

Pogrubiona czcionka – współczynniki korelacji statystycznie istotne ($p < 0,05$)Statistically significant correlation coefficients ($p < 0,05$) given in bold

Klasyfikacją regionalną, dla dorzecza górnej Wisły, jest klasyfikacja Niedźwiedzia (1981), obejmująca codzienną interpretację sytuacji synoptycznych od 1873 r. po dzień dzisiejszy (2011). Klasyfikacja ta była podstawą licznych analiz wpływu typów cyrkulacji i mas powietrza na temperaturę powietrza na Wyżynie Krakowsko-Częstochowskiej (Skowera, Wojkowski 2009), pH i przewodność elektrolityczną opadów na Pogórze Wielickim (Chełmicki, Klimek 1995). Analizy przeprowadzone przez ostatnich autorów i zaobserwowane przez nich prawidłowości, dotyczące zanieczyszczeń wody opadowej, są w dużym stopniu zgodne z wynikami analizy przedstawionymi w niniejszym opracowaniu. Bliskość obydwu obszarów badawczych pozwala zauważyć podobny przebieg kierunków napływu zanieczyszczeń. Dynamika przewodności elektrolitycznej właściwej, przy zróżnicowanym oddziaływaniu typów cyrkulacji i mas powietrza na granicy Beskidu Niskiego i Dołów Jasielsko-Sanockich w latach 1995–2004, została opracowana przez jednego z autorów

tego artykułu (Bochenek 2005).

Metoda polegająca na próbie powiązania wpływu cyrkulacji atmosferycznej z właściwościami fizykochemicznymi wody opadowej spotkała się z zainteresowaniem licznych badaczy na świecie. Thi Kim Oanh i Leelasakultum (2011) wskazują wpływ na koncentrację pyłu zawieszonego w powietrzu pięciu typowych układów ośrodków barycznych występujących na pograniczu Chin i Tajlandii. Sanchez-CCoyllo i de Fatima Andrade (2002) analizowali wpływ mas powietrza – i występujących pomiędzy nimi frontów atmosferycznych – na koncentracje jonów i pyłu w powietrzu w aglomeracji miejskiej Sao Paulo. Na podstawie pomiarów podstawowych parametrów fizykochemicznych opadów i czterech typów cyrkulacji w środkowej części USA (stacje Niwot i Sugarloaf) obliczono średnie wartości pH i SEC (Losleben et al. 2000). Porównywanie dla potrzeb niniejszego artykułu wpływu cyrkulacji mas powietrza w zupełnie innych warunkach

klimatycznych, na innych kontynentach, jest błędne. W Europie, gdzie niektóre (głównie antycyklonalne) ośrodki baryczne i masy powietrza są rozległe, wspólne dla dużych obszarów, można doszukiwać się analogii przy genezie zanieczyszczeń w obecnych opadach. Analiza wpływu cyrkulacji atmosferycznej na podstawowe parametry fizykochemiczne wody opadowej, przeprowadzona dla obszaru Katalonii (NE Hiszpania) i płynące z niej wnioski, są w dużym stopniu zbieżne z wnioskami autorów niniejszego opracowania. Autorki (Avila i Alarcon 1999) stwierdzają wysokie wartości pH przy napływie powietrza zwrotnikowego znad obszaru Afryki i względnie wysokie zakwaszenie opadu przy napływie powietrza znad Atlantyku.

6. Podsumowanie

Równania regresji obliczone na podstawie liczebności poszczególnych typów cyrkulacji i średnich wartości pH i SEC w miesiącach w latach 2004–2009 wskazują na wpływ częstości sytuacji na wielkość omawianych parametrów fizykochemicznych wód opadowych. Na stężenie H⁺ w opadach w Szymbarku wyraźny dodatni wpływ mają typy cyrkulacji SEa, SWa i Sc, natomiast ujemny – typy cyrkulacji Ka i Bc, natomiast na Świętym Krzyżu dodatni wpływ wywiera cyrkulacja Wa, a ujemny – Ca, Ka i Sc. Taki sam typ cyrkulacji może odmiennie wpływać na koncentrację jonów H⁺ w półroczu zimowym i letnim.

Przewodność elektrolityczna właściwa (SEC) zmierzona w opadzie pobieranym w Szymbarku wykazuje istotny ujemny wpływ tylko przy typach cyrkulacji NEC i Bc, a dodatni przy występowaniu typu Na. Na Świętym Krzyżu obserwowana jest duża sezonowa zmienność SEC, która może być wynikiem zróżnicowania intensywności procesów produkcyjnych w zakładach cementowo-wapienniczych na obszarze tzw. Białego Zagłębia (przy typie cyrkulacji SEa, Sa) lub intensywnego spalania paliw w okresie grzewczym (Ec).

Najbardziej wyraźna, dodatnia zależność między rodzajem masy powietrza a SEC w Szymbarku dotyczyła mas arktycznych (PA), a zależność ujemna – mas polarnych morskich (PPm) i zwrotnikowych (PZ).

Na stacji Święty Krzyż obserwuje się wysoką dodatnią korelację pomiędzy SEC a frekwencją mas polarnych morskich ciepłych (PPmc) i ujemną – w czasie oddziaływania różnych mas powietrza (rmp).

Analiza zmienności czasowej oraz wpływu typów cyrkulacji i rodzaju mas powietrza na pH i przewodności elektrolitycznej wody opadowej (SEC) na dwóch stacjach pomiarowych: Święty Krzyż i Szymbark w latach 2004–2009 wskazuje na występowanie tendencji

czasowych zgodnych lub przeciwnych sobie. Położone stosunkowo blisko siebie stacje podlegają oddziaływaniu źródeł emisji o różnym charakterze co do kierunku napływu zanieczyszczeń, jak i odległości emiterów. Na zanieczyszczenie powietrza w Szymbarku większy wpływ miały lokalne źródła związane z bytową działalnością człowieka (paleniska domowe) niż ze źródła zdalnych, emiterów przemysłowych położonych na obszarze Słowacji. Na Świętym Krzyżu na wielkość podstawowych parametrów fizykochemicznych opadów miały wpływ kumulatywne zanieczyszczenia znad aglomeracji górnośląskiej oraz z północnej części Czech (Zagłębie Karwińsko-Ostrawskie).

7. Literatura

- Avila A., Alarcon M., 1999:** Relationship between precipitation chemistry and meteorological situations at a rural site in NE Spain. *Atmospheric Environment*, 33: 1663–1677.
- Bochenek W., 2005:** Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na przewodność elektrolityczną właściwą roztworów wody opadowej w zlewni Bystrzanki w latach 1995–2004. *Monitoring Środowiska Przyrodniczego*, 6: 49–58.
- Bochenek W., 2008:** Wpływ wielkości opadów i temperatury powietrza na pH i przewodność elektrolityczną wody opadowej. *Przegląd Geograficzny*, 80(3): 403–419.
- Chelmicki W., Klimek M., 1995:** Związek między sytuacjami synoptycznymi a pH opadów atmosferycznych w Łazach na Pogórzu Wielickim. [w:] *Struktura i funkcjonowanie środowiska przyrodniczego progu Karpat*. L. Kaszowski (red.), *Prace Geograficzne UJ*, z. 100.
- Dore A.J., Sobik M., Migala K., 1999:** Patterns of precipitation and pollutant deposition in the western Sudete mountains, Poland. *Atmospheric Environment*, 33(20): 3301–3312.
- Jansen W., Block A., Knaack J., 1988:** Acid rain. History, generation, results, *Aura*, 4: 18 (In Polish).
- Józwiak M., 2001:** Functioning of the selected geocosystem in the Holy Cross Mts. under acid immision (Central Poland), *Przegląd Geologiczny*, 49(9), 775 (In Polish).
- Kowalkowski A., Józwiak M., Kozłowski R., 2002:** Acidification of precipitation and soil in the Świętokrzyski National Park, DBG, *Mitteilungen*, Band 98, 49 (In German).
- Kozłowski R., Józwiak M., Józwiak M.A., Ratajczyk A., 2011:** Chemism of atmospheric precipitation as a consequence of air pollution: the case of the Holy

- Cross Mountains in southwestern Poland. Polish J. of Environ. Stud., 20(4): 919–924.
- Leśniok M., 2009:** Zanieczyszczenie powietrza i opadów atmosferycznych na obszarze Ojcowskiego Parku Narodowego. Prądnik, 19: 109–118.
- Lityński J., 1969:** Liczbowa klasyfikacja typów cyrkulacji i typów pogody dla Polski. Prace PIHM, 97: 3–15.
- Losleben M., Pepin N., Pedrick S., 2000:** Relationships of precipitation chemistry, atmospheric circulation, and elevation at two sites on the Colorado front range. Atmospheric Environment, 34: 1723–1737.
- Niedźwiedz T. 1981:** Sytuacje synoptyczne i ich wpływ na zróżnicowanie przestrzenne wybranych elementów klimatu dorzecza górnej Wisły. Rozp. hab. UJ, 58: 1–165.
- Niedźwiedz T., 2011:** Kalendarz typów cyrkulacji atmosfery dla Polski Południowej – zbiór komputerowy, Uniwersytet Śląski, Katedra Klimatologii, Sosnowiec.
- Osuchowska-Klein B., 1992:** Związek między temperaturą a cyrkulacją atmosferyczną. Mat. Bad. IMGW, Seria Meteorologia, 17: 1–156.
- Sanchez-Ccoyllo O.R., de Fatima Andrade M., 2002:** The influence of meteorological conditions on the behavior of pollutants concentrations in Sao Paolo, Brazil. Environmental Pollution, 116: 257–263.
- Skowera B., Wojkowski J., 2009:** Wpływ sytuacji synoptycznych na temperaturę powietrza w południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 5: 123–135.
- Thi Kim Oanh N., Leelasakultum K., 2011:** Analysis of meteorology and emission in haze episode prevalence over mountain-bounded region for early warning. Science of the Total Environment, 409: 2261–2271.
- Walna B., Siepak J., 1995:** Chemizm wód opadowych w Stacji Ekologicznej UAM w Jeziorach w Wielkopolskim Parku Narodowym. Ekologia i Technika, 6/18: 24–29.
- Walna B., Siepak J., 1999:** Research on the variability of physico-chemical parameters characterising acid precipitation at the Jezioro Ecological Station in the Wielkopolski National Park (Poland). The Science of Total Environment, 239: 173–187.

THE IMPACT OF ATMOSPHERIC CIRCULATION ON THE TRANSPORT AND WET DEPOSITION OF POLLUTANTS IN LOW MOUNTAINS AND FOOTHILLS OF CENTRAL EUROPE

Summary

Air pollutants can be emitted from local, mainly domestic sources, or transported from industrial sites located 100–200 km away. The type of atmospheric circulation and air masses plays a significant role in the second case. It is a decisive factor affecting the amount of precipitation and the volume of gases and particulates deposited in a given area. This article provides the first attempt to compare the pH and conductivity (SEC) results from two monitoring stations within a distance of 136 km; however, exposed to pollution from different sources. The central aim of the paper is to determine the impact of the type of atmospheric circulation and air masses on precipitation amount, pH and conductivity. The research was conducted in 2004–2009 in the two base stations of the Integrated Monitoring of the Natural Environment network: Święty Krzyż in the central part of the Świętokrzyskie Mountains and Szymbark in the Low Beskid. Regression models based on the number of particular circulation types and monthly mean pH and SEC values indicate the influence of the frequency of synoptic situations on precipitation physicochemical parameters. In Szymbark there was a positive relationship between the concentration of H⁺ and south-easterly anticyclonic (SEa), south-westerly anticyclonic (SWa) and southerly cyclonic (Sc) situations and a negative one with anticyclonic wedge or ridge of high pressure (Ka) and through of low pressure (Bc) situations. The values of the parameter at the Święty Krzyż station were positively affected by westerly anticyclonic (Wa) circulation and negatively by central anticyclone (Ca), as well as Ka and Sc situations. The same circulation type induced the concentration of H⁺ in a different manner during winter and summer half-year. Conductivity measured in Szymbark was significantly negatively related only to north-easterly anticyclonic (NEc) and Bc circulation types and positively – to northerly anticyclonic (Na) situation. The same parameter showed a strong seasonal variability in Święty Krzyż. It might have resulted from varying intensity of production processes in the cement plants located in the area of “Białe Zagłębie” (White District) in the SEa and southerly anticyclonic (Sa) synoptic situations, or heightened fuel combustion

in winter (easterly cyclonic – Ec circulation). In Szymbark the most distinctive positive relationship was noted between SEC and the arctic air masses (PA), while a negative one – with maritime polar (PPm) and tropical (PZ) masses. A strong positive correlation was registered between SEC and the frequency of warm maritime polar masses (PPmc) at the Święty Krzyż station, where a negative trend was observed during the prevalence of various air masses (rmp). The analysis of temporal variability and the impact of different types of circulation and air masses on precipitation pH and SEC indicates that there are both congruent as well as contradictory tendencies at the two monitoring stations. Relatively nearby localities are under the influence of different emission sources in terms of direction and distance to the source. Local domestic sources are more important than remote industrial sites situated in Slovakia for the air quality in Szymbark. Physicochemical parameters of precipitation in Święty Krzyż were affected mainly by the cumulated pollution from Upper Silesia and northern part of the Czech Republic (Ostrava-Karviná Coal Basin).