

PRACE GEOGRAFICZNE

zeszyt 174, 2024, 35–57

doi: 10.4467/20833113PG.24.002.20675

Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ

Komisja Geograficzna, Polska Akademia Umiejętności

Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego

WPŁYW CZYNNIKÓW ANTROPOGENICZNYCH NA ZACHMURZENIE (NA PRZYKŁADZIE KRAKOWA)

Arkadiusz Duda, Dorota Matuszko

The impact of anthropogenic factors on cloud cover (a case study of Krakow)

Abstract: The study compares selected characteristics of cloud cover occurring over the centre of Kraków (urban station – Botanical Garden) and in rural areas (Kraków-Balice station) to demonstrate the impact of anthropogenic factors on cloud cover. Additionally, this aim was achieved by analysing the occurrence of specific clouds related to human activity (*homogenitus*), which form over the chimneys of power plants and industrial facilities or are associated with air traffic. Nephological data from two weather stations were used: one located in the Botanical Garden, belonging to the Department of Climatology, Institute of Geography and Spatial Management of the Jagiellonian University (IGiGP UJ), and the other situated at the Kraków Airport in Balice, belonging to the Institute of Meteorology and Water Management - National Research Institute (IMGW-PIB). The results indicate diverse interactions between the city and cloud cover. On one hand, there is less cloud cover compared to rural areas, especially during the cooler half of the year. On the other hand, during the summer months around midday, urbanized areas exhibit greater cloud cover, particularly from convective clouds. The analysis of specific clouds forming near industrial plants and combined heat and power plants indicates a lowering of cloud bases and an increase in cloudiness due to human activity. Moreover, the location of the airport near the city and the intensity of air traffic are related to the increasingly observed contrails, which under favourable conditions transform into special clouds.

Keywords: cloudiness, cloud genera, cloud types, special clouds

Zarys treści: W pracy dokonano porównania wybranych charakterystyk zachmurzenia występującego nad centrum Krakowa (stacja miejska – Ogród Botaniczny) i w terenie pozamiejskim (stacja Kraków-Balice) w celu wykazania wpływu czynników antropogenicznych na zachmurzenie. Dodatkowo cel ten realizowano, analizując występowanie chmur szczególnych związanych z działalnością człowieka (*homogenitus*), które tworzą się nad kominami elektrowni i zakładów przemysłowych lub związane są z ruchem lotniczym. Wykorzystano dane nefologiczne ze stacji naukowej Zakładu Klimatologii IGiGP UJ w Ogrodzie Botanicznym i ze stacji Lotniskowego Biura Meteorologicznego IMGW-PIB w Krakowie-Balicach. Wyniki badań wskazują na różnorodne oddziaływanie miasta na zachmurzenie. Z jednej strony obserwuje się mniejsze pokrycie nieba chmurami w porównaniu z terenami pozamiejskimi, szczególnie w chłodnej połowie roku. Z drugiej strony w okresie letnim w godzinach okołopołudniowych obszary zurbanizowane odznaczają się większym zachmurzeniem, szczególnie przez chmury konwekcyjne. Analiza chmur szczególnych tworzących się w pobliżu zakładów przemysłowych i elektrociepłowni wskazuje na obniżanie podstawy chmur oraz wzrost zachmurzenia w wyniku działalności człowieka, natomiast położenie lotniska w pobliżu miasta oraz natężenie ruchu lotniczego mają związek z coraz częściej obserwowanymi smugami kondensacyjnymi, które w sprzyjających warunkach przekształcają się w chmury szczególne.

Słowa kluczowe: zachmurzenie, rodzaje chmur, grupy chmur, chmury szczególne

Wprowadzenie

Chmury są jednym z najważniejszych elementów pogody i klimatu. Kształtują bilans cieplny Ziemi i wpływają na przebieg innych elementów meteorologicznych. Zachmurzenie odgrywa kluczową rolę w modyfikowaniu efektu cieplarnianego atmosfery. Zdaniem wielu badaczy chmury są jednym z najważniejszych źródeł niepewności w modelowaniu zmian klimatu (Maleshko i Wetherald, 1981; Hughes 1984; Warren et al., 2007; Norris i Slingo, 2009). Według Raportu IPCC z 2013 r. (Boucher et al., 2013) chmury, ich właściwości i zachowanie stanowią główne nieokreślone i mało poznane czynniki determinujące przyszłe zmiany klimatu, a takie aspekty, jak typ zachmurzenia, położenie chmur, zawartość wilgoci, wysokość chmur, kształt i wielkość cząstek chmurowych, czas ich życia, decydują o tym, czy chmury będą wpływać na ocieplenie, czy też ochłodzenie klimatu (Matuszko i in. 2022).

W umiarkowanej strefie klimatycznej najważniejsze znaczenie w kształtowaniu zachmurzenia przypisuje się makroskalowym procesom cyrkulacyjnym oraz czynnikom radiacyjnym i warunkom lokalnym (m.in. Niedźwiedź 1981; Żmudzka 2007; Lewik i in. 2010; Matuszko, Węglarczyk 2018; Matuszko i in. 2022). W przypadku tych ostatnich decydujący wpływ ma oddziaływanie podłoża – rzeźba i pokrycie terenu generują lokalną cyrkulację powietrza i zasoby wilgoci. Według Filipiaka (2021) czynniki powodujące obecne zmiany w ilości lub rodzaju chmur

wydają się związane z działalnością antropogeniczną, zwłaszcza ze wzrostem stężenia gazów cieplarnianych lub spowodowaną przez człowieka zmianą grubości optycznej atmosfery.

Celem niniejszej pracy jest określenie wpływu czynników antropogenicznych na zachmurzenie na podstawie danych z Krakowa i okolicy. Praca dotyczy także występowania chmur powstałych w wyniku działalności człowieka, ujętych w nowej międzynarodowej Klasyfikacji Chmur (WMO 2017) jako chmury szczególne – *homogenitus*. Do grupy tej należą chmury, które powstają z przekształcenia smug kondensacyjnych za samolotem oraz rozwijające się nad kominami zakładów przemysłowych lub elektrowni.

Dotychczasowy stan badań

Problematyka związana z modyfikowaniem zachmurzenia przez człowieka jest bardzo różnicowana, obejmuje różne metody i obszary badań. Analiza wpływu terenów miejskich na zachmurzenie była prowadzona w latach 70. XX wieku w ramach projektu METROMEX (Metropolitan Meteorological Experiment) w St. Louis w Stanach Zjednoczonych (Braham 1974). W badaniach tych wykazano między innymi, że miasto jest źródłem jąder kondensacji, co udowodniono poprzez analizę próbek powietrza zebranych przez samolot zarówno po nawietrznej, jak i zawietrznej stronie miasta. Większe stężenie jąder kondensacji powodowało zarówno mniejsze rozmiary kropeł w chmurach nad obszarami miejskimi oraz po ich zawietrznej stronie w porównaniu z obszarami wiejskimi, jak i obecność bardzo dużych kropeł (o promieniu 10 μm). Badania w ramach tego samego projektu (Braham, Wilson 1977), przy wykorzystaniu technik radarowych, wykazały większą częstość występowania chmur konwekcyjnych, których wierzchołki sięgają od 6 do 14 km nad obszarami miejskimi. Według wymienionych autorów efekt ten jest związany z mechanizmami, które są w stanie pokonać warstwę inwersyjną w atmosferze, umożliwiając pionowy rozwój chmur. Oke i in. (2017) przedstawili wyniki badań, które wskazują na wyższe wysokości podstawy chmur nad obszarami zurbanizowanymi i po ich zawietrznej stronie o około 600–700 metrów w porównaniu z otaczającymi obszarami wiejskimi. Zdaniem autorów (Oke i in. 2017) ma to związek z mniejszą wilgotnością powietrza w tzw. miejskiej warstwie granicznej, przez co podstawy chmur zalegają na wyższych wysokościach. Theeuwes i in. (2021) na przykładzie Paryża i Londynu wyjaśnili przyczyny utrzymującego się wiosną i latem zachmurzenia nad miastami w godzinach popołudniowych i wieczornych, które wiązali z uwalnianiem ciepła z powierzchni gruntu do atmosfery i mieszaniem się wilgoci zawartej w powietrzu. Wymienieni autorzy do swoich badań wykorzystali dane satelitarne, lidarowe i pochodzące z obserwacji naziemnych.

W Polsce badania dotyczące wpływu urbanizacji na zachmurzenie prowadzili Kossowska-Cezak (1978), Matuszko (2001) oraz Bartoszek i in. (2023). Wyniki polskich badaczy są zgodne z wymienionymi rezultatami otrzymanymi w innych miastach Europy i Stanów Zjednoczonych.

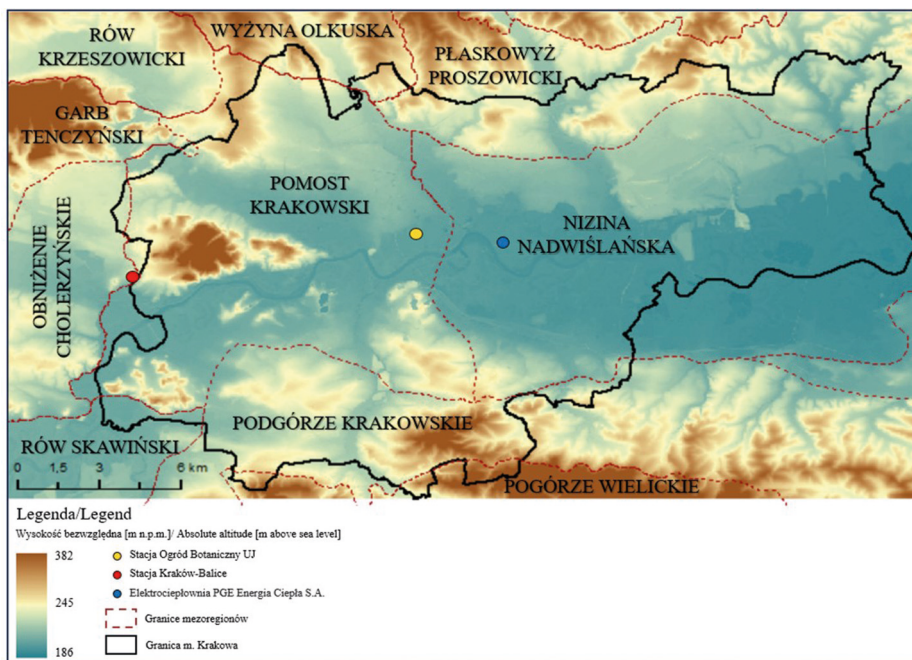
Problematyka smug kondensacyjnych i tworzących się chmur *Cirrus homogenitus/homomutatus*, a także ich wpływ na system klimatyczny i ocieplanie klimatu były poruszone w pracach m.in. Henderson-Sellers (1986), Stordala i in. (2005) oraz Lee i in. (2021). Zagadnienie tzw. zasiewania chmur oraz wynikające z tego procesu modyfikacje warunków pogodowych były tematem badań m.in. Dennisa (1980), natomiast przykład celowej ingerencji człowieka w zachmurzenie przy użyciu higroskopijnych flar przedstawili Mather i in. (1997) na podstawie badań w południowej części Afryki.

Materiały źródłowe i obszar badań

Do określenia wpływu czynników antropogenicznych na zachmurzenie wykorzystano dane ilościowe i jakościowe zachmurzenia z lat 2011–2020 z dwóch stacji, jednej położonej w ścisłym centrum miasta (stacja naukowa Zakładu Klimatologii Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, IGiGP UJ) i drugiej – pozamiejskiej w Krakowie-Balicach (ryc. 1). Stacja w centrum miasta znajduje się w otoczeniu zwartej zabudowy na terenie Ogrodu Botanicznego ($\phi=50^{\circ}04'N$, $\lambda=19^{\circ}58'E$). Stacja synoptyczna Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowego Instytutu Badawczego (IMGW-PIB) Kraków-Balice ($\phi=50^{\circ}05'N$, $\lambda=19^{\circ}48'E$, Hs=237 m n.p.m.) położona jest na terenie Międzynarodowego Portu Lotniczego, ok. 11 km na zachód od centrum Krakowa. Obszar lotniska otaczają tereny rolnicze Obniżenia Cholerzyńskiego.

W analizach dotyczących porównania struktury zachmurzenia uwzględniano wyniki obserwacji na obydwu stacjach w godzinach 6:00, 9:00, 12:00, 15:00 i 18:00 UTC. Rozkład dobowy zachmurzenia i średnią dobową wielkość zachmurzenia rozpatrywano na podstawie danych z 3 terminów: rano (6:00 UTC), południe (12:00 UTC) i wieczór (18:00 UTC).

Charakterystyka występowania chmur szczególnych (*homogenitus*) polegała na obserwacjach wizualnych na terenie Krakowa oraz pozyskanych materiałach w postaci fotografii.



Ryc. 1. Ukształtowanie terenu Krakowa i okolic z uwzględnieniem lokalizacji stacji meteorologicznych oraz elektrociepłowni na tle mezoregionów fizycznogeograficznych

Fig. 1. The topography of Krakow and its surroundings, including the location of meteorological stations and thermal power plant against the backdrop of physical-geographical mesoregions

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Pędracka (2023).

Source: Own elaboration based on Pędracka (2023).

Porównanie wybranych charakterystyk zmienności zachmurzenia między stacją w mieście (Ogród Botaniczny) i terenem pozamiejskim (Balice)

Atmosfera miejska bogata jest w zanieczyszczenia, które sprzyjają tworzeniu się chmur dzięki dostarczaniu do niej dodatkowych jąder kondensacji. Tak zwana miejska warstwa graniczna (*ang. urban boundary layer*) charakteryzuje się oddziaływaniem procesów konwergencji i wznoszenia się powietrza (Oke i in. 2017). Różne właściwości powierzchni np. obecność budynków, dróg, parkingów itp., wpływają na mniejszą ewapotranspirację i charakteryzują się większym strumieniem ciepła jawnego w porównaniu z obszarami zajętymi przez naturalne skupiska roślin (Angevine i in. 2003). Wyższa temperatura podłoża w mieście i mniejsze parowanie spowod-

wane zmianą powierzchni czynnej skutkują większym strumieniem ciepła jawnego i mniejszym strumieniem ciepła utajonego nad obszarem miejskim. W konsekwencji, przy słabym przepływie powietrza, głębokość mieszania jest większa nad obszarem zurbanizowanym. Prawdopodobna jest również przyziemna strefa zbieżności tworząca się nad nagrzaną powierzchnią, która może przyczynić się do powstania chmur lub przynajmniej oddziaływania na ich lokalizację (Angevine i in. 2003).

Zachmurzenie ogólne

Średnia wielkość zachmurzenia na stacji klimatologicznej Ogród Botaniczny (IGiGP UJ) w latach 2011–2020 wyniosła 65,1%, natomiast na stacji Kraków-Balice 66,3%. We wszystkich porach roku większe zachmurzenie było w strefie pozamiejskiej niż w centrum Krakowa (tab. 1), z największą różnicą w zimie wynoszącą prawie 4%, natomiast najmniejszą w lecie (0,5%). Jak podaje Matuszko (2014), z powodu emisji ciepła antropogenicznego obszary miejskie oddziałują osuszająco na atmosferę, co przejawia się spadkiem częstości występowania chmur warstwowych oraz liczby dni z mgłą. Centrum Krakowa w porównaniu z jego obszarami peryferyjnymi odznacza się mniejszymi wartościami wilgotności względnej i liczby dni z mgłą, natomiast większą liczbą dni suchych, co jest prawdopodobnie związane z nasiloną antropopresją, będącą skutkiem dynamicznego rozwoju miasta (Matuszko i in. 2015).

W ciągu roku jedynie w lipcu średnia wielkość zachmurzenia była nieznacznie większa w centrum miasta niż nad peryferiami (ryc. 2). W lecie, przy niewielkiej prędkości wiatru, większe zachmurzenie nad miastem w godzinach południowych i wieczornych jest związane z lokalną cyrkulacją termiczną, która powoduje adwekcję

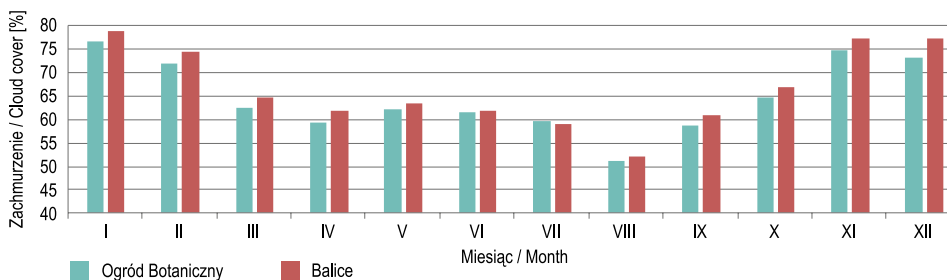
Tab. 1. Średnia wielkość zachmurzenia na stacjach Kraków-Balice i Ogród Botaniczny UJ w latach 2011–2020

Table 1. The average cloud cover at the Krakow-Balice and UJ Botanical Garden stations in the years 2011–2020

Stacja / Station	Zachmurzenie / Cloud cover [%]			
	Zima / Winter	Wiosna / Spring	Lato / Summer	Jesień / Autumn
Kraków-Balice	76,6	63,0	57,5	68,1
Ogród Botaniczny UJ	73,6	61,1	57,2	65,8

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych IMGW-PIB i Ogrodu Botanicznego UJ.

Source: Own elaboration based on the data from IMGW-PIB and the Department of Climatology IGiGP UJ.



Ryc. 2. Przebieg roczny średniej miesięcznej wielkości zachmurzenia [%] na stacjach Kraków-Balice i Ogród Botaniczny UJ w latach 2011–2020

Fig. 2. The annual course of the average monthly cloud cover [%] at the Krakow-Balice and UJ Botanical Garden stations in the years 2011–2020

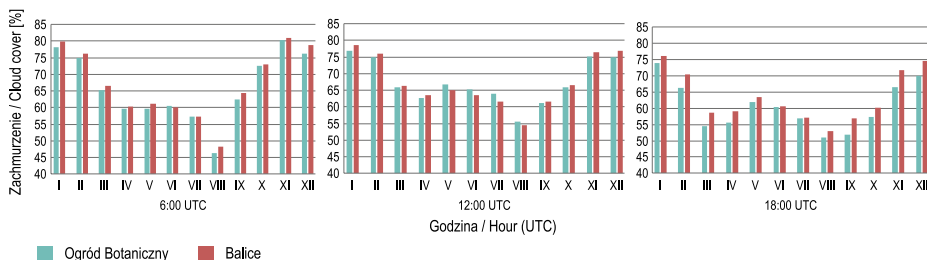
Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych IMGW-PIB i Zakładu Klimatologii IGiGP UJ.

Source: Own elaboration based on the data from IMGW-PIB and the Department of Climatology IGiGP UJ.

wilgoci z terenów otaczających obszar zurbanizowany. Dzięki zbieżności prądów powietrza wilgotne powietrze wznosi się, co przyczynia się do tworzenia chmur (Theeuwes i in. 2022).

Przebieg dobowy wielkości zachmurzenia na obydwu stacjach był zróżnicowany w zależności od sezonu. Rano (6:00 UTC) zachmurzenie było większe w Balicach niż w Ogródku Botanicznym we wszystkich miesiącach z wyjątkiem czerwca, natomiast w lipcu na obu stacjach wielkość zachmurzenia była równa i wynosiła 57,1% (ryc. 3). O godzinie 12:00 UTC od września do kwietnia większe zachmurzenie było na peryferiach miasta, natomiast od maja do sierpnia w centrum Krakowa. Wieczorem w ciągu całego roku zachmurzenie było większe nad terenem pozamiejskim (ryc. 3). Największe różnice występowały w listopadzie i wrześniu (odpowiednio 7,3% i 8,8%), a najmniejsze w czerwcu i lipcu (odpowiednio 0,5% i 0,4%) (ryc. 3).

W przebiegu wieloletnim stopień pokrycia nieba przez chmury rano (6:00 UTC) i w południe (12:00 UTC) był większy na stacji w centrum miasta niż na jego obrzeżach w latach 2011–2013, natomiast okres 2014–2020 odznaczał się większym zachmurzeniem na stacji Kraków-Balice. Wieczorem wielkość zachmurzenia była większa we wszystkich miesiącach i latach na stacji zlokalizowanej na peryferiach miasta. Przy ogólnie dużym stopniu pokrycia nieba chmurami w godzinach wieczornych (18:00 UTC) obszar miejski odznaczał się mniejszym zachmurzeniem, co może być związane z oddziaływaniem termicznym miasta i rozpraszaniem chmur warstwowych nad cieplejszym podłożem, natomiast w lecie większe zachmurzenie nad obszarem zurbanizowanym wynika ze wzmożonej konwekcji w godzinach okołopołudniowych (Kossowska-Cezak, 1978).



Ryc. 3. Przebieg roczny średniej miesięcznej wielkości zachmurzenia na stacjach Kraków-Balice i Ogród Botaniczny UJ w latach 2011–2020 o godzinie 6:00, 12:00 i 18:00 UTC

Fig. 3. The annual course of the average monthly cloud cover at the Krakow-Balice and UJ Botanical Garden stations in the years 2011–2020 at 6:00, 12:00 and 18:00 UTC

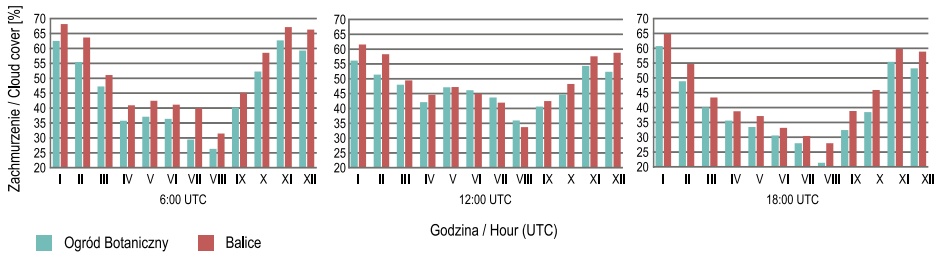
Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych IMGW-PIB i Zakładu Klimatologii IGiGP UJ.

Source: Own elaboration based on the data from IMGW-PIB and the Department of Climatology IGiGP UJ.

Pokrycie nieba przez chmury piętra niskiego

Chmury piętra niskiego są szczególnie związane z warunkami podłoża, jego temperaturą, wilgotnością i szorstkością. Tworzeniu się chmur konwekcyjnych sprzyjają warunki korzystne do rozwoju ruchów pionowych powietrza, tj. insolacja, nagrzanie powierzchni czynnej, wysoka temperatura powietrza oraz występowanie równowagi chwiejnej w atmosferze. Natomiast brak lub niewielki dopływ promieniowania słonecznego, niska temperatura podłoża i powietrza, równowaga stała i inwersja temperatury hamują ruchy wznoszące powietrza i sprzyjają powstawaniu chmur warstwowych. Turbulencyjne mieszanie powietrza, rozpad chmur *Cumulus* i *Cumulonimbus*, unoszenie chmur *Stratus*, ruchy falowe w atmosferze oraz rozpad strefy frontalnej są najczęstszymi przyczynami powstawania chmur *Stratocumulus* (Bartoszek i in. 2023).

W latach 2011–2020 średnia wielkość zachmurzenia przez chmury niskie na stacji Kraków-Balice wyniosła 48,0%, natomiast na stacji Ogród Botaniczny UJ 44,2%. W całym analizowanym 10-leciu stopień pokrycia nieba przez chmury niskie był większy na stacji zlokalizowanej na peryferiach miasta, w porównaniu z jego centrum. O godzinie 6:00 UTC stopień pokrycia nieba chmurami piętra niskiego był większy we wszystkich miesiącach w terenie pozamiejskim (ryc. 4). W południe, w miesiącach letnich, tj. od czerwca do sierpnia, zaobserwowano większe zachmurzenie w centrum miasta w porównaniu z peryferiami (ryc. 4). Powodem tego jest wzrost częstości występowania chmur o budowie pionowej, które są związane



Ryc. 4. Przebieg roczny średniego miesięcznego stopnia pokrycia nieba chmurami niskimi na stacjach Kraków-Balice i Ogród Botaniczny UJ w latach 2011–2020 o godzinie 6:00, 12:00 i 18:00 UTC

Fig. 4. The annual course of the average monthly extent of low cloud cover at the Krakow-Balice station and UJ Botanical Garden stations in the years 2011–2020 at 6:00, 12:00 and 18:00 UTC

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych IMGW-PIB i Zakładu Klimatologii IGiGP UJ.

Source: Own elaboration based on the data from IMGW-PIB and the Department of Climatology IGiGP UJ.

z emisją ciepła antropogenicznego i przewagą powierzchni nieprzepuszczalnych w mieście (Bartoszek i in. 2023). W miesiącach letnich chmury piętra niskiego mogą utrzymywać się dłużej nad miastem w porównaniu z obszarami pozamiejskimi, ze względu na pionowe mieszanie się powietrza i dostępną w nim parę wodną, pomimo że w centrum miasta atmosfera jest bardziej sucha niż na peryferiach (Theeuwes i in. 2021). Wieczorem, podobnie jak rano, stopień pokrycia nieba przez chmury niskie był wyższy na stacji pozamiejskiej we wszystkich miesiącach, przy czym największe różnice wystąpiły w październiku (16,3%), a najmniejsze w lipcu (7,9%) (ryc. 4).

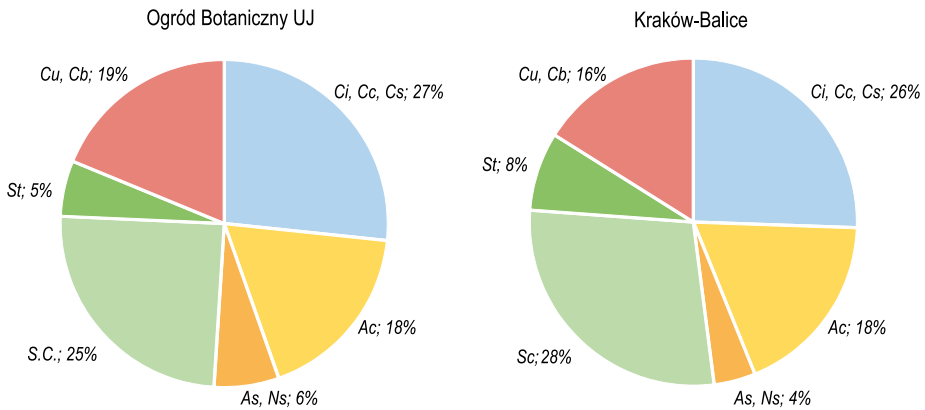
Występowanie chmur w godzinach popołudniowych nad miastem jest przejawem dłuższej utrzymującej się turbulencji, napędzanej przez siły wyporu (Theeuwes i in. 2019). Według Theeuwesa i in. (2022) można wymienić trzy główne procesy kształtujące konwekcję i formowanie chmur nad miastem:

1. Większe strumienie ciepła jawnego nad miastem w porównaniu z terenami pozamiejskimi ze względu na mniejszy udział terenów zielonych, co prowadzi do wzrostu zasięgu warstwy granicznej i poziomu kondensacji na terenach zurbanizowanych.
2. Zwiększona szorstkość powierzchni, która może przyczyniać się do zbieżności mas powietrza nad obszarem zurbanizowanym.
3. Większe zanieczyszczenie nad miastem, w tym koncentracja aerozoli, które stanowią dodatkowe jądra kondensacji dla chmur.

Struktura zachmurzenia

Zachmurzenie pod względem jakościowym z podziałem na grupy chmur opracowano na podstawie metody zaproponowanej przez Matuszko i in. (2022). Rodzaje chmur rozpatrywano na obydwu stacjach jako liczbę przypadków wystąpienia w poszczególnych terminach obserwacyjnych, tj. 6:00, 9:00, 12:00, 15:00, 18:00 UTC.

Na stacji Kraków-Balice najczęściej występował *Stratocumulus*, następnie chmury piętra wysokiego, *Altostratus* oraz chmury o budowie pionowej (ryc. 5). Na stacji Ogród Botaniczny, z największą częstością pojawiały się chmury piętra wysokiego, a następnie *Stratocumulus*. W przypadku zachmurzenia warstwowego na stacji pozamiejskiej częściej obserwowano *Stratus*, natomiast rzadziej niż nad miastem – chmury *Altostratus* i *Nimbostratus* (ryc. 5). Według Angevine i in. (2003) obszary miejskie charakteryzują się cieplejszą powierzchnią zarówno w dzień, jak i w nocy, co oznacza, że niskie chmury warstwowe mogą nie mieć tam sprzyjających warunków do powstawania, z uwagi na niewystarczające ochłodzenie dolnych warstw troposfery oraz mniejszą zawartość pary wodnej w powietrzu. Mniejsza częstość występowania chmur *Stratus* nad centrum miasta może przyczyniać się do częściej obserwowanych chmur piętra wysokiego na stacji w Ogródku Botanicznym. Gdy



Ryc. 5. Częstość występowania poszczególnych przypadków grup chmur na stacjach Kraków-Balice oraz Ogród Botaniczny UJ w latach 2011–2020

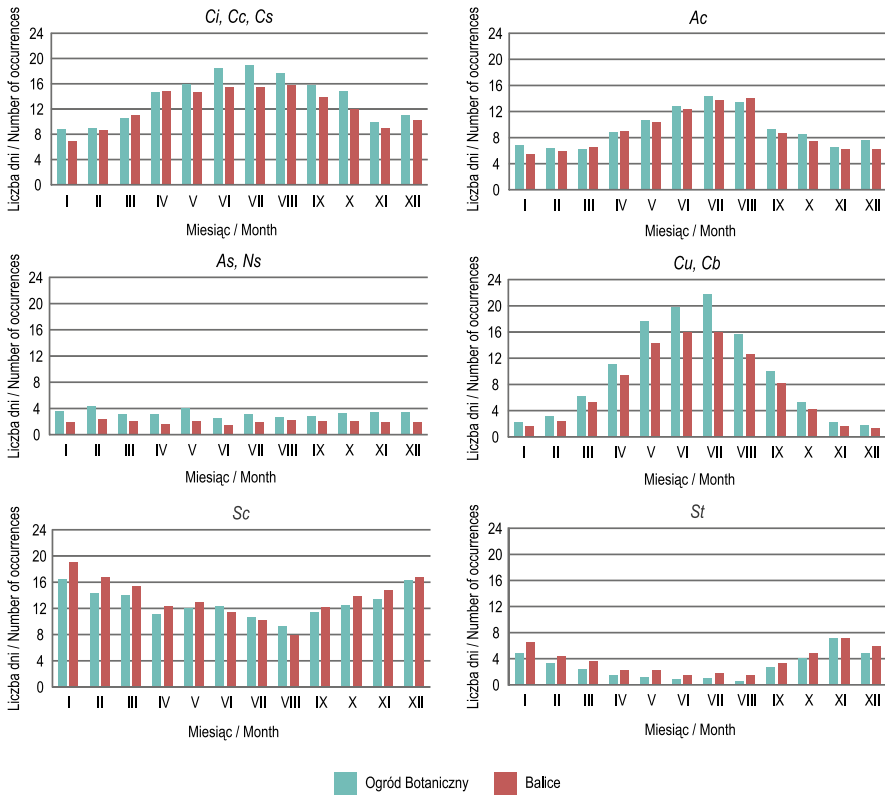
Fig. 5. The frequency of occurrences of different cloud group types at the Krakow-Balice and UJ Botanical Garden stations in the years 2011–2020

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych IMGW-PIB i Zakładu Klimatologii IGiGP UJ.

Source: Own elaboration based on the data from IMGW-PIB and the Department of Climatology IGiGP UJ.

niebo jest całkowicie pokryte przez chmury niskie, to te znajdujące się na wyższych piętrach mogą pozostawać niewidoczne dla obserwatora. Większy udział chmur niskich warstwowych na stacji pozamiejskiej może być związany z jednej strony z lokalizacją stacji we wklęsłej formie terenu, co sprzyja splotom katabatycznym i powstawaniu lokalnych zastoisk chłodnego powietrza, szczególnie podczas pogody bezwietrznej. Z drugiej strony przewaga naturalnych powierzchni terenu, oznaczających się odmienną pojemnością cieplną w porównaniu z antropogenicznym pokryciem terenu w mieście, wpływa na szybsze wypromieniowanie skumulowanego ciepła, co w konsekwencji przyczynia się do efektywniejszego wychłodzenia podłoża wraz z zalegającą nad nią warstwą powietrza.

W ujęciu rocznym średnia liczba dni z występowaniem poszczególnych grup chmur wykazuje różnice w mieście i terenie pozamiejskim (ryc. 6). Chmury piętra wysokiego i *Altostratus* pojawiają się częściej na stacji Ogród Botaniczny w porównaniu ze stacją Kraków-Balice. Chmury warstwowe piętra średniego (*Altostratus* i *Nimbostratus*) odznaczają się niewielkim zróżnicowaniem w ciągu roku i są obserwowane z większą frekwencją we wszystkich miesiącach na stacji w centrum miasta (ryc. 6). Również chmury o budowie pionowej pojawiają się częściej na stacji Ogród Botaniczny UJ w porównaniu ze stacją Kraków-Balice we wszystkich miesiącach w ciągu roku (ryc. 6). Największe różnice pomiędzy centrum, a peryferiami miasta występują w miesiącach letnich, sięgając średnio 6 dni w lipcu (ryc. 6). Takie zróżnicowanie świadczy o istotnej roli powierzchni czynnej w powstawaniu chmur o budowie pionowej nad miastem. Jak podają Ek i Mahrt (1994), zazwyczaj przy niewielkiej ewapotranspiracji rozwój chmur w warstwie granicznej atmosfery jest hamowany, jednak w niektórych przypadkach większy strumień ciepła jawnego z powierzchni czynnej może doprowadzić do pogłębienia warstwy granicznej i rozwoju chmur, nawet pomimo słabszego parowania powierzchniowego. Chmury *Stratocumulus* na obu stacjach występują częściej w chłodnej połowie roku z niewielką przewagą na peryferiach miasta w stosunku do centrum (ryc. 6). W miesiącach letnich jednak, tj. od czerwca do sierpnia, pojawiają się one częściej na stacji Ogród Botaniczny w porównaniu ze stacją Kraków-Balice (ryc. 6). Taka sytuacja może być związana z przekształceniem i spłaszczeniem chmur *Cumulus* (*Stratocumulus cumulogenitus*), szczególnie w godzinach popołudniowych i wieczornych, kiedy dochodzi do ustania prądów konwekcyjnych (Matuszko 2018). Chmury *Stratus* występują częściej w chłodnej połowie roku i we wszystkich miesiącach zaznacza się ich przewaga na stacji Kraków-Balice (ryc. 6). Największe różnice w częstości niskich chmur warstwowych pomiędzy stacją na peryferiach i w centrum miasta występują w miesiącach zimowych, natomiast najmniejsze zaznaczają się w miesiącach letnich, kiedy ogólnie ich średnia liczba w tym sezonie jest niewielka (ryc. 6).



Ryc. 6. Przebieg roczny średniej miesięcznej liczby przypadków występowania poszczególnych grup chmur na stacjach Kraków-Balice oraz Ogród Botaniczny UJ w latach 2011–2020
 Fig. 6. The annual course of the average monthly number of occurrences of individual cloud groups at the Krakow-Balice and UJ Botanical Garden stations in years 2011–2020

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych IMGW-PIB i Zakładu Klimatologii IGiGP UJ.

Source: Own elaboration based on the data from IMGW-PIB and the Department of Climatology IGiGP UJ.

Chmury szczególne – *homogenitus* i *homomutatus*

W najnowszej międzynarodowej klasyfikacji chmur (WMO 2017) pojęcie „chmury szczególne” obejmuje chmury tworzące się lub rozwijające wskutek specyficznych, często lokalnych czynników pochodzenia naturalnego lub antropogenicznego. Do grupy tej zalicza się chmury związane z działalnością antropogeniczną (*homogenitus*), które rozwijają się w otoczeniu obszarów przemysłowych, oraz smugi kondensacyjne po przelocie samolotów.

Chmury rozwijające się nad kominami zakładów przemysłowych i elektrowni

Chmury nad kominami powstają, gdy unosząca się z emitora para wodna jest cieplejsza od powietrza, dlatego szybko się wznosi i ochładza adiabatycznie, dodatkowo mieszając się z otaczającym powietrzem. Gdy porcja powietrza osiągnie temperaturę punktu rosy, dochodzi do kondensacji pary wodnej i chmura zaczyna być widoczna. Zdarza się, że tworzenie chmury rozpoczyna się dopiero w pewnej odległości od wylotu kominu, ponieważ mieszanina pary wodnej i powietrza musi być odpowiednio schłodzona, by osiągnąć poziom kondensacji (Matuszko 2018).

Do analizy powstawania i rozwoju chmur antropogenicznych nad kominami zakładów przemysłowych wybrano 3 przypadki z dni: 14.08.2022, 11.01.2023, 26.01.2023 z otoczenia kominów Elektrociepłowni PGE Energia Ciepła S.A. Łęg w Krakowie (ryc. 7a). W tym celu scharakteryzowano sytuację synoptyczną i sprawdzono wartości wybranych elementów meteorologicznych na podstawie depesz SYNOP ze stacji Kraków-Balice, aby ocenić sprzyjające warunki powstawania chmur antropogenicznych w otoczeniu zakładów przemysłowych. Warto jednak zaznaczyć, że poza samym stanem atmosfery istotną rolę odgrywa praca elektrowni, ponieważ nawet w sprzyjających okolicznościach do powstawania chmur ilość pary wodnej emitowanej z wylotu kominu może być niewystarczająca. Ponadto elektrociepłownia emituje do atmosfery również różne zanieczyszczenia, m.in. CO₂, PM₁₀, związki azotu itp. (European Industrial Emissions Portal 2023), które mogą stanowić potencjalne jądra kondensacji, również przyczyniając się do rozwoju chmur.

Pierwszym wybranym do analizy dniem jest 14.08.2022 roku, w którym Polska znajdowała się w oddziaływaniu wielocentrycznego układu cyklonalnego w regionie Morza Czarnego oraz frontu okluzji. Dominowała adwekcja mas powietrza z sektora wschodniego o cechach ciepłych i wilgotnych (Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego 2023). Chmura tworząca się nad wylotem kominu elektrociepłowni w Łęgu uformowała się około godz. 8:00 UTC. W tym czasie na stacji Kraków-Balice zachmurzenie ogólne wyniosło 8/8, natomiast przez chmury niskie 7/8. Występowały chmury *Stratocumulus*, których podstawa występowała na poziomie 400–600 m n.p.g. Wysokość najniższego z kominów elektrociepłowni, z którego była emitowana para wodna, wynosi 120 metrów (LoveKraków.pl 2023). Zatem w analizowanym dniu podstawa chmur antropogenicznych nad wylotem kominów była niższa niż naturalnych chmur, związanych z sytuacją synoptyczną (ryc. 7b). We wspomnianym terminie wiatr wiał z kierunku południowego z prędkością 1 m/s. Temperatura powietrza wynosiła 20,4°C, a temperatura punktu rosy 17,6°C. Ciśnienie atmosferyczne sprowadzone do poziomu morza wynosiło 1011,3 hPa. Pomimo że na poziomie stacji występował bardzo słaby wiatr, w wyższych warstwach atmosfery uwidaczniało się wyraźne ukierunkowanie



Ryc. 7. Widok na elektrociepłownię w Łęgu (a) oraz powstające w jej obrębie chmury antropogeniczne (b, c i d) (fot. A. Duda)

Fig. 7. The view of the Łęg thermal power station (a) and the anthropogenic clouds forming around it (b, c, and d) (photo by A. Duda)

smugi dymu, co może świadczyć o większej prędkości wiatru na wyższych wysokościach nad poziomem gruntu.

Następnym przykładem powstawania zachmurzenia w obrębie obszarów przemysłowych jest ten z dnia 11.01.2023 roku, kiedy Polska znajdowała się w zasięgu siodła barycznego, a adwekcja mas powietrza o północy postępowała głównie z sektora południowo-zachodniego. W ciągu dnia stopniowo zmieniała ona kierunek na południowy i południowo-wschodni, a nad obszarem kraju dominowały masy powietrza polarnego morskiego. Od wschodu stopniowo przemieszczał się front okluzji związany z układem niskiego ciśnienia z centrum nad Morzem Egejskim, z kolei od strony zachodniej nasuwał się układ frontów związany z ośrodkiem

cyklonalnym z centrum nad Morzem Północnym (Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego 2023). O godz. 12:00 UTC w Krakowie wielkość zachmurzenia ogólnego wyniosła 4/8, a przez chmury niskie 1/8 i składało się z chmur *Stratocumulus* i *Cirrus spissatus*. Podstawa chmur najniższych została określona jako 600–1000 m n.p.g. O godz. 12:00 UTC wiatr wiał z kierunku południowo-wschodniego z prędkością 3 m/s. Temperatura powietrza i punktu rosy wyniosły odpowiednio 6,5°C i 2,0°C, a ciśnienie zredukowane do poziomu morza 1019,1 hPa. W analizowanym dniu doszło do rozwoju niewielkich chmur *Stratocumulus* w obrębie wylotu komina, których podstawy sięgały unoszącej się smudze dymu, tj. nieco powyżej 260 m, biorąc pod uwagę wysokość najwyższego komina (ryc. 7c). Zatem z jednej strony nastąpiło lokalne obniżenie podstawy chmur najniższych, z drugiej – w Krakowie można było obserwować większe zachmurzenie.

Ostatnim rozpatrywanym dniem jest 26.01.2023 roku. Z obszaru Polski stopniowo ustępował klin wysokiego ciśnienia z centrum nad Rosją, a o godz. 00:00 UTC dominował napływ powietrza o cechach kontynentalnych z sektora wschodniego. W ciągu dnia obszar kraju znajdował się w obrębie siodła barycznego (Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego 2023). Wraz z ustępującym układem wysokiego ciśnienia nad Polskę zaczęła napływać masa powietrza polarne morskiego. W południowej części kraju, zarówno nocą i w ciągu dnia, temperatura powietrza była ujemna, a zachmurzenie całkowite. Pomimo cyrkulacji antycyklonalnej duża zawartość pary wodnej w dolnej troposferze przyczyniła się do powstania tzw. zgniętego wyżu. W Krakowie 26.01.2023 roku o godz. 12:00 UTC występowało zachmurzenie całkowite przez chmury *Stratocumulus*, których podstawa zalegała na poziomie 300–600 m n.p.g. Wiatr wiał z kierunku północno-wschodniego z prędkością 2 m/s. Temperatura powietrza i punktu rosy osiągnęły o godz. 12:00 UTC odpowiednio –0,2°C i –2,7°C, a ciśnienie utrzymywało się na poziomie 1021,7 hPa. Podobnie jak w poprzednich przypadkach w analizowanym dniu doszło do powstania *Stratocumulus homogenitus* ponad wylotem komina (ryc. 7d), których podstawa była niższa niż chmur związanych z aktualną sytuacją synoptyczną.

Studium przypadków tworzenia się chmur antropogenicznych w otoczeniu elektrowni w Łęgu wskazuje, że chmury „kominowe” mogą tworzyć się w różnych porach roku, zarówno podczas cyrkulacji antycyklonalnej, jak i cyklonalnej oraz przy odmiennych cechach mas powietrza. Na podstawie analizowanych przypadków zauważono, że sprzyjającym typem cyrkulacji w powstawaniu chmur okazało się tzw. siodło baryczne, któremu towarzyszyły chmury *Stratocumulus* (ryc. 7). Zachmurzenie tworzące się w wyniku emisji pary wodnej nad kominami elektrociepłowni występowało przy małych prędkościach wiatru. W analizowanych dniach na wyższych poziomach troposfery można było w niektórych przypadkach zaobserwować wyraźny kierunek adwekcji smugi dymu. Istotną rolę odgrywała również wysoka zawartość pary wodnej w powietrzu w dolnej warstwie troposfery w pobliżu wylotu komina

oraz praca elektrowni, a konkretnie wielkość emisji pary wodnej i zanieczyszczeń do atmosfery. W analizowanych przypadkach dochodziło do lokalnego obniżenia podstawy chmur nad miastem, a także wzrostu wielkości zachmurzenia.

Chmury antropogeniczne powstające z przekształcenia smug kondensacyjnych

Przykładem chmur, które powstają pod wpływem działalności człowieka, są również smugi kondensacyjne po przelocie samolotu. Ich powstawanie związane jest z ochłodzeniem gazów spalinowych złożonych z dużej ilości pary wodnej pochodzącej ze spalania paliwa (Piotrowski 2017). Smugi kondensacyjne często są krótkotrwałe i szybko zanikają, jednak mogą również utrzymywać się parę godzin (Matuszko 2018). Te, które utrzymują się ponad 10 minut, zostają przyporządkowane do odpowiedniego rodzaju i określa się je nazwą chmury szczególnej np. *Cirrus homogenitus*. Smugi kondensacyjne mogą podlegać wewnętrznym przeobrażeniom. Pod wpływem silnych wiatrów górnych dochodzi do ich rozrastania i rozpościerania się na znacznej części nieba, przez co w efekcie mogą przypominać chmury o naturalnym wyglądzie (ryc. 8). Często odróżnienie przekształconych smug kondensacyjnych od naturalnych chmur piętra wysokiego jest niemożliwe.

Według Dischla i in. (2022) warunki pogodowe wywierają zróżnicowany wpływ na powstawanie i utrzymywanie się smug kondensacyjnych, a analiza tych związków może pomóc we wdrożeniu strategii unikania oraz łagodzenia skutków zmian klimatu wywołanych czynnikami antropogenicznymi. To, czy smuga się utworzy i utrzyma, zależy zarówno od temperatury, jak i wilgotności względnej powietrza, a zatem od regionu geograficznego i pory roku, a także od wysokości lotu (Dischl i in. 2022). Badania przeprowadzone w Europie wykazały, że potencjalne pokrycie nieba smugami kondensacyjnymi i chmurami piętra wysokiego (*homogenitus* i *homomutatus*) różni się w zależności od poziomu lotu, ale ogólnie najlepsze warunki do ich tworzenia się występują jesienią i zimą na wysokościach od 9 do 12 km (300–200 hPa), natomiast najrzadziej takie chmury obserwuje się w lipcu (Dischl i in. 2022). Dodatkowo w przypadku Europy Południowej ciepłe masy powietrza często zapobiegają powstawaniu smug, natomiast w północnej części kontynentu ich tworzenie się może być hamowane przez niską wilgotność względną powietrza. Obszarem, który został uznany za optymalny do obserwacji i analizy powstawania i rozwoju zachmurzenia piętra wysokiego w wyniku działalności człowieka jest Europa Środkowa. Także i w tym obszarze niewielka zawartość pary wodnej w powietrzu na dużych wysokościach lotu zmniejsza prawdopodobieństwo powstania smug kondensacyjnych, podczas gdy ciepłe masy powietrza mogą zapobiegać ich powstawaniu i dalszemu rozwojowi na niższych wysokościach (Dischl i in. 2022).



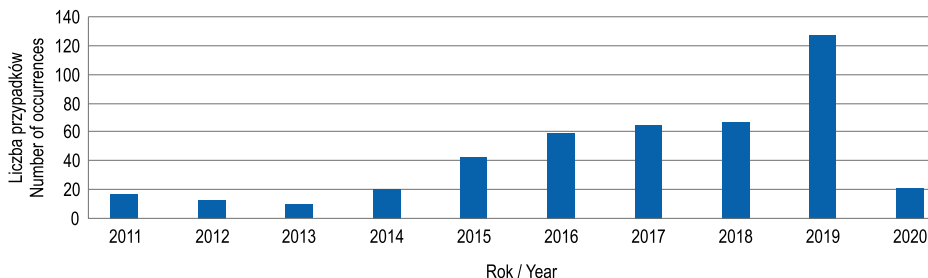
Ryc. 8. Chmura *Cirrocumulus homogenitus* (a) i *Cirrocumulus homomutatus* (b) przeobrażona ze smugi kondensacyjnej (fot. A. Duda)

Fig. 8. *Cirrocumulus homogenitus* cloud (a) and *Cirrocumulus homomutatus* cloud (b) transformed from a condensation trail (photo by A. Duda)

Do analizy występowania chmur antropogenicznych tworzących się w wyniku przekształcania smug kondensacyjnych wykorzystano dane ze stacji Ogród Botaniczny (IGiGP UJ). Przed wprowadzeniem zmian w *Międzynarodowym Atlasie Chmur* w 2017 roku, chmury powstałe w wyniku działalności lotniczej notowane były na stacji w Krakowie jako „*Cirrus tractus*”.

W Krakowie w latach 2011–2020 liczba przypadków występowania chmur szczególnych powstałych w wyniku przekształcania smug kondensacyjnych odznaczała się stopniowym wzrostem do 2019 roku, natomiast rok później zaznaczył się znaczny spadek (ryc. 9). Ma to wyraźny związek z ograniczonym ruchem krajowym i międzynarodowym na lotnisku Kraków-Balice w wyniku pandemii COVID-19.

W ciągu roku liczba chmur szczególnych związanych z lotnictwem odznacza się stopniowym wzrostem z wyraźnymi wahaniami do czerwca, następnie dochodzi do spadku w lipcu i ponownego zwiększenia w sierpniu i wrześniu, po czym do końca roku obserwuje się zmniejszenie częstości ich występowania (ryc. 10). Większa liczba obserwowanych chmur *homogenitus* w cieplej części roku może być związana m.in.



Ryc. 9. Liczba przypadków występowania chmur szczególnych powstałych w wyniku ruchu lotniczego w Krakowie w latach 2011–2020

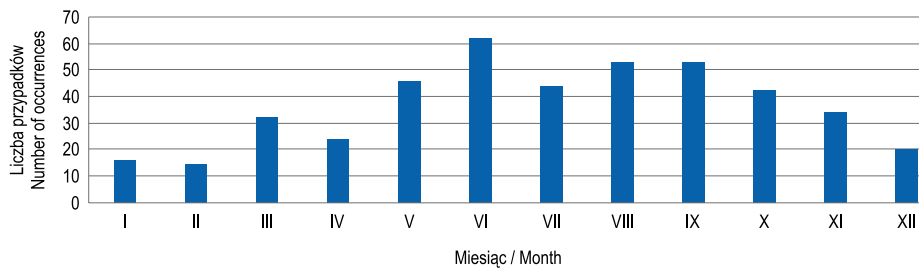
Fig. 9. The number of occurrences of special clouds formed due to air traffic in Krakow in years 2011–2020

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych Zakładu Klimatologii IGiGP UJ.

Source: Own elaboration based on the data from the Department of Climatology IGiGP UJ.

ze zmianą wielkości i struktury zachmurzenia tj. spadkiem stopnia pokrycia nieba przez chmury warstwowe piętra niskiego i średniego oraz przewagę chmur o budowie pionowej (Matuszko, Węglarczyk 2018). Na identyfikację chmur *Cirrus homogenitus* może również wpływać długość dnia, co ma szczególne znaczenie w godzinach wieczornych. Dodatkowo w miesiącach letnich ruch lotniczy jest wzmożony z uwagi na okres wakacji w Polsce. Prawdopodobnie także sytuacja synoptyczna ma znaczenie w powstawaniu chmur szczególnych. W czerwcu następuje zmiana pola barycznego w Europie, co przyczynia się do przewagi adwekcji mas powietrza z sektora zachodniego, czego przejawem może być większy zasób wilgoci w powietrzu napływającym z regionu Atlantyku. Z kolei w sezonie jesiennym dochodzi do wzrostu potencjalnej pokrywy nieba przez chmury piętra wysokiego, które są związane z działalnością człowieka, ponieważ w tym okresie temperatura jest wystarczająco niska, a wilgotność względna wystarczająco wysoka, aby smugi mogły się utrzymywać (Dischl i in. 2022). W zimie obserwacja chmur *Cirrus homogenitus* jest utrudniona z powodu krótkiego dnia i problemów z oceną jakościową zachmurzenia po zachodzie słońca. Dodatkowo w zimie przeważają niskie chmury warstwowe, które mogą całkowicie zasłaniać niebo, uniemożliwiając identyfikację chmur wyższych pięter.

Zmienność chmur powstałych w wyniku przekształcania smug kondensacyjnych zaznacza się również w poszczególnych porach doby. W latach 2011–2020 chmury szczególne związane z awiacją najczęściej pojawiały się rano, zwłaszcza w miesiącach letnich, natomiast najrzadziej wieczorem w zimie (ryc. 11). Najmniejsza liczba przypadków występowania chmur szczególnych w godzinach okołopołudniowych

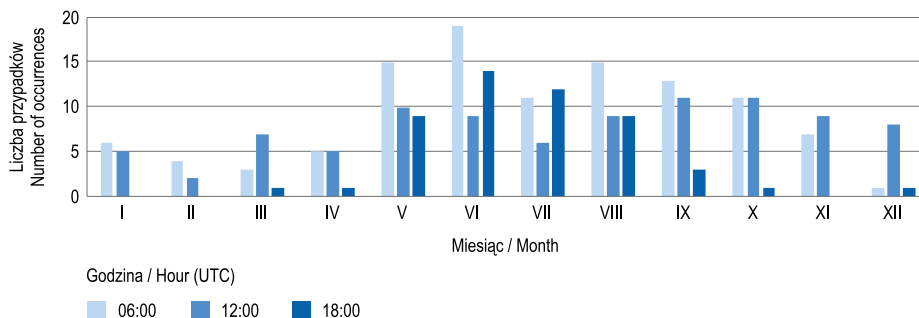


Ryc. 10. Przebieg roczny liczby przypadków występowania chmur szczególnych związanych z ruchem lotniczym w Krakowie w latach 2011–2020

Fig. 10. The annual course of the number of occurrences of special clouds related to air traffic in Krakow in the years 2011–2020

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych Zakładu Klimatologii IGiGP UJ.

Source: Own elaboration based on the data from the Department of Climatology IGiGP UJ.



Ryc. 11. Przebieg roczny liczby przypadków występowania chmur szczególnych związanych z ruchem lotniczym na stacji Ogród Botaniczny UJ o godz. 6:00, 12:00 i 18:00 UTC

Fig. 11. The annual course of the number of occurrences of special clouds related to air traffic at the UJ Botanical Garden station at 6:00, 12:00 and 18:00 UTC

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych Zakładu Klimatologii IGiGP UJ.

Source: Own elaboration based on the data from the Department of Climatology IGiGP UJ.

przypada na ciepłą połowę roku i może być związana z najmniejszymi wartościami wilgotności względnej powietrza, ponieważ jego wysoka temperatura w tym okresie sprawia, że potrzebna jest większa ilość pary wodnej do uzyskania stanu nasycenia (Wypych 2007).

Wnioski

Wyniki badań dotyczące określenia wpływu czynników antropogenicznych na zachmurzenie na podstawie danych z dwóch stacji zlokalizowanych w Krakowie i okolicach (centrum miasta i teren pozamiejski) pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

Porównanie wielkości i rodzajów chmur na stacji w mieście i terenie pozamiejskim wykazało, że obszary zurbanizowane w różny sposób oddziałują na zachmurzenie. Z jednej strony kompleks miejski może przyczyniać się do spadku stopnia pokrycia nieba chmurami, szczególnie piętra niskiego w chłodnej części roku, co może być związane z osuszającą rolą miasta. Z drugiej strony – w miesiącach letnich, w godzinach południowych obserwuje się większe zachmurzenie w centrum miasta, co może być związane z heterogenicznością podłoża, inną pojemnością cieplną powierzchni czynnej, mniejszą prędkością wiatru oraz większą grubością warstwy granicznej w porównaniu z obszarami podmiejskimi. Dodatkowo miasto w wyniku wzmózonej insolacji może generować lokalną cyrkulację, przyczyniając się do powstawania prądów zbieżności, które mogą sprzyjać powstawaniu chmur konwekcyjnych.

Istniejące na terenie Krakowa elektrownie i zakłady przemysłowe przyczyniają się do wzrostu zachmurzenia i lokalnego obniżenia podstawy chmur pochodzenia antropogenicznego, natomiast lokalizacja lotniska w pobliżu miasta oraz natężenie ruchu lotniczego wykazują pewien związek z występowaniem smug kondensacyjnych, które następnie przekształcają się w chmury szczególne.

Literatura

- Angevine M.W., White B.A., Senff J.C., Trainer M., Banta M.R., Mohammed A.A., 2003, *Urban–rural contrasts in mixing height and cloudiness over Nashville in 1999*, *Journal of Geophysical Research*, 108, 1–7.
- Bartoszek K., Łachowski W., Matuszko D., 2023, *The increase in the proportion of impervious surfaces and changes in air temperature, relative humidity and cloud cover in Poland*, *Quaestiones Geographicae*, 42, 29–45.
- Boucher O.D., Randall P., Artaxo C., Bretherton G., Feingold P., Forster V.-M., Kerminen Y., Kondo H., Liao U., Lohmann P., Rasch S.K., Satheesh S., Sherwood B., Stevens B., Zhang X.Y., 2013, *Clouds and aerosols* [w:] T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (red.), *Climate change 2013. The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom–New York.

- Braham R.R., 1974, *Cloud Physics of Urban Weather Modifications – A Preliminary Report*, University of Chicago, Cloud Physics Laboratory, Bulletin American Meteorological Society, 55(2), 100–106.
- Braham R.R., Wilson D., 1977, *Effects of St. Louis on Convective Cloud Heights*, University of Chicago, Cloud Physics Laboratory, Journal of Applied Meteorology, 17, 87–592.
- Dennis A.S., 1980, *Weather Modification by Cloud Seeding*, International Geophysics Series, Academic Press, 24.
- Dischl R., Kaufmann S., Voigt C., 2022, *Regional and Seasonal Dependence of the Potential Contrail Cover and the Potential Contrail Cirrus Cover over Europe*, Aerospace, 9, 485.
- Ek M., Mahrt L., 1994, *Daytime Evolution of Relative Humidity at the Boundary Layer Top*, Monthly Weather Review, 122, 2701–2721.
- Filipiak J., 2021, *Change of Cloudiness* [w:] Falarz M. (red.), Climate change in Poland: past, present, future, Springer Climate, Sz wajcaria, 217–274.
- Henderson-Sellers A., 1986, *Increasing cloud in a warming world*, Climatic Change, 9(3), 267–309.
- Hughes N.A., 1984, *Global cloud climatologies: a historical review*, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 23, 724–751.
- Kossowska-Cezak U., 1978, *Próba określenia wpływu zabudowy miejskiej na wielkość zachmurzenia (na przykładzie Warszawy)*, Prace i Studia IG, UW, 25, 55–64.
- Lee D.S., Fahey W.D., Skowron A., Allen R.M., Burkhardt U., Chen Q., Doherty J.S., Freeman S., Forster M.P., Fuglestvedt J., Gettelman A., León De R.R., Lim L.L., Lund T.M., Millar J.R., Owen B., Penner E.J., Pitari G., Prather J.M., Sausen R., Wilcox J.L., 2021, *The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018*, Atmospheric Environment, 244.
- Lewik P., Matuszko D., Morawska-Horawska M., 2010, *Multi-annual variability of cloudiness and sunshine duration in Kraków between 1826 and 2005* [w:] R. Przybylak, J. Majorowicz, R. Brázdil, M. Kejna (red.), *The Polish Climate in the European Context: An Historical Overview*, Springer, Dordrecht, 341–353.
- Maleshko V.P., Wetherald R.T., 1981, *The effect of a geographical cloud distribution on climate: a numerical experiment with an atmospheric general circulation model*, Journal of Geophysical Research, 86, 11995–12014.
- Mather G.K., Terblanche D. E., Steffens F. E., Fletcher L., 1997, *Results of the South African Cloud-Seeding Experiments Using Hygroscopic Flares*, Journal of Applied Meteorology, 36, 1433–1447.
- Matuszko D., 2001, *Wpływ miasta na zachmurzenie i opady (na przykładzie Krakowa)* [w:] K. German, J. Balon (red.), *Przemiany środowiska przyrodniczego Polski a jego funkcjonowanie, Problemy ekologii krajobrazu*, 10, IGIGP UJ, Kraków, 529–536.
- Matuszko D., 2009, *Wpływ zachmurzenia na usłonecznienie i całkowite promieniowanie słoneczne (na przykładzie krakowskiej serii pomiarów)*, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków.
- Matuszko D., 2014, *Chmury jako element krajobrazu* [w:] W. Ziaja, M. Jodłowski (red.), *Struktura środowiska przyrodniczego a fizjonomia krajobrazu*, IGIGP UJ, Kraków.

- Matuszko D., 2018, *Chmury i pogoda. Nowa międzynarodowa klasyfikacja chmur*, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków.
- Matuszko D., Bartoszek K., Soroka J., 2022, *Long-term variability of cloud cover in Poland (1971–2020)*, *Atmospheric Research*, 268, 1–13.
- Matuszko D., Piotrowicz K., Kowanetz L., 2015, *Klimat* [w:] M. Baścik., B. Degórska (red.), Środowisko przyrodnicze Krakowa. *Zasoby, Ochrona, Kształtowanie*, IGiGP UJ, Kraków, 81–104.
- Matuszko D., Węglarczyk S., 2014, *Effect of cloudiness on long-term variability in air temperature in Kraków*, *International Journal of Climatology*, 34, 145–154.
- Matuszko D., Węglarczyk S., 2018, *Long-term variability of the cloud amount and cloud genera and their relationship with circulation (Kraków, Poland)*, *International Journal of Climatology*, 38, 1205–1220.
- Niedźwiedz T., 1981, *Sytuacje synoptyczne i ich wpływ na zróżnicowanie przestrzenne wybranych elementów klimatu w dorzeczu górnej Wisły*, *Rozprawy Habilitacyjne UJ*, 58, Kraków.
- Norris J.R., Slingo A., 2009, *Trends in observed cloudiness and Earth's radiation budget: What do we not know and what do we need to know?*, [w:] J. Heintzenberg, R.J. Charlson (red.), *Clouds in the Perturbed Climate System*, MIT Press, Cambridge, MA, 17–36.
- Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J. A., 2017, *Urban Climates*, Cambridge University Press, Cambridge, 270–293.
- Piotrowski P., 2017, *Atlas chmur i pogody*, Wydawnictwo SBM, Warszawa.
- Stordal F., Myhre G., Stordal E.J.G., Rossow W.B., Lee D.S., Arlander D.W., Svendby T., 2005, *Is there a trend in cirrus cloud cover due to aircraft traffic?*, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 2155–2162.
- Theeuwes N.E., Barlow F.J., Teuling J.A., Grimmond B.S.C., Kotthaus S., 2019, *Persistent cloud cover over mega-cities linked to surface heat release*, *Climate and Atmospheric Science*, 15, 1–6.
- Theeuwes N., Boutle A.I., Clark P., Grimmond B.S.C., 2021, *Understanding London's Summertime Cloud Cover*, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148, 454–465.
- Warren S.G., Eastman R.M., Hahn C.J., 2007, *A survey of changes in cloud cover and cloud types over land from surface observations, 1971–96*, *Journal of Climate*, 20, 717–738.
- WMO, 2017, *International Cloud Atlas. In Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors*, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, No. 407, <https://www.wmocloudatlas.org>.
- Wypych A., 2007, *Wilgotność powietrza* [w:] Matuszko D. (red.), *Klimat Krakowa XX wieku*, IGiGP UJ, Kraków, 113–125.
- Żmudzka E., 2007, *Zmienność zachmurzenia nad Polską i jej uwarunkowania cyrkulacyjne (1951–2000)*, Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.

Strony internetowe

European Industrial Emissions Portal, <https://industry.eea.europa.eu/industrialsite/environmentalinformation?siteInspireId=PL.M%C5%9A%2F000000373.SITE&siteName=Site%20nr%20373&siteReportingYear=2021> (dostęp: 15.05.2023).

Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego, *Komentarz synoptyka*, <http://meteo.icm.edu.pl/komentarze/index.php> (dostęp: 15.05.2023).

LoveKraków.pl, *Czego nie wiesz o kominach elektrociepłowni*, https://lovekrakow.pl/aktualnosci/czegoniewieszokominachelektrociepowni_30822.html (dostęp: 15.05.2023).

Arkadiusz Duda

Dorota Matuszko

Uniwersytet Jagielloński

Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej

ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków

d.matuszko@uj.edu.pl

ORCID: 0000-0003-1909-6519

