PRZEGLĄD GEOFIZYCZNY

Rocznik LXVII 2022 Zeszyt 1-2

Kamil MISZTAL
Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie
Instytut Nauk o Ziemi i Środowisku

CHARAKTERYSTYKA WYŁADOWAŃ DOZIEMNYCH POD KĄTEM ICH PRZYPUSZCZALNEGO ŁADUNKU ELEKTRYCZNEGO NA OBSZARZE POLSKI W LATACH 2014-2019

CHARACTERISTICS OF CLOUD-TO-GROUND DISCHARGES DUE TO THEIR PREDICTED ELECTRIC CHARGE IN POLAND IN 2014-2019

Wstęp

Burza to zjawisko meteorologiczne, które niesie ze sobą duże zagrożenie, ponieważ jej głównymi cechami są gwałtowność, tempo przebiegu oraz nieprzewidywalność. Burzom najczęściej towarzyszą silne opady deszczu, a czasem, w wyniku działania specyficznych warunków atmosferycznych (silnej konwekcji), opady gradu. Zdarzają się także silne porywy wiatru. Jednak największe zagrożenie stanowią silne wyładowania atmosferyczne – zwłaszcza doziemne. Jak piszą Holle i in. (1999) oraz Curran i in. (2000) są one jedną z głównym przyczyn śmiertelnych wypadków powiązanych z warunkami atmosferycznymi.

Burze mają duży wpływ na funkcjonowanie człowieka i gospodarki. Wywołują wiele komplikacji w ruchu lotniczym, powodując wypadki, opóźnienia i odwołanie lotów (Tafferner i in. 2010; Gerz i in. 2012; Borsky, Unterberger 2019; Gultepe i in. 2019). Poza tym wyładowania doziemne powodują znaczne straty ekonomiczne – od zakłóceń w transporcie i komunikacji, przez pożary lasów i infrastruktury, po awarie linii energetycznych wysokiego napięcia (Wierzchowski i in. 2002; Sasse, Hauf 2003; Larjavaara i in. 2005; Mäkelä i in. 2013, Bielec-Bąkowska 2013; Jasik, Szyga-Pluta 2015).

Dla pełniejszego rozpoznania mechanizmów działania wyładowań doziemnych niezbędne są ich ciągłe badania i analizy, w których znacznym ułatwieniem są narzędzia GIS (Stallins, Bentley 2006; Hocker, Bassara 2007; Rowden, Aly 2018; Bhardwaj, Singh 2018; Misztal, Siłuch 2021). Taki też jest cel niniejszego opracowania, skupiającego się na badaniu wyładowań doziemnych pod kątem przypuszczalnego ładunku elektrycznego jaki ze sobą niosą.

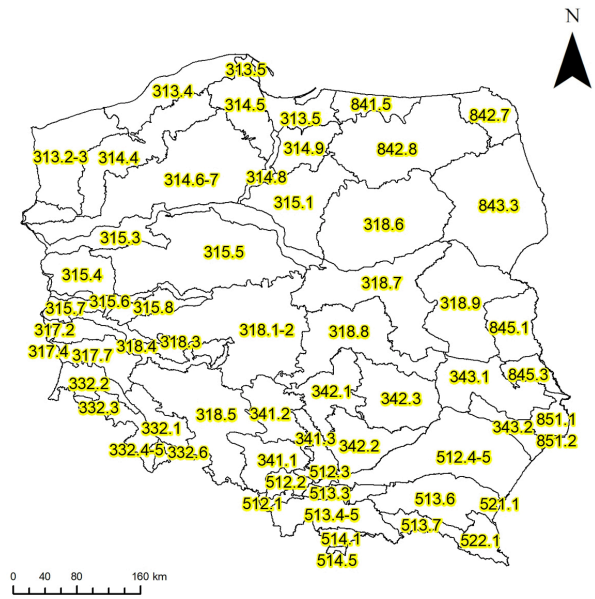
 DOI: 10.32045/PG-2022-029

Istnieje wiele podziałów wyładowań doziemnych (ang. cloud to ground, CG). W standardowej klasyfikacji wyróżnia się wyładowania dodatnie (CG+) i ujemne, (CG–), gdzie zarówno pierwsze, jak i drugie mogą być inicjowane z chmur, ale też i z powierzchni Ziemi (Bodzak 2007). Baba i Rakov (2009) podobnie klasyfikują wyładowania doziemne. Uważa się, że stosunek wyładowań CG– do CG+ wynosi 9:1. Chowdhuri i in. (2005) zgadza się z wyżej wymienionymi autorami, chociaż twierdzi, że błyskawic dodatnich jest mniej niż 10%. To jak często one występują zależy przede wszystkim od pory roku – najczęściej pojawiają się w zimie. Potwierdzają to wyniki Taszarka (2015), według którego odsetek pozytywnych błyskawic CG jest najniższy latem (2-3%), a najwyższy w zimie (10-20%). Badacze używają mediany jako wyznacznika średniej wartości natężenia prądu w wyładowaniach. Chowdhuri in. (2005) podaje wartość mediany dla wyładowań dodatnich 35 000 A. Jest to o około 5 000 A więcej niż średnie natężenie pierwszego wyładowania CG–, bo wartość 30 000 A podają Dwyer i Uman (2014). Warto tutaj wspomnieć, że kolejne uderzenia osiągają maksymalnie wartość 10 000-15 000 A. Mediana w przypadku wyładowań dodatnich jest niemiarodajna, ponieważ zdarzają się wyładowania dodatnie o natężeniu prądu większym niż 250 000 A (Chowdhuri in. 2005). Dwyer i Uman (2014) także to potwierdzili. podkreślając jednocześnie, że natężenie dodatniej błyskawicy może przekraczać nawet 300 000 A. Wartość ta podawana jest również przez Wooi i in. (2015). Dodatkowymi czynnikami, wpływającymi na inną wartość mediany wyładowań doziemnych dodatnich i ujemnych, mogą być dwa rozpoznane przez Chowdhuriego i in. (2005) typy wyładowań dodatnich. Pierwszy charakteryzuje się niską jasnością błyskawicy i małymi wartościami prądu, a drugi dużo mocniejszą jasnością oraz znacznie większymi maksymalnymi wartościami natężenia. Autor podkreśla także, że czas trwania wyładowania dodatniego jest dłuższy niż ujemnego. Mimo różnic w czasie trwania wyładowań, ich temperatura jest bardzo podobna i wynosi blisko 30 000°C (Baba, Rakov 2009; Dwyer, Uman 2014).

Oprócz natężenia prądu w wyładowaniach atmosferycznych warto zwrócić także uwagę na kwestię przebiegu dobowego zjawisk burzowych w Polsce. Dawniej zajmowała się tym Stopa (1962, 1964), która stwierdziła, że na terenie naszego kraju występują duże różnice w terminach ich występowania. Według niej burze najczęściej rozpoczynają się między godziną 13:00 a 15:00, ale najwięcej jest ich w godzinach 14:00-16:00. Najczęściej występują burze kilkunastominutowe, jednak czas ich trwania waha się od 5 minut do aż 10 godzin.

Materiały źródłowe, metody badań

W analizach wzięto pod uwagę wyładowania doziemne z lat 2014-2019. Dane w formacie tekstowym zostały pozyskane z zasobów Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego (IMGW-PIB). Zawierają one m.in. informacje o dacie i godzinie wyładowań, ich lokalizacji, typie wyładowania oraz przybliżonego natężenia prądu. Ze względu na specyfikę tych danych, jak i metodę, dzięki której



Rys. 1. Podział Polski na makroregiony
(https://geoforum.pl/news/25816/opublikowano-nowe-granice-regionow-geograficznych).

Fig. 1. Division of Poland into macroregions
(https://geoforum.pl/news/25816/opublikowano-nowe-granice-regionow-geograficznych).

określane jest natężenie prądu, nie można stwierdzić, że jest ono dokładne, a jedynie przybliżone. Po przetworzeniu danych możliwe było wczytanie ich do programów GIS (ArcGIS 10.8, QGIS 3.16), a następnie dokonanie analizy i wizualizacji wybranych wyników.

Dane wektorowe z granicami regionów fizycznogeograficznych, które stanowiły pola podstawowe dla większości analiz, zostały pobrane ze strony internetowej Generalnej Dyrekcji Ochrony Środowiska. Dostępne tam warstwy odnoszą się do podziału fizycznogeograficznego Solona i in. (2018), który zaktualizował podział Kondrackiego z 1977 r. W celu łatwiejszej interpretacji wyników przestawiono mapę podziału Polski na makroregiony (rys. 1) oraz tabelę 1 z ich nazwami.

W programie ArcMap, za pomocą metody interpolacji Kriging, wykonano mapy natężenia prądu, jakie niosły ze sobą wyładowania doziemne. Mapy o rozdzielczości 1 km × 1 km opracowano na podstawie wartości bezwzględnych natężenia prądu (rys. 2 i 3). Następnie, wykorzystując wygenerowane pliki i przy użyciu narzędzia Zonal Statistics as Table, opracowano dane statystyczne odnoszące się do natężenia prądu w makroregionach na terenie Polski. Mapy zawierające te same informacje zostały wygenerowane przy pomocy narzędzia Zonal Statistics.

Średnie natężenie prądu wyładowań w podprowincjach opracowano inną metodą. Na podstawie interpolowanych map, przy użyciu narzędzia Zonal Statistics, zostało obliczone średnie natężenie w kwadratowych polach podstawowych o powierzchni 25 km^2,

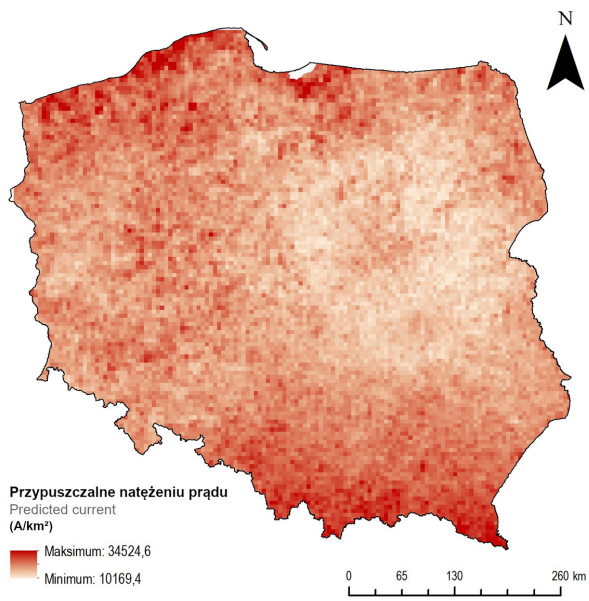
które zostały wygenerowane dla całego kraju przy użyciu narzędzia Create Fishnet. Miało to na celu wyraźne zwizualizowanie natężenia prądu, które będzie optymalne dla Polski.

Tabela 1. Nazwy makroregionów i przypisane im nazwy (uzupełnienie do rys. 3; https://geoforum.pl/news/25816/opublikowano-nowe-granice-regionow-geograficznych).

Table 1. The names of macroregions and their assigned names (addendum to fig. 3; https://geoforum.pl/news/25816/opublikowano-nowe-granice-regionow-geograficznych).

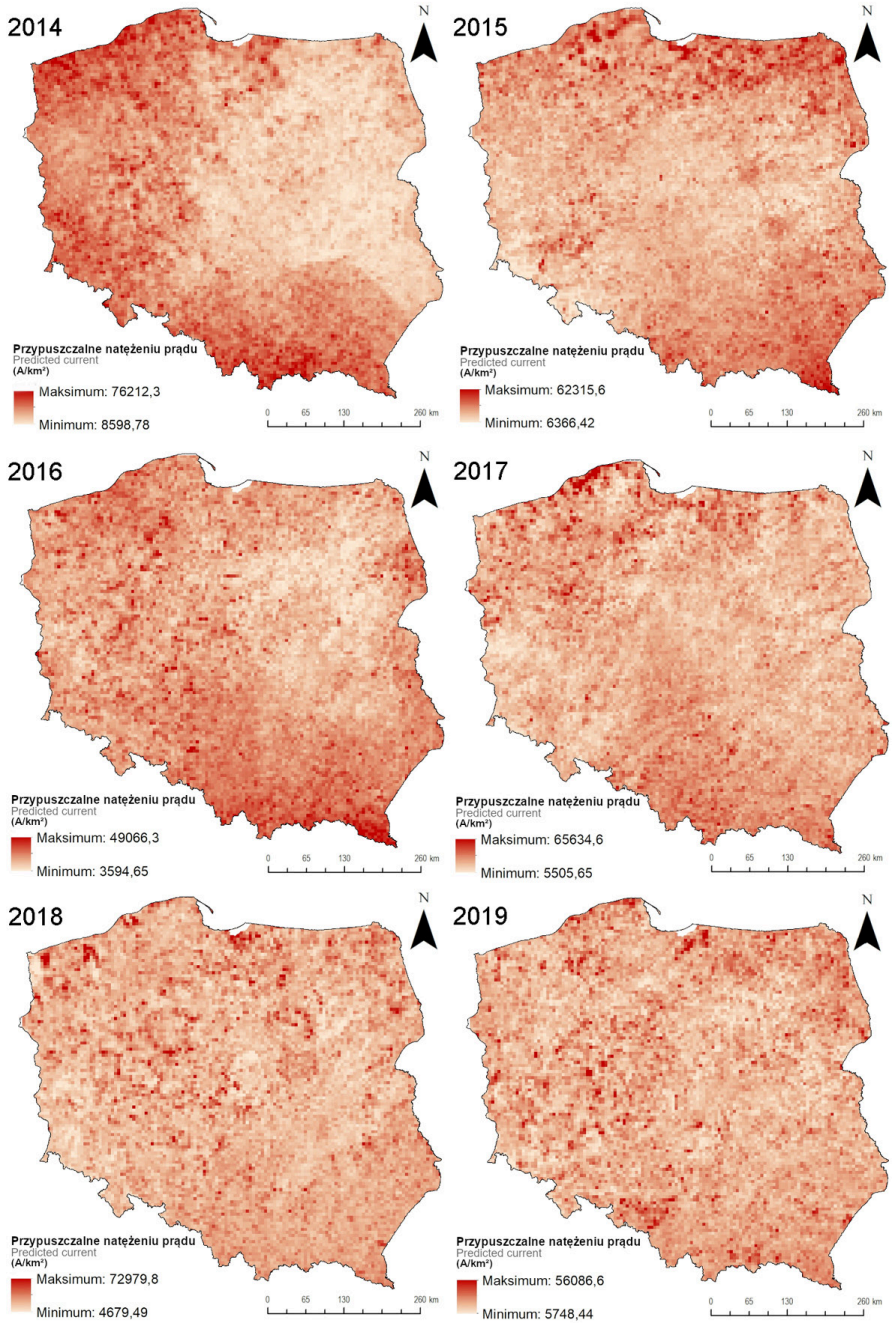
Kod/Code	Makroregion (PL)	Macroregion (ENG)
313.2-3	Pobrzeże Szczecińskie	Szczecin Coastland
313.4	Pobrzeże Koszalińskie	Koszalin Coastland
313.5	Pobrzeże Gdańskie	Gdańsk Coastland
314.4	Pojezierze Zachodniopomorskie	Western Pomerania Lakeland
314.5	Pojezierze Wschodniopomorskie	Eastern Pomerania Lakeland
314.6-7	Pojezierze Południowopomorskie	Southern Pomerania Lakeland
314.8	Dolina Dolnej Wisły	Lower Vistula River Valley
314.9	Pojezierze Iławskie	Iława Lakeland
315.1	Pojezierze Chełmińsko-Dobrzyńskie	Chełmno-Dobrzyń Lakeland
315.3	Pradolina Toruńsko-Eberswaldzka	Toruń-Eberswalde Ice Marginal Valley
315.4	Pojezierze Lubuskie (Brandenbursko-Lubuskie)	Lubuskie Lakeland
315.5	Pojezierze Wielkopolskie	Wielkopolskie Lakeland
315.6	Pradolina Warciańsko-Odrzańska	Warta-Odra Ice Mariginal Valley
315.7	Wzniesienia Zielonogórskie	Zielona Góra Hills
315.8	Pojezierze Leszczyńskie	Leszczyńskie Lakeland
317.2	Obniżenie Dolnołużyckie	Lower Lusatia Basin
317.4	Wzniesienia Łużyckie	Lusatia Hills
317.7	Nizina Śląsko-Łużycka	Silesia-Lusatia Lowland
318.1-2	Nizina Południowowielkopolska	Southern Wielkopolska Lowland
318.3	Obniżenie Milicko-Głogowskie	Milicz-Głogów Depression
318.4	Wał Trzebnicki	Trzebnica Range
318.5	Nizina Śląska	Silesia Lowland
318.6	Nizina Północnomazowiecka	Northern Masovia Lowland
318.7	Nizina Środkowomazowiecka	Central Masovia Lowland
318.8	Wzniesienia Południowomazowieckie	Southern Masovia Hills
318.9	Nizina Południowopodlaska	Southern Podlasie Lowland
332.1	Przedgórze Sudeckie	Sudety Foreland
332.2	Pogórze Zachodniosudeckie	Western Sudety Foothills
332.3	Sudety Zachodnie	Western Sudety Mts
332.4-5	Sudety Środkowe	Central Sudety Mts
332.6	Sudety Wschodnie	Eastern Sudety Mts
341.1	Wyżyna Śląska	Silesia Upland
341.2	Wyżyna Woźnicko-Wieluńska	Woźniki-Wieluń Upland
341.3	Wyżyna Krakowsko-Częstochowska	Kraków-Częstochowa Upland
342.1	Wyżyna Przedborska	Przedbórz Upland
342.2	Niecka Nidziańska	Nida Basin
342.3	Wyżyna Kielecka	Kielce Upland

Kod/Code	Makroregion (PL)	Macroregion (ENG)
343.1	Wyżyna Lubelska	Lublin Upland
343.2	Roztocze	Roztocze Upland
512.1	Kotlina Ostrawska	Ostrawa Basin
512.2	Kotlina Oświęcimska	Oświęcim Basin
512.3	Brama Krakowska	Kraków Gate
512.4-5	Kotlina Sandomierska	Sandomierz Basin
513.3	Pogórze Zachodniobeskidzkie	Western Beskidy Foothills
513.4-5	Beskidy Zachodnie	Western Beskidy Mts
513.6	Pogórze Środkowobeskidzkie	Mid-Beskidy Foothills
513.7	Beskidy Środkowe	Mid-Beskidy Mts
514.1	Obniżenie Orawsko-Podhalańskie	Orawa-Podhale Basin
514.5	Łańcuch Tatrzański	Tatra Range
521.1	Płaskowyż Sańsko-Dniestrzański	San-Dniestr Plateau
522.1	Beskidy Lesiste	Lesiste Beskidy Mts
841.5	Nizina Staropruska	Old Prussian Lowland
842.7	Pojezierze Litewskie	Lithuanian Lakeland
842.8	Pojezierze Mazurskie	Masurian Lakeland
843.3	Nizina Północnopodlaska	Northern Podlasie Plain
845.1	Polesie Zachodnie	Western Polesie
845.3	Polesie Wołyńskie	Volhyn Polesie
851.1	Wyżyna Wołyńska	Volhyn Upland
851.2	Kotlina Pobuża	Pobuże Basin



Rys. 2. Przypuszczalne średnie natężenie prądu w Polsce w latach 2014-2019.

Fig. 2. Predicted average current intensity in Poland in 2014-2019.



Rys. 3. Przypuszczalne średnie natężenie prądu wyładowań doziemnych w Polsce w poszczególnych latach w okresie 2014-2019.

Fig. 3. Predicted average lightning current intensity in Poland in the years 2014-2019.

Korzystając z danych tabelarycznych, dzięki narzędziu Summarize, zliczono wyładowania występujące w danej godzinie oraz to, jaki ładunek niosło ze sobą konkretne wyładowanie. Następnie w programie MS Excel zestawiono wyniki i zaprezentowano je w formie tabel i wykresów.

Analizę zmienności przestrzennej natężenia prądu płynącego w wyładowaniach doziemnych opracowano na podstawie map odzwierciedlających to zjawisko w skali całego kraju. Natężenie zostało zbadane w całym analizowanym sześcioleciu 2014-2019 (rys. 2), jak i w poszczególnych latach (rys. 3).

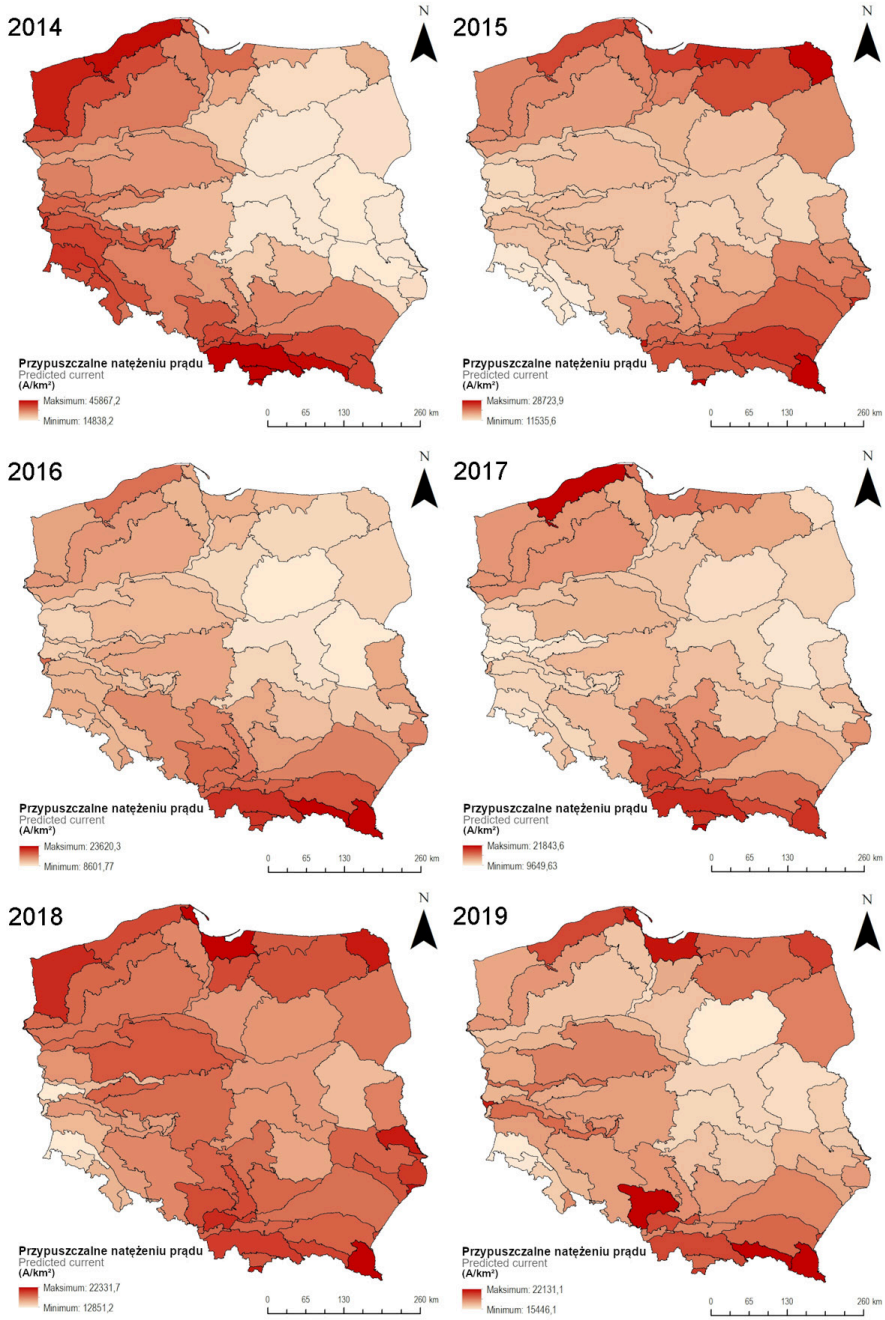
Wystąpiły duże różnice w rozkładzie i natężeniu w poszczególnych latach. IMGW-PIB nie prowadzi rejestru obejmującego wymiany czujników wyładowań atmosferycznych, stąd najprawdopodobniej system detekcji wyładowań w kolejnych latach bardzo się zmieniał. Widoczne jest to również na podstawie wizualnej oceny map natężenia w poszczególnych latach. Zmieniała się dokładność i wiarygodność pozyskiwanych danych. Natomiast od 2017 r. stwierdzono większą jednorodność wyników, co pozwala zakładać, że od tego roku jakość udostępnianych danych poprawiła się.

Wyniki

Na rysunku 4 i w tabeli 2 przedstawiono średnie, przypuszczalne natężenie prądu wyładowań w podziale na makroregiony dla poszczególnych lat i w całym okresie. Makroregiony o największym średnim natężeniu w latach 2014-2019 to: Łańcuch Tatrzański, Beskidy Lesiste, Beskidy Środkowe, Obniżenie Orawsko-Podhalańskie, Beskidy Zachodnie i Pobrzeże Koszalińskie. Przypuszczalne średnie natężenie w tych makroregionach osiągnęło ponad 23 000 A. Wyniki najbardziej odbiegające od średniej przypadły na lata 2015 i 2019, ponieważ część makroregionów o największym natężeniu prądu w ogólnym zestawieniu znalazło się niżej. Z kolei makroregiony o najniższym średnim natężeniu prądu to: Pojezierze Chełmińsko-Dobrzyńskie, Polesie Zachodnie, Wzniesienia Południowomazowieckie, Nizina Środkowomazowiecka, Nizina Północnomazowiecka, Nizina Południowopodlaska, na co wskazują wyniki przeprowadzonej analizy dla lat 2014, 2016 i 2019.

Obliczono także liczbę wyładowań doziemnych w kroku czasowym co godzinę (tab. 3). Wyniki wskazują na to, że największa liczba wyładowań doziemnych przypada na godziny 13:00-15:00 UTC. Z kolei najmniej wyładowań wystąpiło w godzinach porannych, tj. między 7:00, a 9:00 UTC.

W tabeli 4 zestawiono udział wyładowań doziemnych, z rozróżnieniem na pioruny naładowane dodatnio i ujemnie. W badanym sześcioleciu wyładowania ujemne stanowiły 87% wszystkich przypadków, wyładowania dodatnie 13%. W poszczególnych latach występowały jednak znaczne różnice. W latach 2018 i 2019 wyładowania dodatnie stanowiły 8% wszystkich przypadków, a w roku 2014 było ich tylko 6%. Natomiast w latach 2016 i 2017 udział wyładowań dodatnich był zdecydowanie ponad średnią analizowanego okresu. W 2016 r. 20% wszystkich doładowań doziemnych było dodatnich.



Rys. 4. Przypuszczalne średnie natężenie prądu wyładowań w makroregionach w latach w okresie 2014-2019.

Fig. 4. Predicted average lightning current intensity in macroregions in the years 2014-2019.

Tabela 2. Przypuszczalne średnie natężenie prądu w wyładowaniach według podziału na makroregiony dla lat 2014-2019.

Table 2. Predicted average lightning current intensity in macroregions in the years 2014-2019.

Makroregion/ Macroregion	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Średnio/ Average
Łańcuch Tatrzański	45 867	25 085	19 197	21 844	20 891	20 262	25 536
Beskidy Lesiste	36 160	28 724	23 620	19 017	21 592	21 458	25 079
Beskidy Środkowe	40 849	21 786	21 468	18 240	19 472	22 131	23 999
Obniżenie Orawsko-Podhalańskie	44 698	21 385	19 303	18 910	18 996	19 215	23 753
Beskidy Zachodnie	42 190	21 680	19 496	19 288	19 718	19 965	23 729
Pobrzeże Koszalińskie	41 083	22 173	16 501	20 585	19 238	19 934	23 233
Kotlina Oświęcimska	35 432	20 431	16 765	18 568	20 259	19 942	21 887
Pogórze Środkowobeskidzkie	35 181	22 970	17 718	16 698	18 603	19 183	21 723
Kotlina Ostrawska	35 493	24 278	17 199	16 785	18 769	18 349	21 697
Pogórze Zachodniobeskidzkie	36 009	20 987	17 092	17 888	18 499	18 474	21 496
Pobrzeże Gdańskie	31 681	22 554	13 645	16 797	22 332	21 024	21 362
Wyżyna Śląska	33 506	18 933	17 014	17 829	19 145	21 483	21 315
Płaskowyż Sańsko-Dniestrzański	27 652	22 421	17 693	18 653	19 519	20 112	21 104
Brama Krakowska	33 653	18 707	17 438	17 323	19 681	19 831	21 088
Pobrzeże Szczecińskie	39 381	19 281	14 069	15 548	20 371	17 579	21 029
Pojezierze Zachodniopomorskie	35 171	18 985	14 621	15 703	18 296	18 007	20 129
Wyżyna Krakowsko-Częstochowska	29 051	18 575	16 347	17 303	19 271	18 171	19 775
Kotlina Pobuża	21 473	23 486	16 841	16 906	21 053	17 815	19 678
Kotlina Sandomierska	28 749	21 047	15 581	14 903	18 036	18 471	19 463
Nizina Staropruska	25 377	23 868	12 915	16 740	18 707	19 283	19 459
Pojezierze Litewskie	23 922	25 272	11 988	12 890	20 823	20 135	19 163
Niecka Nidziańska	28 593	18 551	14 288	16 714	18 317	17 942	19 074
Obniżenie Dolnołużyckie	36 248	14 292	16 752	11 153	15 085	20 905	19 019
Wzniesienia Łużyckie	38 382	16 978	13 441	14 761	13 510	16 775	19 007
Pojezierze Południowopomorskie	30 130	18 035	13 816	15 808	17 767	16 788	18 718
Wał Trzebnicki	33 909	16 492	13 078	13 128	16 579	19 171	18 718
Wyżyna Woźnicko-Wieluńska	26 286	17 009	15 660	16 610	18 423	18 050	18 674
Nizina Śląsko-Łużycka	35 952	16 032	13 205	13 260	15 328	17 808	18 600
Pojezierze Wschodniopomorskie	29 068	19 416	13 226	14 890	17 147	16 785	18 416
Nizina Śląska	29 655	15 952	15 120	14 109	17 163	17 742	18 287
Pojezierze Iławskie	25 535	19 541	12 981	13 588	19 349	17 492	18 093
Sudety Środkowe	35 504	13 813	13 118	13 566	15 472	16 598	18 040
Pojezierze Wielkopolskie	27 069	16 323	12 968	14 429	18 840	18 501	18 020
Wyżyna Wołyńska	18 677	20 245	15 319	15 643	19 918	17 926	17 959
Przedgórze Sudeckie	34 387	13 679	13 003	12 954	16 398	17 241	17 936
Obniżenie Milicko-Głogowskie	30 956	16 715	12 073	13 283	16 397	18 097	17 925
Pojezierze Leszczyńskie	28 239	16 450	13 937	12 732	18 571	17 564	17 908
Pogórze Zachodniosudeckie	37 461	13 821	13 637	12 806	13 195	15 446	17 745
Pradolina Warciańsko-Odrzańska	30 937	15 522	12 297	12 195	15 182	19 020	17 520
Pojezierze Mazurskie	18 984	21 881	11 102	14 831	18 963	19 115	17 480
Roztocze	18 913	20 659	14 246	14 054	18 959	17 708	17 432

Makroregion/ Macroregion	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Średnio/ Average
Sudety Wschodnie	30 595	11 536	14 118	14 254	15 299	18 241	17 275
Pradolina Toruńsko-Eberswaldzka	26 292	15 816	12 220	13 837	18 122	17 282	17 263
Nizina Południowowielkopolska	23 043	16 046	13 934	14 338	18 113	17 759	17 205
Pojezierze Lubuskie (Brandenbursko-Lubuskie)	29 228	14 674	11 594	12 823	16 713	17 536	17 096
Polesie Wołyńskie	16 912	18 782	14 198	14 262	20 811	16 737	16 961
Wyżyna Przedborska	20 650	16 547	13 721	15 797	18 067	16 850	16 941
Sudety Zachodnie	34 793	12 703	12 421	11 329	14 068	15 730	16 837
Wyżyna Kielecka	23 123	17 411	12 628	13 619	16 006	16 703	16 579
Dolina Dolnej Wisły	22 553	19 049	11 136	13 187	17 098	16 134	16 555
Wzniesienia Zielonogórskie	33 004	14 596	11 864	9 650	12 851	17 241	16 543
Nizina Północnopodlaska	18 369	18 693	11 524	13 313	17 725	18 591	16 372
Wyżyna Lubelska	16 808	19 390	11 944	13 131	18 352	17 171	16 132
Pojezierze Chełmińsko-Dobrzyńskie	20 924	16 720	11 044	13 820	16 527	16 898	15 981
Polesie Zachodnie	17 441	17 153	13 671	13 002	17 334	16 606	15 866
Wzniesienia Południowomazowieckie	17 274	15 160	11 256	14 073	16 624	16 337	15 122
Nizina Środkowomazowiecka	17 462	15 691	10 414	13 115	16 529	16 387	14 929
Nizina Północnomazowiecka	17 400	16 123	8 602	12 746	16 604	15 673	14 528
Nizina Południowopodlaska	14 838	14 686	10 020	12 390	15 295	16 124	13 896

W tabeli 5 przedstawiono udział poszczególnych wyładowań dla zsumowanych wartości miesięcznych z lat 2014-2019. Największe dysproporcje wystąpiły w lutym i wrześniu, kiedy wyładowania ujemne stanowiły odpowiednio 94 i 90%, a najmniejsze w marcu i listopadzie – w tych miesiącach wyładowań CG– było mniej, bo odpowiednio 82 i 84%.

W tabeli 6 ukazano relacje pomiędzy godziną, w której miało miejsce wyładowanie, a jego ładunkiem. Ze względu na specyfikę danych, badane były tylko lata 2017, 2018 i 2019. Analizy wykonano w celu weryfikacji, czy istnieją prawidłowości w dobowej zmienności natężenia prądu wyładowań doziemnych, w podziale na wyładowania dodatnie i ujemne. Stwierdzono, że wystąpiły pewne zależności między ładunkiem wyładowań, a czasem ich pojawiania się. Godziny 12:00, 13:00 i 14:00 UTC charakteryzowały się najmniejszą liczbą CG+ (było ich mniej niż 10%) i jednocześnie największą CG–. Natomiast godziny poranne okazały się tymi, w których wyładowań doziemnych dodatnich było najwięcej (ponad 15%), zwłaszcza 00:00, 03:00 i 05:00 UTC. W każdej z analizowanych godzin od 00:00 do 05:00 UTC dysproporcja w wyładowaniach ze względu na ich ładunek była najmniejsza w odniesieniu do pozostałej części doby. W badanym okresie wystąpiły jednak pewne wyjątki. W 2019 r. pewne odstępstwa miały miejsce w godzinach, w których była największa liczba wyładowań dodatnich. Najwięcej było ich w godzinach 07:00-10:00 UTC, czyli kilka godzin później niż dla wartości z innych lat.

Ważny jest także aspekt rozkładu liczebności wyładowań w odniesieniu do ładunku elektrycznego jaki ze sobą niosą (rys. 5). Najwięcej (75%) wyładowań stanowiły te o niskim natężeniu prądu (wartość bezwzględna natężenia poniżej 20 000 A). Wraz ze wzrostem natężenia tendencja była malejąca, tzn. najmniejszy odsetek, bo zaledwie 0,37% wszystkich wyładowań, stanowiły pioruny o wysokim natężeniu prądu, tj. większym niż 100 000 A.

Tabela 3. Zestawienie liczby wyładowań doziemnych w podziale na godziny.
Table 3. Summary of the number of cloud-to-ground discharges by hour.

Godzina (UTC)/ Hour (UTC)	Liczba wyładowań/Number of discharges			
	2017	2018	2019	2017-2019
00:00	18 652	3 563	15 769	37 984
01:00	17 851	3 406	15 200	36 457
02:00	24 184	4 476	13 666	42 326
03:00	38 226	5 489	11 938	55 653
04:00	46 600	5 646	8 456	60 702
05:00	42 010	5 207	6 775	53 992
06:00	24 481	4 668	5 885	35 034
07:00	12 275	4 106	4 323	20 704
08:00	8 322	5 685	4 368	18 375
09:00	17 955	7 084	7 937	32 976
10:00	31 570	14 013	15 559	61 142
11:00	45 297	37 893	32 681	115 871
12:00	56 160	57 337	44 964	158 461
13:00	62 396	73 657	53 533	189 586
14:00	73 442	75 259	61 893	210 594
15:00	67 531	59 136	52 494	179 161
16:00	73 253	38 446	43 183	154 882
17:00	58 761	24 261	43 583	126 605
18:00	55 181	18 087	35 758	109 026
19:00	56 383	12 862	37 354	106 599
20:00	47 662	9 539	33 200	90 401
21:00	36 848	8 777	26 794	72 419
22:00	31 256	6 403	20 584	58 243
23:00	23 117	4 844	16 725	44 686

Tabela 4. Podział wyładowań doziemnych ze względu na ich ładunek elektryczny w latach 2014-2019.
Table 4. Partition of cloud-to-ground discharges due to their electric charge in years 2014-2019.

Rok/Year	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Średnia z 2014-2019/ Average in 2014-2019
Wyładowania dodatnie w skali roku/Positive discharges per year	6%	10%	20%	17%	8%	8%	13%
Wyładowania ujemne w skali roku/Negative discharges per year	94%	90%	80%	83%	92%	92%	87%

Tabela 5. Procentowy podział wyładowań doziemnych ze względu na ich ładunek elektryczny kolejnych miesiącach w okresie 2014-2019.

Table 5. Percentage partition of cloud-to-ground lightning discharges due to their electric charge in all months in years 2014-2019.

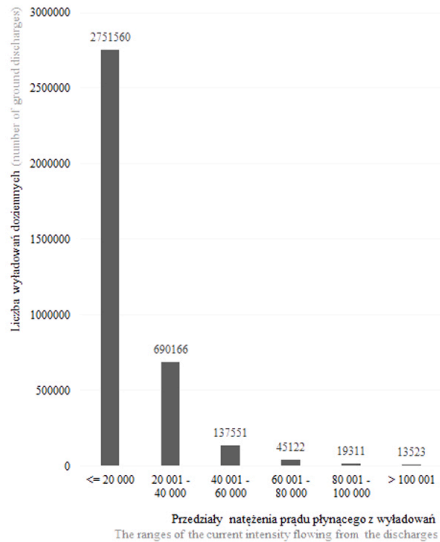
Miesiąc/Month	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Wyładowania dodatnie w skali miesiąca/Positive discharges per month	12%	6%	18%	14%	13%	14%	12%	13%	10%	15%	16%	11%
Wyładowania ujemne w skali miesiąca/Negative discharges per month	88%	94%	82%	86%	87%	86%	88%	87%	90%	85%	84%	89%

Tabela 6. Podział wyładowań doziemnych ze względu na ich ładunek elektryczny oraz ich udział w kolejnych godzinach w ciągu doby.

Table 6. Partition of cloud-to-ground discharges due to their electric charge and their participation in each hour of the day.

Godzina (UTC)/ Hour (UTC)	2017		2018		2019		2017-2019	
	Wyładowania dodatnie/ Positive discharges	Wyładowania ujemne/ Negative discharges	Wyładowania dodatnie/ Positive discharges	Wyładowania ujemne/ Negative discharges	Wyładowania dodatnie/ Positive discharges	Wyładowania ujemne/ Negative discharges	Wyładowania dodatnie/ Positive discharges	Wyładowania ujemne/ Negative discharges
00:00	20%	80%	15%	85%	10%	90%	19%	81%
01:00	17%	83%	18%	82%	9%	91%	14%	86%
02:00	20%	80%	13%	87%	8%	92%	15%	85%
03:00	18%	82%	14%	86%	9%	91%	15%	85%
04:00	17%	83%	13%	87%	8%	92%	15%	85%
05:00	19%	81%	12%	88%	10%	90%	17%	83%
06:00	12%	88%	15%	85%	9%	91%	12%	88%
07:00	14%	86%	16%	84%	12%	88%	14%	86%
08:00	14%	86%	11%	89%	13%	87%	12%	88%
09:00	18%	82%	10%	90%	11%	89%	14%	86%
10:00	17%	83%	7%	93%	11%	89%	13%	87%
11:00	16%	84%	6%	94%	9%	91%	11%	89%
12:00	14%	86%	6%	94%	7%	93%	9%	91%
13:00	12%	88%	6%	94%	7%	93%	8%	92%
14:00	14%	86%	7%	93%	7%	93%	9%	91%
15:00	16%	84%	8%	92%	8%	92%	11%	89%
16:00	16%	84%	9%	91%	9%	91%	12%	88%
17:00	17%	83%	11%	89%	9%	91%	13%	87%

Godzina (UTC)/ Hour (UTC)	2017		2018		2019		2017-2019	
	Wyładowania dodatnie/ Positive discharges	Wyładowania ujemne/ Negative discharges	Wyładowania dodatnie/ Positive discharges	Wyładowania ujemne/ Negative discharges	Wyładowania dodatnie/ Positive discharges	Wyładowania ujemne/ Negative discharges	Wyładowania dodatnie/ Positive discharges	Wyładowania ujemne/ Negative discharges
18:00	17%	83%	10%	90%	9%	91%	13%	87%
19:00	15%	85%	13%	87%	9%	91%	12%	88%
20:00	14%	86%	14%	86%	8%	92%	12%	88%
21:00	14%	86%	14%	86%	8%	92%	11%	89%
22:00	17%	83%	14%	86%	10%	90%	14%	86%
23:00	14%	86%	16%	84%	10%	90%	13%	87%



Rys. 5. Rozkład liczebności wyładowań według natężenia prądu w okresie 2017-2019.

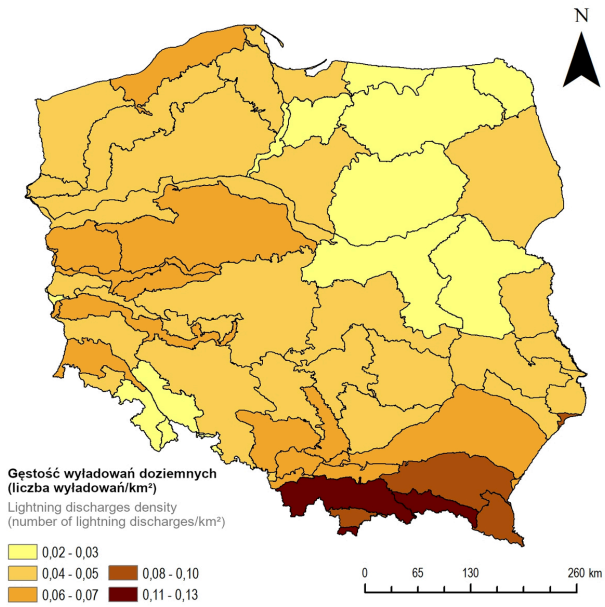
Fig. 5. Partition of cloud-to-ground discharges due to current intensity in the period 2017-2019.

W latach 2014-2019 wyładowań o najwyższym natężeniu prądu (>100 000 A) było 13 523, z czego 5 676 miało ładunek dodatni, co stanowiło 42% wszystkich wyładowań. Wyładowań o natężeniu większym niż 200 000 A było 912, z czego 65% stanowiły wyładowania dodatnie. Natomiast wyładowań powyżej 300 000 A było 109, z czego aż 84% stanowiły wyładowania dodatnie (tab. 7). Można stwierdzić, że wraz ze wzrostem natężenia prądu rośnie odsetek wyładowań dodatnich.

Tabela 7. Udział wyładowań doziemnych o bezwzględnym natężeniu prądu większym niż 100 000 A, w podziale ze względu na ich ładunek (dodatni lub ujemny) w poszczególnych przedziałach natężenia prądu (2014-2019).

Table 7. Partition of cloud-to-ground discharges with an absolute current intensity greater than 100,000 A, due to their charge (positive or negative) in individual current intensity ranges (2014-2019).

Natężenie/Intensity	Liczba wyładowań/ Number of discharges	Stosunek w przedziale/ Ratio in the range
Powyżej 100 000 A Greater than 100,000 A	5 676	42%
Poniżej 100 000 A Less than 100,000 A	7 847	58%
Powyżej 200 000 A Greater than 200,000 A	596	65%
Poniżej 200 000 A Less than 200,000 A	316	35%
Powyżej 300 000 A Greater than 300,000 A	92	84%
Poniżej 300 000 A Less than 300,000 A	17	16%



Rys. 6. Gęstość wyładowań o bezwzględnych wartościach natężenia prądu powyżej 100 000 A w makroregionach w okresie 2014-2019.

Fig. 6. The density of discharges with absolute current values above 100,000 A in macroregions in the period 2014-2019.

Na rysunku 6 przedstawiono przestrzenne zróżnicowanie gęstości wyładowań o bezwzględnych wartościach natężenia prądu powyżej 100 000 A w okresie 2014-2019. Makroregiony, w których gęstość tych wyładowań była największa, to przede wszystkim obszar Karpat: Łańcuch Tatrzański, Beskidy Środkowe, Beskidy Zachodnie, Obniżenie Orawsko-Podhalańskie, Beskidy Lesiste oraz Kotlina Pobuża na Wyżynie Wołyńsko-Podolskiej. Natomiast najmniejsza gęstość tego typu wyładowań miała miejsce w makroregionach: Nizina Południowopodlaska, Nizina Północnomazowiecka, Nizina Środkowomazowiecka, Pojezierze Iławskie, Nizina Staropruska oraz Sudety Wschodnie. W pewnym stopniu rozkład gęstości pokrywa się z wcześniej prezentowanymi mapami natężenia prądu, jednak w przypadku mapy z gęstością wyładowań o największym natężeniu najbardziej wyróżniają się tereny górskie i podgórskie.

Dyskusja

Baba i Rakov (2009) podają, że stosunek wyładowań CG– do CG+ wynosi 9:1. Chowdhuri in. (2005) uważa, że wyładowań dodatnich jest mniej niż 10%. W Polsce w latach 2014-2019 ten stosunek był nieznacznie inny, ponieważ wyładowań dodatnich było 13%, a ujemnych 87%. Taszarek i in. (2015) oraz Chowdhuri i in. (2005) twierdzą też, że stosunek ten zmienia się w zależności od pory roku, natomiast w badanym sześcioleciu tej prawidłowości nie zauważono. Wykazano za to znaczące różnice w zależności od pory dnia. Wczesnym popołudniem wyładowań CG+ było blisko 10%, natomiast w godzinach nocnych takich wyładowań było ponad 15%.

W literaturze przedmiotu mediana podawana jest jako wyznacznik natężenia prądu charakterystycznego dla wyładowań doziemnych. Dwyer i Uman (2014) dla wyładowań CG– podają wartość 30 000 A, Chowdhuri i in. (2005) dla CG+ wskazuje na 35000 A. Jedną z przyczyn wyższej wartości w przypadku wyładowań CG+ są wyższe bezwzględne wartości natężenia prądu, które przekraczają 250 000 A (Chowdhuri i in. 2005), a według innych źródeł nawet 300 000 A (Dwyer, Uman 2014). W Polsce w okresie 2014-2019 pioruny o wysokim natężeniu prądu (>100 000 A) stanowiły 0,37% wszystkich wyładowań, przy czym ponad 100 wyładowań CG+ przekroczyło 300 000 A, a kilka osiągnęło wartość przekraczającą 500 000 A. Najwięcej, bo aż 75% wyładowań, stanowiły te o niskim natężeniu prądu (wartość bezwzględna natężenia), nie większym niż 20 000 A.

W badanym okresie najwięcej wyładowań wystąpiło w godzinach 13:00-16:00 UTC, a najmniej było ich nad ranem, tj. między 7:00 a 10:00 UTC. Wyniki te są bardzo zbliżone do uzyskanych przez Stopę (1962, 1964) na podstawie danych ze stacji meteorologicznych.

Podsumowanie i wnioski

W badanym okresie 87% wyładowań doziemnych miało ujemny ładunek prądu, a 13% ładunek dodatni. Najwięcej wyładowań dodatnich (20%) wystąpiło w 2016 r.,

a ujemnych w 2014 r. (94%). W rozkładzie rocznym najwięcej wyładowań dodatnich, bo aż 18%, miało miejsce w marcu, natomiast najwięcej wyładowań ujemnych było w lutym. W zmienności przestrzennej zaznacza się następująca prawidłowość: północ i południe Polski to obszary o największym średnim (bezwzględnym) natężeniu prądu generowanym przez wyładowania doziemne. Szczególnie wyróżniają się pod tym względem makroregiony: Łańcuch Tatrzański, Beskidy Środkowe, Beskidy Zachodnie, Obniżenie Orawsko-Podhalańskie i Beskidy Lesiste. Najniższym natężeniem prądu wyładowań atmosferycznych odznaczyła się środkowo-wschodnia część kraju. W części środkowo-zachodniej Polsce występują obok siebie obszary o znacznym zróżnicowaniu natężenia prądu w wyładowaniach.

Jedynie 0,37% wszystkich wyładowań doziemnych stanowiły te o bezwzględnym natężeniu prądu większym niż 100 000 A. Stwierdzono, że im większe jest bezwzględne natężenie prądu, tym większy jest udział CG+.

W latach 2017-2019 najwięcej wyładowań wystąpiło odpowiednio w godzinach 14:00, 13:00 i 15:00 UTC, najmniej zaś w godzinach 08:00, 07:00 i 09:00 UTC. Godziny 12:00, 13:00 i 14:00 UTC charakteryzowały się najmniejszą liczbą CG+. Natomiast godziny poranne były tymi, w których wyładowań doziemnych dodatnich stwierdzono najwięcej (ponad 15%), przede wszystkim w godzinach 00:00, 03:00 i 05:00 UTC.

Można zakładać, że w pewnym stopniu wyniki odbiegają od rzeczywistości ze względu na różnice wewnątrz systemu detekcji wyładowań atmosferycznych, jak i możliwe lokalne zmiany wynikające ze zmiany zagęszczenia i precyzyjności czujników. Jednak z roku na rok dane te wydają się być coraz dokładniejsze, co daje nadzieję na pozyskiwanie bardzo dokładnych informacji w przyszłości. Połączenie coraz lepszej jakości danych o wyładowaniach oraz rozwój narzędzi i metod analitycznych GIS dają szansę na stały postęp i wzrost jakości w badaniach nad wyładowaniami atmosferycznymi.

Literatura

Baba Y., Rakov V.A., 2009, Present understanding of the lightning return stroke, [w:] Lightning: Principles, Instruments and Applications, H.D. Betz, U. Schumann, P. Laroche (red.), Springer, Dordrecht, Netherlands, DOI: 10.1007/978-1-4020-9079-0_1.

Bhardwaj P., Singh O., 2018, Spatial and temporal analysis of thunderstorm and rainfall activity over India, Atmósfera, 31 (3), 255–284, DOI: 10.20937/atm.2018.31.03.04.

Bielec-Bąkowska Z., 2013, Burze i grady w Polsce, Prace Geograficzne, 132, 99-132, DOI: 10.4467/20833113PG.13.005.1095.

Bodzak P., 2007, Detekcja i lokalizacja wyładowań atmosferycznych, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa, 135 s.

Borsky S., Unterberger C., 2019, Bad weather and flight delays: the impact of sudden and slow onset weather events, Economics of Transportation, 18, 10-26, DOI: 10.1016/j.ecotra.2019.02.002.

Chowdhuri P., Anderson J.G., Chisholm W., Field T.E., Ishii M., Martinez, J.A., Marz M.B., McDaniel J., Mcdermott T.E., Mousa A.M., Narita T., Nichols D.K., Short T.A., 2005, Parameters of light-

ning strokes: A review, IEEE Transactions on Power Delivery, 20 (1), 346-358, DOI: 10.1109/TPWRD.2004.835039.

Curran E.B., Holle R.L., López R.E., 2000, Lightning casualties and damages in the United States from 1959 to 1994, Journal of Climate, 13 (19), 3448-3464, DOI: 10.1175/1520-0442(2000)013,3448:LCADIT.2.0.CO;2.

Dwyer J.R., Uman M.A., 2014, The physics of lightning, Physics Reports, 534 (4), 147-241, DOI: 10.1016/j.physrep.2013.09.004.

Gerz T., Forster C., Tafferner A., 2012, Mitigating the impact of adverse weather on aviation, [w:] Atmospheric Physics. Research Topics in Aerospace, U. Schumann (red.), Springer, Berlin, Heidelberg, 645-659, DOI: 10.1007/978-3-642-30183-4_39.

Gultepe I., Sharman R., Williams P.D., Zhou B., Ellrod G., Minnis P., Trier S., Griffin S., Yum S.S., Gharabaghi B., Feltz W., Temimi M., Zhaoxia Pu, Storer L.N., Kneringer P., Weston M.J., Hui-ya Chuang, Thobois L., Dimri A.P., Dietz S.J., França G.B., Almeida M.V., Albquerque Neto F.L., 2019, A review of high impact weather for aviation meteorology, Pure and Applied Geophysics, 176, 1869-1921, DOI: 10.1007/s00024-019-02168-6.

Hocker J., Basara J., 2007, A GIS-based analysis of supercell and squall line occurrence across Oklahoma, Oklahoma Climatological Survey University of Oklahoma, Norman, OK, 6 s.

Holle R.L., López R.E, Zimmermann C., 1999, Updated recommendations for lightning safety – 1998, Bulletin of the American Meteorological Society, 80 (100, 2035-2041, DOI: 10.1175/1520-0477(1999)080<2035:URFLS>2.0.CO;2.

Jasik D., Szyga-Pluta K., 2015, Charakterystyka występowania burz w Kaliszu, Badania Fizjograficzne. Seria A, 66, 35-45, DOI: 10.14746/bfg.2015.6.3.

Larjavaara M., Kuuluvainena T., Rita H., 2005, Spatial distribution of lightning-ignited forest fires in Finland, Forest Ecology and Management, 208, (1-3), 177–188, DOI: 10.1016/j.foreco.2004.12.005.

Mäkelä A., Saltikoff E., Julkunen J., Juga I., Gregow E., Niemelä S., 2013, Cold-season thunderstorms in Finland and their effect on aviation safety. Bulletin of the American Meteorological Society, 94 (6), 847-858, DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00039.1.

Misztal K., Siłuch M., 2021, Spatial analysis of atmospheric discharges in Lubelszczyzna in 2018, Applied Geomatics, 13, 969-979, DOI: 10.1007/s12518-021-00378-z.

Rowden K.W., Aly M.H., 2018, GIS-based regression modelling of the extreme weather patterns in Arkansas, USA, Geoenvironmental Disasters, 5 (6), DOI: 10.1186/s40677-018-0098-0.

Sasse M., Hauf T., 2003, A study of thunderstorm-induced delays at Frankfurt Airport, Germany, Meteorological Applications, 10 (1), 21-30, DOI: 10.1017/S1350482703005036.

Solon J., Borzyszkowski J., Bidłasik M., Richling A., Badora K., Balon J., Brzezińska-Wójcik T., Chabudziński Ł., Dobrowolski R., Grzegorczyk I., Jodłowski M., Kistowski M., Kot R., Krąż P., Lechnio J., Macias A., Majchrowska A., Malinowska E., Migoń P., Myga-Piątek U., Nita J., Papińska E., Rodzik J., Strzyż M., Terpiłowski S., Ziaja W., 2018, Physico-geographical mesoregions of Poland: verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data, Geographia Polonica, 91 (2), 143-170, DOI: 10.7163/GPol.0115.

Stallins J., Bentley M., 2006, Urban lightning climatology and GIS: An analytical framework from the case study of Atlanta, Georgia, Applied Geography, 26, 242-259, DOI: 10.1016/j.apgeog.2006.09.008

Stopa M., 1962, Burze w Polsce, Prace Instytutu Geografii PAN, 34, 109-179.
Stopa M., 1964, Przebieg dobowy występowania burz w Polsce, Przegląd Geograficzny, 36 (1), 103-118.
Tafferner A., Forste C., Hagen M., Hauf T., Lunnon B., Mirza A., Guillou Y., Zinner T., 2010, Improved thunderstorm weather information for pilots through ground and satellite based observing systems, [w:] 14th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, 90th AMS Annual Meeting, Atlanta.
Taszarek M., Czernecki B., Kozioł A., 2015, A Cloud-to-ground lightning climatology for Poland, Monthly Weather Review, 143 (11), 4285-4304, DOI: 10.1175/MWR-D-15-0206.1.
Wierzchowski J., Heathcott M., Flannigan M.D., 2002, Lightning and lightning fire, central cordillera, Canada, International Journal of Wildland Fire, 11 (1), 41-51, DOI: 10.1071/WF01048.
Wooi C.L., Abdul-Malek Z., Salimi B., Ahmad N.A., Mehranzamir K., Vahabi-Mashak S., 2015, Comparative study on the positive lighting return stroke electric fields in different meteorological conditions, Advances in Meteorology, DOI: 10.1155/2015/307424.

Streszczenie

Głównym celem opracowania jest analiza wyładowań doziemnych pod kątem przypuszczalnego ładunku elektrycznego jaki ze sobą niosą. Badaniom poddano wyładowania doziemne z lat 2014-2019 na terenie Polski. Dane w formacie tekstowym zostały pozyskane z zasobów IMGW-PIB (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy). Dokonano podziału wyładowań doziemnych ze względu na ich ładunek elektryczny oraz ich udział w każdej godzinie w ciągu doby. Północ i południe kraju okazały się terenami o przypuszczalnie najwyższych wartościach natężenia. Natomiast gęstość wyładowań o bezwzględnych wartościach natężenia prądu powyżej 100 000 A była największa na terenach górskich i podgórskich. Wykazano również, że im większe jest bezwzględne natężenie prądu w wyładowaniach, tym więcej w danym przedziale jest wyładowań dodatnich, np. dla natężeń powyżej 300 000 A aż 84% stanowiły wyładowania dodatnie, przy czym w całym badanym okresie średnio było ich 13%. Zaprezentowano także udział procentowy w podziale na wyładowania doziemne ze względu na ich ładunek elektryczny we wszystkich miesiącach w całym badanym okresie. Stwierdzono, że wystąpiły znaczne różnice w udziale wyładowań dodatnich i ujemnych w poszczególnych latach. Uzyskane wyniki i sformułowane na ich podstawie wnioski stanowią cenne uzupełnienie dotychczasowej wiedzy, a także są wartościowe dla poznawania mechanizmów wyładowań doziemnych. Pozwalają one również na weryfikację poprawności działania systemu detekcji wyładowań atmosferycznych.

Słowa kluczowe: wyładowania doziemne, przypuszczalne natężenie prądu, GIS, Polska.

Summary

Thunderstorms are dangerous atmospheric phenomena which, due to earth discharges, can pose a real threat to humans. In order to fully recognize the mechanisms, it is very important to constantly

research these phenomena. The aim of the study is mainly to analyse the earth discharges in terms of the presumed electric charge they carry. Cloud-to-ground discharges from 2014-2019 in Poland were tested. Data on lightning discharges in text format were obtained from the resources of IMGW-PIB. They contain, among others information about the date and time of discharges, their location, type of discharges and their current intensity. After processing, it was possible to load them into GIS programs, then performing analyses and visualizing the selected results. There were, inter alia, partition of cloud-to-ground discharges due to their electric charge and their share in each hour of the day. The map shows the distribution of absolute values of the current intensity. The north and south of the country turned out to be the areas with the highest presumed intensity values. The density of discharges with absolute current values above 100,000 A in macroregions was presented in the form of a table and a result map. This density is the highest in mountain and foothill areas. It was also shown that the higher the absolute current intensity in the discharges, the more positive discharges in a given range, e.g. above 300,000 A, where as much as 84% were positive discharges, while in the entire period under study there were 13% of them on average. The percentage break-down of earth discharges due to their electric charge in all months of the entire period under study is also presented. These relations varied. It also turned out that there were significant differences in the relation between the occurrence of positive and negative discharges in particular years. All the obtained results are of significant value in exploring the knowledge of the mechanisms of earth discharges, but they also allow to determine the operation of the lightning detection system.

Keywords: GIS, cloud-to-ground discharges, predicted intensity in cloud-to-ground discharges.