

CHARAKTERYSTYKA WARUNKÓW METEOROLOGICZNYCH I CHWIEJNOŚCI ATMOSFERY W WYBRANYCH DNIACH Z BURZĄ W ŁODZI W LATACH 2019–2023

The characteristics of meteorological conditions and atmospheric instability conditions
on selected thunderstorm days in Łódź in 2019–2023

NATALIA ROSIŃSKA¹ , MARIUSZ SIEDLECKI² 

Zarys treści. Podstawowym celem badawczym pracy jest charakterystyka wartości wskaźników chwiejności atmosfery w dniach z burzą w Łodzi. Do oceny stanu chwiejności atmosfery i prawdopodobieństwa burz wykorzystano: wskaźnik CAPE (*Convective Available Potential Energy*) oraz indeksy KI, TTI (*Total Totals Index*) oraz SWEAT (*Severe Weather Treat Indeks*). Wskaźniki te zostały wyznaczone na podstawie radiosondaży wykonanych na dwóch stacjach aerologicznych: w Legionowie i we Wrocławiu, oddalonych od Łodzi odpowiednio o 120 km i o 185 km. Badania przeprowadzono na podstawie 90 przypadków burz w latach 2019–2023.

Uzyskane wyniki pokazały, że analizowane wskaźniki osiągały wysokie wartości, wskazujące na znaczną chwiejność atmosfery i duże prawdopodobieństwo wystąpienia burz. Wartość mediany dla miesięcy letnich wskaźnika KI osiągnęła poziom 30–32, a wskaźnika TTI wyniosła 45–48. Są to wartości wskazujące jednoznacznie silną niestabilność atmosfery i wysokie prawdopodobieństwo burz. Natomiast charakterystyka wskaźnika CAPE pokazała, że burze wystąpiły przy bardzo dużym zróżnicowaniu wartości tego indeksu. Wyznaczone wartości mediany (dla pomiarów wykonanych w godzinach dziennych) zawierały się w przedziale 100–500 J·kg⁻¹.

Słowa kluczowe: burze, warunki chwiejności atmosfery, całkowita energia chwiejności, wskaźniki chwiejności

Abstract. The main goal of this work is to characterise the values of atmospheric instability indicators on storm days in Łódź. The assessment of atmospheric instability indices and the probability of thunderstorms were based on instability indices: the CAPE (*Convective Available Potential Energy*), KI, TTI (*Total Totals Index*) and SWEAT (*Severe Weather Treat Indeks*) indices. These indicators were determined on the basis of radio soundings carried out at two aerological stations in Legionowo and Wrocław, located 120 km and 185 km from Łódź, respectively. The research was based on 90 storm events in 2019–2023.

The results showed that the analysed indicators reached high values indicating high instability and high probability of storms. The median value for the summer months of the KI index reached the level of 30–32 and the TTI index was 45–48. These values clearly indicate strong atmospheric instability and a high probability of storms. However, the characteristics of the CAPE index showed that storms occurred with a very large variation in the value of this index. The determined median values (for measurements performed during daylight hours) were in the range of 100–500 J·kg⁻¹.

Key words: storms, instability conditions, convective potential energy, instability indices

Wstęp

Charakterystyka warunków chwiejności atmosfery jest istotna dla lepszego zrozumienia zjawisk burzowych oraz stanowi podstawę do prognozowania i wydawania ostrzeżeń o tego typu zjawiskach atmosferycznych. Potencjalne skutki intensywnych układów burzowych, takie jak opady na-

walne, gradobicia, silne wiatry czy wezbrania powodzienne, mogą stanowić zagrożenie dla życia i mienia ludności. Badania z tego zakresu stają się również bardzo istotne z punktu widzenia obserwowanych i przyszłych zmian klimatu. Na przykład Brooks (2013) lub Allen (2018) wskazują wzrost częstości chwiejności atmosfery pod wpływem zachodzących zmian klimatu.

¹ Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Studia na kierunku: Geomonitoring; ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź; e-mail: natalia.rosinska@edu.uni.lodz.pl, ORCID: 0009-0003-1960-6379

² Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Instytut Klimatologii i Hydrologii, Zakład Meteorologii i Klimatologii, ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź; e-mail: mariusz.siedlecki@geo.uni.lodz.pl, ORCID: 0000-0002-5804-8985

W badaniach nad burzami i ich potencjalnymi skutkami można wyróżnić kilka głównych nurtów. Jednym z nich jest klimatologia tego typu zjawisk przedstawiająca ich czasową i przestrzenną zmienność. Na przykład Kafar (1998) na podstawie obserwacji w latach 1951–1992 pokazuje, że w Łodzi w czerwcu i lipcu notuje się średnio po 5–6 dni z burzami. Natomiast szersze badania nad zmiennością przestrzenną wskazują, że najwięcej burz w Polsce (średnio 30 w roku) notowanych jest w rejonach górskich (Bielec-Bąkowska 2003). Podobną tendencję potwierdzają nowsze opracowania wykorzystujące zarówno tradycyjne obserwacje na stacjach meteorologicznych (np. Kolendowicz 2012; Bielec-Bąkowska 2013) jak i systemy detekcji wyładowań atmosferycznych (np. Taszarek, Czarnecki 2015) czy wyniki reanalizy danych meteorologicznych (Taszarek i in. 2019).

Burze rozwijają się, gdy w dolnej troposferze utrzymuje się wysoka wilgotność powietrza, występuje duża różnica temperatury pomiędzy dolną i środkową troposferą oraz pojawiają się czynniki (na przykład duże uskoki wiatru) generujące wznoszenie pionowe powietrza do poziomu swobodnej konwekcji. W celu precyzyjnego określenia wyżej wymienionych warunków wykorzystuje się sondáže aerologiczne, na podstawie których wyznacza się szereg tzw. wskaźników chwiejności, których wartości określają parametry atmosfery umożliwiające rozwój burz. Badania nad określeniem związku pomiędzy wartością wskaźników chwiejności atmosfery i intensywnością burz, wystąpieniem trąb powietrznych i opadów gradu potwierdzają wzrost prawdopodobieństwa zjawisk niebezpiecznych wraz ze wzrostem wartości wybranych wskaźników chwiejności. Na przykład w północnych Włoszech w dniach z burzami, szkwałem lub deszczem nawalnym średnia wartość indeksu KI wynosi 28, a wskaźnika CAPE równa się $160 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Manzato 2003). W podobnych badaniach dla obszaru Grecji (Dalezios, Papananolis 1991) wykazano, że najwyższe prawdopodobieństwo wystąpienia opadów gradu zachodzi wówczas, gdy KI przekracza wartość 25, a indeks $\text{TTI} > 44$. Analiza 77 przypadków silnych burz nad Czechami wskazała, że w dniach, gdy te burze wystąpiły, wartości percentyla 80. i 90. indeksu KI wyniosły odpowiednio 30,2 i 31,4, a wartości 80. i 90. percentyla wskaźnika CAPE sięgnęły odpowiednio 322 i $905 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Pešice i in. 2003). Na podstawie dni z burzami i opadami gradu z lat 1986–2003 badacze niemieccy ustalili wartości progowe wskaźników dla 70% prawdopodobieństwa wystąpienia burz na: CAPE – $1860 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, TTI – 53, a KI – 32 (Kunz 2007).

Burze i towarzyszące im pogody niebezpieczne rozwijają się w określonych sytuacjach synoptycznych, które doprowadzają do zaistnienia wspomnianych wcześniej warunków kształtujących rozwój silnych zjawisk konwekcyjnych. Badania te pokazują, że najczęściej do wystąpienia tego typu zjawisk dochodzi na froncie chłodnym (np. Van Delden 2001; Kolendowicz 2006; Kolendowicz 2012).

Podstawowym celem badawczym pracy jest próba oszacowania wartości progowych wybranych wskaźników chwiejności atmosfery, przy których w Łodzi i okolicach notowane są burze. Wyniki takich badań mogą wspomóc proces prognozowania tego typu zjawiska. Jednakże z uwagi na dość rzadką sieć stacji aerologicznych w badaniach nad wykorzystaniem wyników sondáže aerologicznych w ocenie prawdopodobieństwa wystąpienia pogód niebezpiecznych dużym problemem jest odległość do najbliższej stacji pomiarowej. Ten czynnik sprawia, że w wielu przypadkach konieczne jest indywidualne (dla wybranego regionu) określenie związku pomiędzy wartościami wskaźników chwiejności pochodzących z najbliższych stacji aerologicznych, a pojawieniem się burzy lub innych pogód niebezpiecznych.

Dane i metody

Ocenę warunków chwiejności przeprowadzono dla wybranych dni z burzą w Łodzi lub najbliższej okolicy. Informacje o dniach z burzą uzyskano z depesz SYNOP ze stacji Łódź publikowanych w serwisie OGIMET (2024). Kryterium wybranych przypadków badanych dni z burzą stanowiły bezpośrednie obserwacje autorki pracy w ramach działalności w „Łowcy Burz Łódzkie” oraz przypadki silnych zdarzeń burzowych. W ten sposób w okresie od marca 2019 roku do sierpnia 2023 roku wybrano łącznie 90 dni z burzą. Dodatkowo przy weryfikacji informacji o burzach korzystano z wyników systemu detekcji wyładowań atmosferycznych PERUN, nadzorowanego przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB). Do ogólnej charakterystyki warunków pogodowych wykorzystano dane o podstawowych parametrach charakteryzujących warunki pogodowe w dniach z burzą, takich jak: temperatura maksymalna, temperatura minimalna oraz wilgotność względna powietrza.

Wartości wskaźników chwiejności atmosfery wyznaczono na podstawie sondáže aerologicznych (z terminów 00 i 12 UTC) wykonywanych

w Legionowie i we Wrocławiu w latach 2019–2023. Wyniki pomiarów uzyskano z baz danych Department of Atmospheric Science University of Wyoming (2023).

Z sondaży aerologicznych zaczerpnięto wybrane wskaźniki chwiejności atmosfery pozwalające określić stan chwiejności, jak i prawdopodobieństwo pojawienia się burzy. Przy czym w badaniach nie uwzględniano godziny wystąpienia burzy. Takie podejście niestety ma ten mankament, że rzeczywiste warunki atmosferyczne, w jakich formowała się burza, mogły być ze względu na swą dynamikę inne niż te, które wskazywały sondaże aerologiczne dla danego dnia z burzą.

Pierwszym wskaźnikiem jest indeks CAPE – *Convective Available Potential Energy*, który określa dodatnią energię chwiejności, czyli ilość energii w atmosferze, jaka może być zużyta na rozwój ruchów wstępujących. Wskaźnik ten jest obliczany na podstawie następującego wzoru (Bąkowski 2005):

$$CAPE = g \sum_{LFC}^{EL} (\Delta h \frac{T_{vp} - T_{vs}}{T_{vs}}) \quad (1)$$

gdzie:

Δh – przyrost wysokości [m],

g – przyspieszenie grawitacyjne [$m \cdot s^{-2}$],

T_{vp} – temperatura wirtualna adiabaticznie wznoszącej się komórki powietrza [$^{\circ}C$],

T_{vs} – temperatura wirtualna uzyskana z sondażu aerologicznego [$^{\circ}C$],

LFC – poziom swobodnej konwekcji [hPa],

EL – poziom wyrównania [hPa].

Wyższe wartości indeksu CAPE oznaczają wyższą energię chwiejności, która może być zużyta na rozwój ruchów pionowych powietrza, a tym samym siłę chwiejności atmosfery (tab. 1).

Z uwagi na złożony mechanizm rozwoju burz i problem zdefiniowania warunków początkowych dla krzywej stanu w wyznaczaniu wartości wskaźnika CAPE zastosowanie w prognozowaniu tego zjawiska znajdują inne wskaźniki, oparte na charakterystyce temperatury i wilgotności powietrza na określonych poziomach barycznych.

Wskaźnik TTI bierze pod uwagę różnicę temperatury powietrza na poziomie 850 i 500 hPa, a także różnicę temperatury punktu rosy na poziomie 850 hPa i temperatury na poziomie 500 hPa (Bąkowski 2005):

$$TTI = (T_{850} - T_{500}) + (Td_{850} - T_{500}) \quad (2)$$

gdzie:

Td_{850} – temperatura punktu rosy na poziomie 850 hPa [$^{\circ}C$],

T_{500} – temperatura powietrza na poziomie 500 hPa [$^{\circ}C$],

T_{850} – temperatura powietrza na poziomie 850 hPa [$^{\circ}C$].

Indeks KI (Waihtinga) dodatkowo poszerza ocenę warunków chwiejności o warunki wilgotności na poziomie 700 hPa. Wyliczony jest na podstawie formuły (Bąkowski 2005):

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + (Td_{850} - Tdd_{700}) \quad (3)$$

gdzie:

Tdd_{700} – różnica temperatury i temperatury punktu rosy na poziomie 700 hPa [$^{\circ}C$].

Tabela 1

Chwiejność atmosfery szacowana na podstawie wskaźnika CAPE (Bąkowski 2005)

Atmosphere instability estimated based on CAPE index (Bąkowski 2005)

CAPE [$J \cdot kg^{-1}$]	Chwiejność atmosfery/ <i>Atmosphere instability</i>
0–999	Słaba
1000–2500	Umiarkowana
2500–4000	Silna
>4000	Ekstremalna

Tabela 2

Występowanie zjawisk konwekcyjnych określone na podstawie wskaźników TTI i KI
The occurrence of convective phenomena determined on the basis of TTI and KI indices

TTI	Zjawiska konwekcyjne/ <i>Convective phenomena</i>	KI	Prawdopodobieństwo burz/ <i>Probability of thunderstorms</i>
<40	Stabilność	<15	0%
40–43	Rzadkie burze	15–20	<20%
44–45	Izolowane burze	21–25	20–40%
46–47	Miejscami burze	26–30	40–60%
48–49	Miejscami burze, lokalnie silnie	31–35	60–80%
50–55	Miejscami silne burze, możliwość wystąpienia trąby powietrznej	36–40	80–90%
>56	Silne i liczne burze, miejscami trąby powietrzne	>40	bliskie 100%

Tabela 3

Interpretacja wartości wskaźnika SWEAT
Interpretation of the SWEAT index value

SWEAT	Zjawiska konwekcyjne/ <i>Convective phenomena</i>
< 150	atmosfera stabilna
150–300	niewielkie ryzyko wystąpienia burz
300–400	umiarkowane ryzyko wystąpienia burz, możliwe wystąpienie umiarkowanie silnych burz
>400	duże ryzyko wystąpienia intensywnych burz, możliwość wystąpienia trąb powietrznych

Zależność pomiędzy wartościami indeksów TTI i KI, a zjawiskami konwekcyjnymi przedstawia tabela 2.

W rozwoju burz bardzo ważnym czynnikiem są również zmiany kierunku i prędkości wiatru w przekroju pionowym atmosfery. Warunki te uwzględnia kolejny wskaźnik SWEAT – *Severe Weather Threat Indeks*:

$$\text{SWEAT} = 12T_{d_{850}} + 20(\text{TTI} - 49) + 2V_{850} + V_{500} + (\sin(\text{dd}_{500} - \text{dd}_{850}) + 0,2) \quad (4)$$

gdzie:

V_{850} , V_{500} – prędkość wiatru na poziomach 850 i 500 hPa,

dd_{850} , dd_{500} – kierunek wiatru na poziomach 850 i 500 hPa.

Wysokie wartości wskaźnika SWEAT określają warunki wystąpienia burz o różnym natężeniu i trąb powietrznych. Dokładną interpretację wartości wskaźnika SWEAT przedstawiono w tabeli 3.

Z uwagi na dużą częstość burz w sezonie letnim charakterystykę wskaźników chwiejności atmosfery w dniach z burzą przeprowadzono oddzielnie dla każdego miesiąca od maja do sierpnia. Natomiast w porze zimowej, wczesną wiosną i jesienią burze są stosunkowo rzadkie. Dlatego też te przypadki (w sumie 13) przeanalizowano łącznie.

Wyniki

Burze w Polsce najczęściej występują w sezonie letnim. Wysoka temperatura i duża wilgotność powietrza stanowią podstawowe czynniki umożliwiające ich rozwój. Ogólna charakterystyka warunków termicznych (na podstawie corocznych raportów publikowanych przez IMGW-PIB 2023) w środkowej Polsce pokazuje, że kolejne sezony letnie (w latach 2019–2023) można ocenić jako ciepłe (na tle średniej z okresu 1991–2020). Anomalie miesięczne temperatury powietrza (od

czerwca do sierpnia) zwykle były dodatnie na poziomie 0,5–2,0°C (IMGW-PIB 2023). Natomiast opady atmosferyczne cechowały się większym zróżnicowaniem. Na przykład sumy miesięczne od maja do sierpnia w 2019 roku stanowiły od 30% do 80% normy z okresu 1990–2020. Z kolei w latach 2020–2023 opady miesięczne w sierpniu stanowiły 150–300% średniej sumy z lat 1990–2020 (IMGW-PIB 2023). Ocena warunków termicznych na stacji Łódź-Lublinek pokazuje, że średnie miesięczne temperatury maksymalne (Tmax) w maju, w kolejnych latach zmieniają się w zakresie 16–20°C, natomiast w czerwcu, lipcu i sierpniu zawierają się w przedziale 23–30°C (tab. 4). Średnia miesięczna temperatura minimalna (Tmin) w okresie czerwiec–sierpień była wyższa od 10°C. Natomiast w maju wartości te były niższe i zawierały się w przedziale 4–7°C. Pod względem warunków higrycznych sezon od maja do sierpnia charakteryzuje się dość zbliżonymi wartościami. Średnie miesięczne wartości wilgotności względnej zawierały się w przedziale 60–80% (tab. 4).

Wysoka temperatura i duża zawartość pary wodnej w dolnej troposferze sprzyjają rozwojowi konwekcji atmosfery i stanowią zasoby ciepła i pary wodnej dla tworzących się chmur burzowych. Charakterystyka warunków termicznych w analizowanych dniach z burzą pokazuje, że średnia temperatura maksymalna w miesiącach od czerwca do sierpnia była wyższa od 26°C (tab. 5). O dużych zasobach ciepła w dolnej troposferze świadczy również temperatura minimalna. W ba-

danym okresie w wybranych dniach z burzą średnia temperatura minimalna zawierała się w przedziale 14,6–16,0°C. Natomiast wartości odchylenia standardowego Tmax na poziomie około 3°C i Tmin w zakresie 2,3–2,7°C, stanowiące 11–16% uzyskanych średnich miesięcznych, pokazują małe zróżnicowanie warunków termicznych związanych z wystąpieniem pogód konwekcyjnych (tab. 5). Warto również podkreślić, że te wartości temperatury minimalnej i temperatury maksymalnej w dniach z burzą były najczęściej wyższe od średnich miesięcznych temperatur maksymalnych i minimalnych temperatur w sezonie letnim analizowanego okresu (tab. 4). Potwierdza to wystąpienie wysokich zasobów ciepła zużywanych na rozwój chwiejności atmosfery i tworzenie się pogód burzowych.

Charakterystyka zasobów pary wodnej pokazuje, że średnia wilgotność względna w wybranych dniach z burzą w Łodzi w kolejnych miesiącach sezonu letniego osiągnęła wartości z przedziału 70–76%. Również wartości odchylenia standardowego na poziomie 10–15% potwierdzają, że zmienność warunków wilgotności powietrza (stosunek odchylenia standardowego do średniej arytmetycznej) jest na podobnym poziomie co w przypadku warunków termicznych (tab. 5). Co więcej, porównanie wartości wilgotności względnej w dniach z burzą z wartościami średnimi miesięcznymi potwierdza warunek wysokiej wilgotności powietrza sprzyjający burzom (tab. 4).

Tabela 4

Średnie miesięczne temperatury maksymalne (Tmax), temperatury minimalne (Tmin) i wilgotność względna (RH) w latach 2019–2023 na stacji Łódź-Lublinek

Monthly mean of maximum temperatures (Tmax), minimum temperatures (Tmin) and relative humidity (RH) in 2019–2023 at the Łódź-Lublinek station

	Rok/Year	V/May	V/June	VII/July	VIII/August
Tmax [°C]	2019	17,6	29,1	24,9	26,9
	2020	16,7	23,2	24,2	25,5
	2021	17,2	25,9	26,5	21,9
	2022	19,9	24,7	25,3	26,4
	2023	18,8	24,5	26,4	25,5
Tmin [°C]	2019	7,2	14,7	12,6	13,8
	2020	4,7	13,7	12,3	13,8
	2021	6,8	12,1	15,6	11,8
	2022	6,3	12,3	12,6	14,8
	2023	6,8	10,7	12,9	14,7
RH [%]	2019	73,1	60,0	63,3	65,6
	2020	68,0	75,9	70,2	70,5
	2021	72,7	66,7	76,1	83,1
	2022	62,0	69,2	68,3	75,1
	2023	61,1	63,7	65,0	74,7

Tabela 5

Średnia miesięczna (μ) i odchylenie standardowe (σ) temperatury maksymalnej (Tmax), temperatury minimalnej (Tmin) oraz wilgotności względnej (RH) w dniach z burzą w Łodzi
 Monthly mean (μ) and standard deviation (σ) of maximum temperature (Tmax), minimum temperature (Tmin) and relative humidity (RH) on days with a storm in Łódź

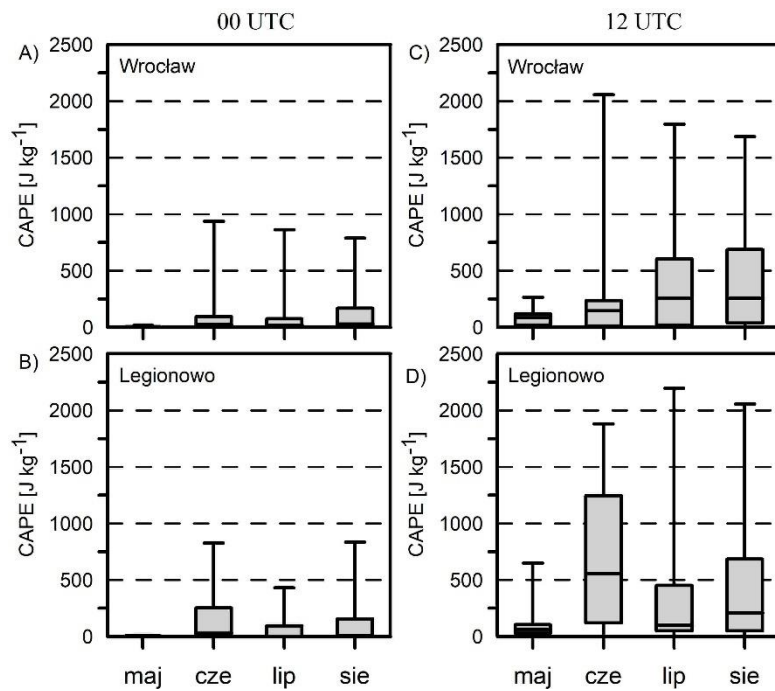
		V/May	VI/June	VII/July	VII/August
Tmax [°C]	μ	20,1	26,6	27,2	26,4
	σ	5,2	3,6	3,2	3,6
Tmin [°C]	μ	7,3	15,4	14,6	16,0
	σ	3,0	2,5	2,3	2,7
RH [%]	μ	69,4	72,0	70,3	76,1
	σ	10,0	15,1	11,3	9,3

Wysokie wartości zastosowanych wskaźników chwiejności oznaczają warunki silnej chwiejności atmosfery i wysokie prawdopodobieństwo pojawienia się burz. W analizowanym okresie w wybranych dniach z burzą w Łodzi najwyższe wartości CAPE obserwowane były od czerwca do sierpnia (rys. 1A–D), przy czym wyższą energią chwiejności cechują się obserwacje wykonane w godzinach dziennych (12 UTC). Na przykład wartości mediany w kolejnych miesiącach (od maja do sierpnia) zmieniały się w zakresie 50–550 J·kg⁻¹ (rys. 1CD) podczas gdy w godzinach nocnych wartości te zawierały się w przedziale 0–23 J·kg⁻¹ (rys. 1AB). Porównując wyznaczone statystyki miesięczne wskaźnika CAPE (mediana, kwartyl 1 i 3) w maju, lipcu i sierpniu, stwierdzono, że wyższą chwiejnością atmosfery charakteryzuje się Wrocław. Natomiast w czerwcu na stacji Legionowo mediana wartości wskaźnika CAPE osiągnęła poziom 550 J·kg⁻¹, a wartość kwartyla 3 osiągnęła poziom 1200 J·kg⁻¹ (oznaczający warunki średniej chwiejności). Dodatkowo warto zwrócić uwagę na różnicę pomiędzy kwartylem 3 i 1. Rozstęp międzykwartylowy na poziomie 1000 J·kg⁻¹ oznacza dużą zmienność wartości CAPE w dniach z burzą na początku okresu letniego (rys. 1C). Najwyższe wartości wskaźnika CAPE w godzinach dziennych we Wrocławiu osiągnęły poziom 1600–2000 J·kg⁻¹. W Legionowie wartości maksymalne w miesiącach od czerwca do sierpnia zawierały się w przedziale 1800–2200 J·kg⁻¹ (rys. 1D).

Przeprowadzona w wybranych dniach z burzą charakterystyka miesięczna wartości wskaźnika KI pokazuje mniejsze różnice w stosunku do wartości indeksu CAPE pomiędzy pomiarami dziennymi i nocnymi (rys. 2A–D). Wartości mediany wskaźnika KI w analizowanych dniach z burzą w Łodzi na podstawie obserwacji z termi-

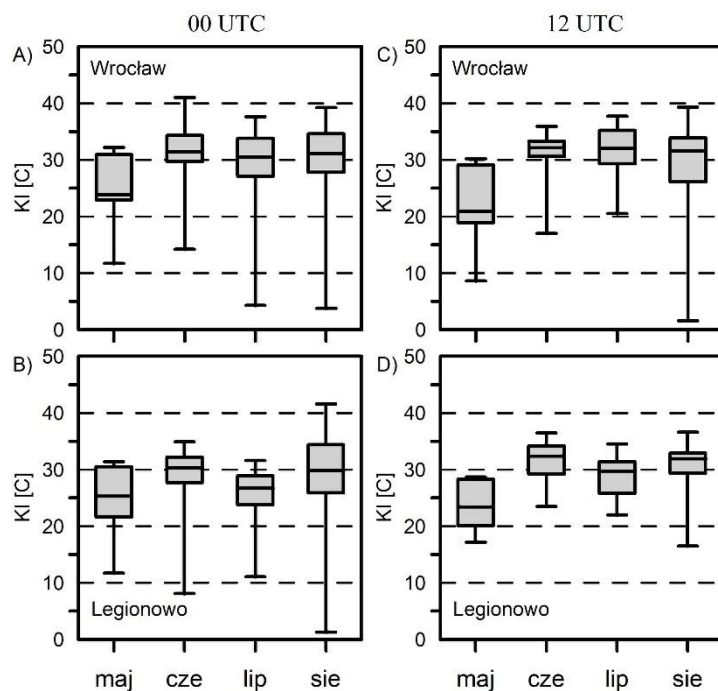
nu 00 UTC zawierają się w przedziale 26–31 (rys. 2AB). Wyniki otrzymane na podstawie pomiarów dziennych zawierały się w przedziale 30–34,4 (rys. 2CD). Wartości KI>30 oznaczają wysokie prawdopodobieństwo burz (tab. 1). W miesiącach letnich w wybranych dniach z burzą 60–80% sondaży z terminu dziennego osiągało taką wartość zarówno na stacji Legionowo, jak i stacji Wrocław. W przypadku sondaży nocnych liczba przypadków z tak wysokimi wartościami KI jest niższa – od 10% do 50% obserwacji w przypadku stacji Legionowo i 60–65% w przypadku pomiarów we Wrocławiu. W maju zarówno w przypadku obserwacji nocnych, jak i dziennych wartości wskaźnika KI są niske. Wartości mediany zawierają się w przedziale 20–25. Warto również podkreślić wysoką wartość różnicy pomiędzy kwartylem 1 i 3. Może to wskazywać na duże zróżnicowanie warunków prowadzących do powstania burz w tym miesiącu.

Wartości wskaźnika TTI poniżej 40 oznaczają brak możliwości rozwoju burz ze względu na stabilną równowagę atmosfery (tab. 2). W analizowanych dniach z burzą w Łodzi takie wartości otrzymane na podstawie sondaży we Wrocławiu i w Legionowie były bardzo rzadkie (zwykle po 1–2 przypadki w miesiącu). Natomiast zdecydowana większość wartości TTI wskazywała na możliwość pojawienia się burzy. Od czerwca do sierpnia wartość mediany tego wskaźnika zawierała się w przedziale 45–48, co oznacza możliwość wystąpienia umiarkowanych i silnych burz (rys. 3A–D). Warto również podkreślić, że w przypadku sondaży wykonanych w terminie 12 UTC wartości kwartyla 1 osiągały poziom 44–47, co oznacza, że 75% wykonanych sondaży wskazywało warunki wystąpienia burzy (rys. 3CD). Najwyższe wartości wskaźnika TTI w wybranych dniach notowane były w maju. War-



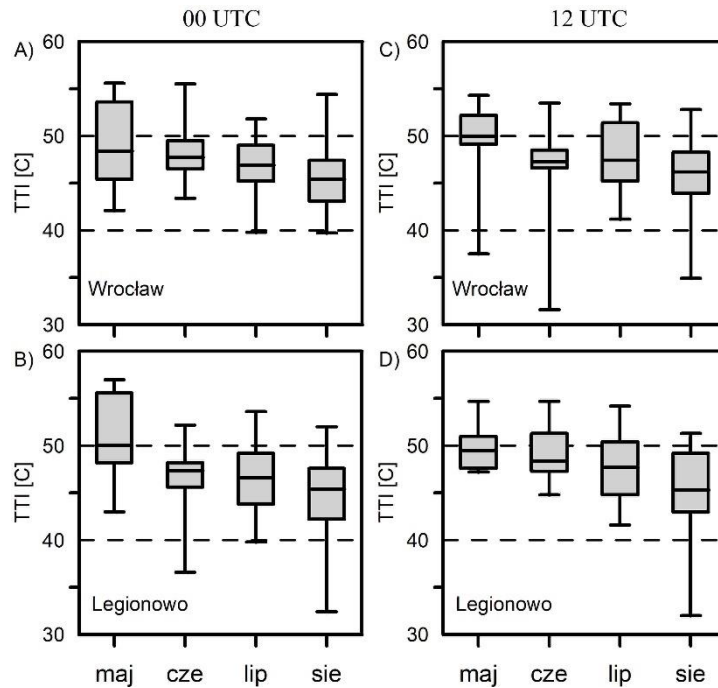
Rys. 1. Wybrane statystyki miesięczne (mediana, wartość 1 i 3 kwartyla oraz wartość minimalna i maksymalna) wskaźnika CAPE w dniach z burzą we Wrocławiu (A, C) i Legionowie (B, D) w latach 2019–2023

Selected monthly statistics (median, value of the 1st and 3rd quartiles and minimum and maximum value) of the CAPE indicator on days with a storm in Wrocław (A, C) and Legionowo (B, D) in 2019–2023



Rys. 2. Wybrane statystyki miesięczne (mediana, wartość 1 i 3 kwartyla oraz wartość minimalna i maksymalna) wskaźnika KI w dniach z burzą we Wrocławiu (A, C) i Legionowie (B, D) w latach 2019–2023

Selected monthly statistics (median, value of the 1st and 3rd quartiles and minimum and maximum value) of the KI indicator on days with a storm in Wrocław (A, C) and Legionowo (B, D) in 2019–2023



Rys. 3. Wybrane statystyki miesięczne (mediana, wartość 1 i 3 kwartyla oraz wartość minimalna i maksymalna) wskaźnika TTI w dniach z burzą we Wrocławiu (A, C) i Legionowie (B, D) w latach 2019–2023

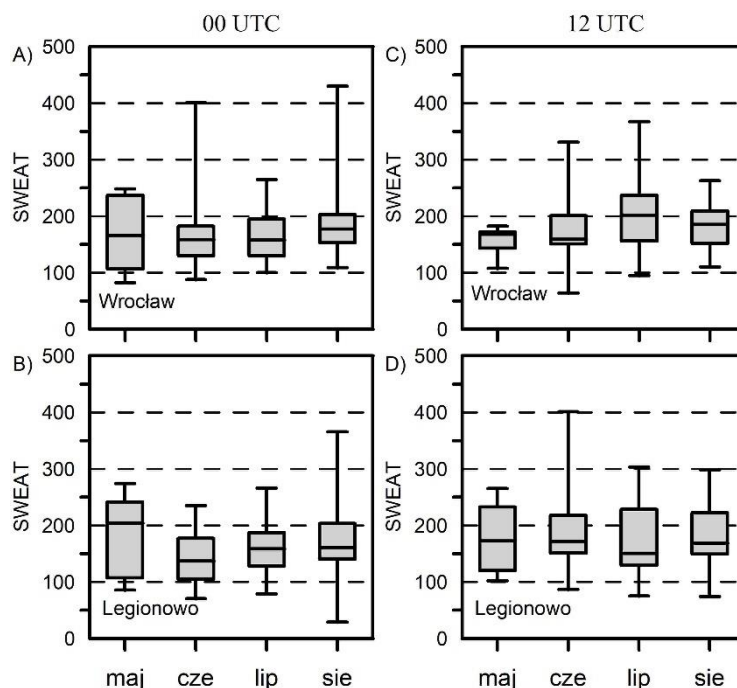
Selected monthly statistics (median, value of the 1st and 3rd quartiles and minimum and maximum value) of the TTI indicator on days with a storm in Wrocław (A, C) and Legionowo (B, D) in 2019–2023

tość mediany osiągnęła w tym miesiącu poziom 48–50, a 25% sondaży aerologicznych z najwyższymi wartościami (kwartył 3) na obu stacjach w takich dniach wskazało wartości TTI powyżej 52, co oznacza możliwość wystąpienia silnych burz (rys. 3A–D).

Wskaźnik SWEAT, oprócz warunków termicznych i higrycznych, uwzględnia także dynamikę kierunku i prędkość wiatru w przekroju pionowym atmosfery. Wartości wskaźnika poniżej 150 oznaczają atmosferę stabilną i małe prawdopodobieństwo wystąpienia burz. Analiza danych pokazała, że w przypadku sondaży nocnych na obu stacjach 25% wykonanych pomiarów (wartość kwartyla 1 poniżej 150) wskazywało na warunki atmosfery stabilnej. Dużo lepszą trafność w wystąpieniu burz w Łodzi dają wyniki uzyskiwane na podstawie sondażu dziennego. Liczba przypadków, gdy SWEAT jest niższe od 150 była mniejsza niż 20 na 74 przypadki burz w analizowanym okresie. Wyższe wartości indeksu SWEAT w dniach z burzą w czasie sondażu z terminu 12 UTC potwierdzają również wartości mediany (rys. 4AB). W kolejnych miesiącach od maja do sierpnia na obu stacjach osiągała ona poziom 160–200, co oznacza warunki niewielkiego prawdopodobieństwa wystąpienia burzy. Wartości wskaźnika SWEAT powyżej 300, uznawane

jako próg umiarkowanego prawdopodobieństwa burz, w analizowanych dniach z burzą wystąpiły bardzo rzadko, zanotowano tylko trzy we Wrocławiu i cztery w Legionowie takie przypadki.

Burze w rejonie Łodzi występują również w sezonie zimowym, wczesną wiosną i jesienią. Są to jednak zjawiska bardzo rzadkie. W badanym okresie w miesiącach od stycznia do kwietnia, a także we wrześniu i październiku łącznie takich przypadków odnotowano 16. Wartości wskaźników CAPE i KI w dniach z burzą w okresie zimy, wiosny i jesieni były niższe od tych notowanych w sezonie maj–sierpień. Mediana wartości wskaźnika całkowitej energii chwiejności w czasie pomiarów dziennych wyniosła $21 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ i $30 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ odpowiednio dla stacji Wrocław i Legionowo (tab. 5). Natomiast mediana wartości indeksu KI wyniosła odpowiednio 26 i 24 (tab. 5), podczas gdy w okresie letnim wartości te na obu stacjach były wyższe od 30 (rys. 2CD). W przypadku sondaży wykonanych w godzinach nocnych wartości te były jeszcze niższe (tab. 6). Warto również podkreślić, że wysokie wartości CAPE ($>400 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$), jak i indeksu KI wystąpiły w dwóch dniach z burzą we wrześniu. Były to warunki bardzo ciepłej pogody (temperatura maksymalna powyżej 26°C) przy adwekcji mas powietrza zwrotnikowego. Natomiast wartości wskaźników SWEAT i TT



Rys. 4. Wybrane statystyki miesięczne (mediana, wartość 1 i 3 kwartyła oraz wartość minimalna i maksymalna) wskaźnika TTI w dniach z burzą we Wrocławiu (A, C) i Legionowie (B, D) w latach 2019–2023

Selected monthly statistics (median, value of the 1st and 3rd quartiles and minimum and maximum value) of the TTI indicator on days with a storm in Wrocław (A, C) and Legionowo (B, D) in 2019–2023

Tabela 6

Wartości mediany (me), kwartyła 1 (Q1), kwartyła 3 (Q3) oraz wartości maksymalnej (max) analizowanych wskaźników chwiejności w miesiącach styczeń–kwiecień oraz we wrześniu i październiku na podstawie sondażu z terminu 12 UTC

Values of the median (me), value of the 1st (Q1) and 3th (Q3) quartiles and the maximum value (max) of the analyzed instability indicators in the months of January–April and in September and October based on the survey dated 12 UTC

	Wrocław				Legionowo			
	me	Q1	Q3	max	me	Q1	Q3	max
CAPE	21,02	1,24	78,21	542,50	29,77	12,67	219,40	597,50
KI	26,25	11,45	28,45	32,40	23,70	19,80	27,40	30,50
TTI	48,80	44,55	51,70	57,60	49,50	48,60	54,00	57,20
SWEAT	168,05	136,75	213,55	311,80	201,95	157,50	230,10	326,90

Tabela 7

Wartości mediany (me), kwartyła 1 (Q1), kwartyła 3 (Q3) oraz wartości maksymalnej (max) analizowanych wskaźników chwiejności w miesiącach styczeń–kwiecień oraz we wrześniu i październiku na podstawie sondażu z terminu 00 UTC

Values of the median (me), value of the 1st (Q1) and 3th (Q3) quartiles and the maximum value (max) of the analyzed instability indicators in the months of January–April and in September and October based on the survey dated 00 UTC

	Wrocław				Legionowo			
	me	Q1	Q3	max	me	Q1	Q3	max
CAPE	0,00	0,00	0,38	44,05	0,00	0,00	0,00	10,00
KI	20,55	15,30	26,28	30,60	12,35	-5,15	24,85	32,90
TTI	44,00	42,65	47,75	57,10	45,50	39,06	48,35	56,40
SWEAT	117,60	80,76	173,60	229,90	142,30	110,65	161,45	217,90

w porównaniu z miesiącami letnimi były stosunkowo wysokie. Na przykład mediana wartości wskaźnika TTI wyznaczonych na podstawie sondażu z terminu 12 UTC wyniosła 49 i 50 odpowiednio we Wrocławiu i w Legionowie (tab. 7). Natomiast w przypadku wskaźnika SWEAT 50% dni z burzą w okresie od września do kwietnia wystąpiło wówczas, gdy wartości tego wskaźnika przekraczały 170 we Wrocławiu i 200 w Legionowie.

Dyskusja

Badania nad zastosowaniem wskaźników chwiejności atmosfery w prognozowaniu burz (i innych pogód niebezpiecznych) skupiają się na wskazaniu wartości progowych, przy których pojawia się duże prawdopodobieństwo wystąpienia omawianych zjawisk. Z uwagi na złożoność czynników prowadzących do powstania i rozwoju burzy, a także fakt, że bardzo często samo ich pojawienie się ma charakter lokalny, szereg badań nad tym zagadnieniem dostarcza bardzo różnych informacji. Na przykład analiza wartości CAPE wykazała, że burze w Łodzi wystąpiły zarówno przy braku energii chwiejności ($CAPE = 0 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$), jak i gdy wartości tego wskaźnika były wyższe od $1500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$. Podobną tendencję stwierdzono w badaniach prowadzonych na terenie USA. Rasmussen i Blanchard (1998) lub Craven i in. (2002) pokazują, że słabe burze pojawiają się, gdy CAPE przyjmuje wartości z przedziału $0\text{--}500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, a silne burze z opadami gradu występują, gdy średnia wartość CAPE równa się $1100 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$.

W przypadku Europy na przykład badacze niemieccy stwierdzają, że burze i opady gradu występują przy średniej wartości CAPE równej $87 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Haklander, Van Delden 2003). Z kolei w badaniach nad wystąpieniem burz w południowo-zachodnich Niemczech (Kunz 2007) wykazano, że ponad połowa przypadków pojedynczych burz miała miejsce, gdy wartości całkowitej energii chwiejności zawierały się w przedziale $0\text{--}1200 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$. Rozpatrując wyniki podobnych badań prowadzonych w innych rejonach Europy, warto zwrócić uwagę na rezultaty otrzymane w przypadku północnych Włoch i Szwajcarii (Huntrisler i in. 1996; Costa i in. 2001). Wskazane w wymienionych pracach progowe wartości CAPE są wyższe od tych uzyskanych w niniejszej pracy, jak i cytowanych wyników z Niemiec i Niemców. Jednakże należy zwrócić uwagę na wpływ, jaki ma ukształtowanie terenu na rozwój konwekcji. Pasma Alp przyczynia się do wystą-

pienia większych gradientów temperatury, jak i wartości wilgotności powietrza pomiędzy dolną a środkową atmosferą (Van Delden 2001). Badania nad związkiem wartości CAPE z burzami i innymi zjawiskami konwekcyjnymi w Warszawie pokazują, że większość takich zjawisk miała miejsce, gdy wartości CAPE były niższe od $1000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Bielec-Bąkowska, Bąkowski 2006).

Uzyskane w pracy wartości mediany (dla okresu letniego) wskaźników KI i TTI są zbliżone do tych prezentowanych w innych pracach. Na przykład wyniki badań z północnych Włoch (Costa i in. 2001; Manzato 2003) czy innych regionów Europy Południowej (Jacovides i in. 1990; Dalezios, Papamanolis 1991; Tuduri, Ramis 1997; Gayá i in. 2001) wykazały, że w dniach z burzą średnie wartości wskaźnika KI przekraczają 28, a średnia wartość wskaźnika TTI zawierała się w przedziale 47–49.

Warto również zwrócić uwagę na pojawiającą się we wspomnianych pracach opinie dotyczące ograniczeń w zastosowaniu różnych wskaźników do prognozowania burz. Burze, opady gradu, tornada to zjawiska o małej skali przestrzennej i czasowej, a stosunkowo rzadka sieć radiosondażowa utrudnia precyzyjne pomiary stanu atmosfery. Kolejnym czynnikiem jest złożoność procesów prowadzących do rozwoju zjawisk niebezpiecznych. Charakterystyka tych warunków na podstawie wybranych zmiennych z określonych poziomów może prowadzić do błędnej oceny chwiejności atmosfery (Siedlecki 2011).

Podsumowanie

Przeprowadzone badania pokazały, że zastosowanie wybranych wskaźników chwiejności (CAPE, KI, TTI, SWEAT) może być przydatne w prognozowaniu wystąpienia burzy w Łodzi. W większości analizowanych przypadków wartości wskaźników osiągały wysokie wartości, tym samym potwierdzając proponowane w literaturze wartości wskazujące wysokie prawdopodobieństwo burz. Na przykład mediana wartości wskaźnika KI, która w miesiącach letnich osiągała 30–32, to próg stanowiący 80% prawdopodobieństwo burz. Również wartości wskaźników TTI i SWEAT potwierdziły w większości analizowanych przypadków, że burze w Łodzi w sezonie letnim pojawiają się, gdy osiągane są wartości na poziomie 45–48 w przypadku TTI oraz 150–200 w przypadku indeksu SWEAT.

Charakterystyka wskaźnika CAPE potwierdziła opinię, że burze w określonym regionie mo-

gą powstać przy bardzo dużym zakresie wartości tego indeksu. W badanym okresie burze w Łodzi wystąpiły zarówno, gdy całkowita energia chwiejności wyniosła $0 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, jak i przekraczała $1000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$. Mediana indeksu CAPE w miesiącach letnich zawierała się w przedziale $100\text{--}500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ (dla pomiarów z terminu 12 UTC).

Jednakże uzyskane wyniki wskazują na konieczność poszerzenia badań. Na pewno poprawę uzyskanych charakterystyk omawianych wskaźników chwiejności można uzyskać poprzez uwzględnienie burz z większego obszaru, na przykład środkowej Polski. Może to stanowić istotną informację pomocną w lepszym wykorzystaniu pomiarów radiosondażowych w ocenie prawdopodobieństwa wystąpienia burz w Łodzi.

Przeprowadzone badania wskazują również na konieczność stosowania innych danych, na przykład danych z radarów meteorologicznych czy też systemu detekcji wyładowań atmosferycznych. Wiąże się to z tym, że w większości przypadków burze mają charakter lokalny, a także sondaż aerologiczny oddalony znacznie od miejsca jej wystąpienia może nie oddawać dokładnie warunków prowadzących do rozwoju chwiejności.

Praca została finansowana w ramach projektu „Studenckie Granty Badawcze 2024 UŁ”. Projekt „Charakterystyka warunków chwiejności atmosfery w dniach z burzą w województwie łódzkim” realizowany jest przez Natalię Rosińską.

Literatura

Allen J. T. 2018. Climate change and severe thunderstorms. Oxford Research Encyclopedia of Climate Science, Oxford University Press.

Bąkowski R. 2005. Wybrane analityczne i prognostyczne wskaźniki chwiejności atmosfery. W: M. Ozga-Zielińska, D. Limanówka (red.) *Hydrologia, meteorologia i klimatologia: badania naukowe i prognozy w erze informatyzacji. Seria Monografie*. Wyd. IMGW-PIB, Warszawa: 209-218.

Bielec-Bąkowska Z., Bąkowski R. 2006. Wskaźniki chwiejności atmosfery a występowanie silnych zjawisk konwekcyjnych na przykładzie Warszawy. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio B: Geographia, Geologia, Mineralogia et Petrographia* 61: 65-71.

Brooks H.S. 2013. Severe thunderstorms and climate change. *Atmospheric Research* 123: 129-138.

Celiński-Mysław D., Palarz A. 2017. Ekstremalne wartości wskaźników chwiejności atmosfery w Polsce i ich związek z mechanizmami ograniczającymi rozwój konwekcji. *Prace Geograficzne* 148: 11-32.

Costa S., Mezzasalma P., Levizzani V., Alberoni P.P., Nanni S. 2001. Deep convection over Northern Italy: synoptic and thermodynamic analysis. *Atmospheric Research* 56: 73-88.

Craven J.P., Jewell R.E., Brooks H.E. 2002. Comparison between observed convective cloud-base heights and lifting condensation level for two different lifted parcels. *Weather Forecasting* 17: 885-890.

Dalezios N.R., Papamanolis N.K. 1991. Objective assessment of instability indices for operational forecasting in Greece. *Meteorology and Atmospheric Physics* 45: 87-100.

Department of Atmospheric Science University of Wyoming. 2023. Online: <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (data ostatniego dostępu: 30.11.2023)

Haklander A., Delden A. 2003. Thunderstorm predictors and their forecast skill for the Netherlands. *Atmospheric Research* 67-68: 273-299.

Huntriser H., Schiesser H.H., Schmid W., Waldvogel A. 1996. Comparison of traditional and newly developed thunderstorm indices for Switzerland. *Weather Forecasting* 12: 108-125.

IMGW-PIB (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy) 2024. Online: <https://klimat.imgw.pl/pl/biuletyn-monitoring/> (data ostatniego dostępu: 17.01.2024).

Jacovides C.P., Yonetani T. 1990. An evaluation of stability indices for thunderstorm prediction in Greater Cyprus. *Weather Forecasting* 5: 559-569.

Kafar M. 1998. Charakterystyka wybranych zjawisk atmosferycznych w Łodzi w latach 1951-1992. *Acta Universitatis Lodzianensis – Folia Geographica Phisica* 3: 279-295.

Kunz M. 2007. The sill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7: 327-342.

Kolendowicz L. 2006. The Influence of Synoptic Situations on the Occurrence of Days with Thunderstorms During a Year in the Territory of Poland. *International Journal of Climatology* 26: 1803-1820.

- Kolendowicz L. 2012. Synoptic Patterns associated with thunderstorms in Poland. *Meteorologische Zeitschrift* 21(2): 145-156.
- Manzato A. 2003, A climatology of instability indices derived from Friuli Venezia Giulia soundings, using three different methods. *Atmospheric Research* 67–68: 417-454.
- OGIMET. 2024. Online: <https://ogimet.com/home.phtml.en> (data ostatniego dostępu: 05.01.2024)
- Pešice P., Sulan J., Řezáčová D. 2003. Convection precursor in the Czech territory. *Atmospheric Research* 67–68: 523-532.
- Rasmussen E.N., Blanchard D.O. 1998. A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. *Weather Forecasting* 13: 1148-1164.
- Siedlecki M. 2011. Charakterystyka chwiejności atmosfery. *Acta Universitatis Lodziensis – Folia Geographica Physica* 11: 1-185
- Taszarek M., Czernecki B., Koziół A. 2015. A Cloud-to-Ground Lightning Climatology for Poland. *Monthly Weather Review* 143(11): 4285-4304.
- Taszarek M., Allen J., Púčik T., Groenemeijer P., Czernecki B., Kolendowicz L., Lagouvardos K., Kotroni V., Schulz W. 2019. A Climatology of Thunderstorms across Europe from a Synthesis of Multiple Data Sources. *Journal of Climate* 32: 1813-1837.
- Van Delden A. 2001. The synoptic setting of thunderstorms in western Europe. *Atmospheric Research* 56(1–4): 89-110.

Summary

Thunderstorms occur when high air humidity persists in the lower troposphere, when there is a large temperature difference between the lower and middle troposphere, and in the presence of factors that generate vertical air rise to the level of free convection (e.g., large differences in wind direction and speed). The work presents an attempt to develop threshold values of selected instability indicators at which thunderstorms are recorded in Łódź and its immediate surroundings. The results of such research constitute the basis for preparing a forecast of the occurrence of this type of phenomenon. The following instability indices were used to assess the state of atmospheric instability and the probability of thunderstorms: CAPE, KI, TTI and SWEAT. The values of atmospheric instability indicators were determined on the basis of radiosounding measurement (from 00 UTC and 12 UTC) performed in Legionowo and Wrocław in 2019–2023.

High values of the instability indices mean conditions of strong atmospheric instability

and a high probability of thunderstorms. In the analysed period, on thunderstorm days in Łódź, the highest CAPE values were observed from June to August. The median values in the following months varied in the range from 50 to 550 J·kg⁻¹. Comparing the monthly statistics of the CAPE index, the measurements in Wrocław are characterised by higher atmospheric instability. The monthly characteristics of the KI index values show smaller differences (compared to the CAPE index value) between day and night measurements. The median value of the KI index in the summer months based on observations from 00 UTC is in the range of 26–31. However, the results obtained on the basis of daily measurements were in the range of 30–34.4. TTI values below 40 mean no thunderstorms. On the analysed days with storms in Łódź, such values obtained on the basis of surveys at the analysed stations were very rare (usually, 1–2 cases a month). However, the vast majority of the received TTI values indicated the appearance of a storm. From June to August, the median value of this indicator was in the range of 45–48, which means conditions for moderate and strong storms.