

Konrad SOBOLEWSKI¹
Piotr BARAŃSKI²
Jan WISZNIOWSKI³
Marek ŁOBODA⁴

STRUKTURA ELEKTRYCZNA DOZIEMNYCH PIORUNOWYCH WYŁADOWAŃ WIELOKROTNYCH NA PODSTAWIE DANYCH UZYSKANYCH Z LOKALNEGO SYSTEMU DETEKCJI WYŁADOWAŃ ATMOSFERYCZNYCH (LSDWA) W REJONIE WARSZAWY W 2009 R.

W artykule przedstawiono krótką genezę powstania oraz opis podstawowych działań lokalnego systemu rejestracji, lokalizacji i detekcji wyładowań atmosferycznych, jaki został zainstalowany w rejonie Warszawy w sezonie letnim 2009 r. Konfiguracja przestrzenna systemu LSDWA bazowała na sześciu stacjach pomiarowych rozmieszczonych w różnych miejscach na terenie Warszawy, zaś maksymalna odległość jaka występowała między stacjami wynosiła 12,5 km. Wykorzystywane w pomiarach anteny zostały dwukrotnie skalibrowane: raz w warunkach laboratoryjnych, drugi raz w warunkach polowych. Rejestracje prowadzone były w sezonie letnim w 2009 roku od połowy czerwca do września, a ich wynikiem były dane służące lokalizacji przestrzennej wyładowań atmosferycznych. W kolejnych dwóch sekcjach artykułu zawarto główne wyniki analizy struktury elektrycznej zarejestrowanych 17 doziemnych wyładowań wielokrotnych oraz dla dwóch z tych wyładowań pokazano przykładowe nałożenie otrzymanych lokalizacji 3D źródeł ładunku elektrycznego ich udarów piorunowych na odpowiadające czasowo mapy radarowe (tj. skany CAPPI, EHT i VCUT) chmury burzowej. Przedstawiona statystyka objęła zarówno ujemne udary krótkotrwałe (typu RS), jak i ujemne oraz dodatnie udary długotrwałe (typu CC). Stanowią one poszczególne składowe rozpatrywanych wyładowań wielokrot-

¹ Autor do korespondencji: Konrad Sobolewski, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Zakład Wysokich Napięć i Kompatybilności Elektromagnetycznej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, tel.: (22) 234 7856, konrad.sobolewski@ee.pw.edu.pl

² Piotr Barański, Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk, ul. Księcia Janusza 64, 01-452 Warszawa, tel.: (22) 6915-872, baranski@igf.edu.pl

³ Jan Wiszniowski, Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk, ul. Księcia Janusza 64, 01-452 Warszawa, tel.: (22) 6915-794, jwisz@igf.edu.pl

⁴ Marek Łoboda, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Zakład Wysokich Napięć i Kompatybilności Elektromagnetycznej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, tel.: (22) 234 7966, marek.loboda@ee.pw.edu.pl

nych zarejestrowanych w rejonie Warszawy. Na podstawie zebranego materiału pomiarowego określono również rozciągłość horyzontalną i wertykalną chmurowych źródeł ładunku elektrycznego tych wyładowań. W zakończeniu podano kilka przykładów zastosowań możliwości pomiarowych systemu LSDWA do dalszych badań właściwości i mechanizmu rozwoju doziemnych wyładowań wielokrotnych w chmurach burzowych.

Słowa kluczowe: wyładowanie atmosferyczne, lokalizacja i detekcja udarów piorunowych doziemnych wyładowań wielokrotnych, rejestracja pola elektrycznego wyładowań atmosferycznych, parametry doziemnych wyładowań atmosferycznych

1. Historia powstania systemu LSDWA

Impulsem i sposobnością do podjęcia działań w kierunku utworzenia własnej lokalnej sieci pomiarowej do rejestracji, lokalizacji oraz detekcji wyładowań atmosferycznych był udział przedstawicieli Polski – z Politechniki Warszawskiej oraz Instytutu Geofizyki PAN – w europejskim programie COST Action P18 pt. *“The Physics of Lightning Flash and its Effects”* prowadzonego w latach 2005-2009 przez prof. Rajeeva Thottapllil⁵. W roku 2006 wystosowany został wniosek do Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego o sfinansowanie specjalnego projektu badawczego pt. *„Badania wielokrotnych doziemnych wyładowań atmosferycznych, mechanizmu ich rozwoju, właściwości oraz wpływu na zagrożenia ludzi i obiektów”*, którego koordynatorem miała być Politechnika Warszawska, zaś wykonawcami IGF PAN oraz IMGW. Projekt po akceptacji realizowany był w latach 2007-2009 w postaci 6-cio punktowego naziemnego systemu pomiarowego nazwanego LSDWA – Lokalny System Detekcji Wyładowań Atmosferycznych, który operował na terenie Warszawy.

2. Podstawy teoretyczne funkcjonowania systemu

Krehbiel i in. [3] przedstawili po raz pierwszy metodę wykorzystania jednoczesnych rejestracji zmian pola elektrycznego (ΔE) w czasie wyładowań atmosferycznych, z naziemnej i wielopunktowej (8 stacji) sieci pomiarowej, do wyznaczenia lokalizacji 3D źródła ładunku elektrycznego oraz jego wartości Q rozładowywanej przez poszczególne udary piorunowe wyładowań doziemnych. O ile do znalezienia jednoznacznego rozwiązania układu czterech równań z poszukiwanymi czterema niewiadomymi $\{x, y, z, Q\}$ jest wystarczający zestaw czterech stacji pomiarowych, to ich nadmiar daje możliwość uzyskania większej wiarygodności (poziomu ufności) dla poszczególnych (poszukiwanych) rozwiązań.

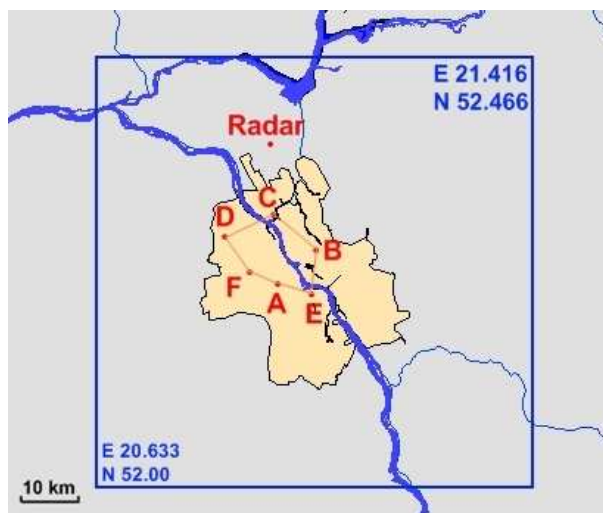
⁵ KTH, Sztokholm, Szwecja

Oprócz naziemnych pomiarów zmian pola elektrycznego ΔE , do końcowego rozwiązania problemu niezbędne jest jeszcze podanie stosownego założenia opisującego model rozpatrywanej geometrii źródła ładunku elektrycznego Q . W tym przypadku jest to model punktowego ładunku elektrycznego umieszczonego na wysokości z nad doskonale przewodzącą płaską powierzchnią ziemi.

Model taki, jak pokazał w swojej pracy Williams [6], sprawdza się w sytuacji, gdy ładunek elektryczny rozładowywany przez udar piorunowy będzie miał symetrię sferyczną oraz jego wymiary będą znacznie mniejsze od wysokości z . Szersze omówienie analizy błędów otrzymanych w rozpatrywanych lokalizacjach punktowych źródeł ładunku Q udarów piorunowych w wielokrotnych wyładowaniach doziemnych zarejestrowanych w sieci LSDWA jest zawarte w artykule Barański i in. [1].

3. Konfiguracja oraz sprzęt pomiarowy sieci LSDWA

Konfiguracja przestrzenna systemu LSDWA bazowała na sześciu stacjach pomiarowych rozmieszczonych w rejonie Warszawy (rys. 1). Każda z nich została oznaczona literą oraz opisana dokładnym położeniem geograficznym.



Rys. 1. Rozmieszczenie stacji pomiarowych na terenie Warszawy.

„Radar” – dopplerowski radar meteorologiczny METEOR 1500C w Legionowie (IMGW) „niebieski prostokąt” – wybrany obszar (52×58 km) wokół Warszawy wspólnego monitoringu burzowego z sieci LSDWA oraz z rutynowego systemu detekcji wyładowań atmosferycznych w Polsce – PERUN.

Fig. 1 Location of measuring stations in Warsaw.

"Radar" – the Doppler weather radar METEOR 1500C at Legionowo (IMGW)

"Blue box" - the selected area (52 × 58 km) around Warsaw depicted common storm monitoring area of the LLDN network and routine lightning detection system in Poland – PERUN.

Dokładne położenie stacji było następujące:

- „A” - dach gmachu Elektrotechniki PW, 00-662 W-wa, ul. Koszykowa 75
- „B” - dach budynku firmy SECURA, 04-388 W-wa, ul. Prochowa 42
- „C” - teren Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej, 03-195 W-wa, ul. Dorodna 16
- „D” - teren lotniska Warszawa Babice, 01-476 W-wa, ul. gen. bryg. S. Kaliskiego
- „E” - teren CBK PAN, 00-716 W-wa, ul. Bartycka 18A
- „F” - dach budynku IGF PAN, 01452 W-wa, ul. Księcia Janusza 64.

Maksymalna odległość występowała między stacjami **D** i **E** i wynosiła 12,5 km. Aparatura pomiarowa każdej stacji była umieszczona w szczelnie zamkniętym kontenerze. Same anteny pola elektrycznego oraz GPS-u były rozmieszczone na górze kontenera. Natomiast w środku kontenera znajdował się cyfrowy rejestrator oparty na standardzie PC/104 (rys. 2) oraz buforowy blok zasilający z akumulatorem YUASA NPL65-12(65 Ah-12V).

a)



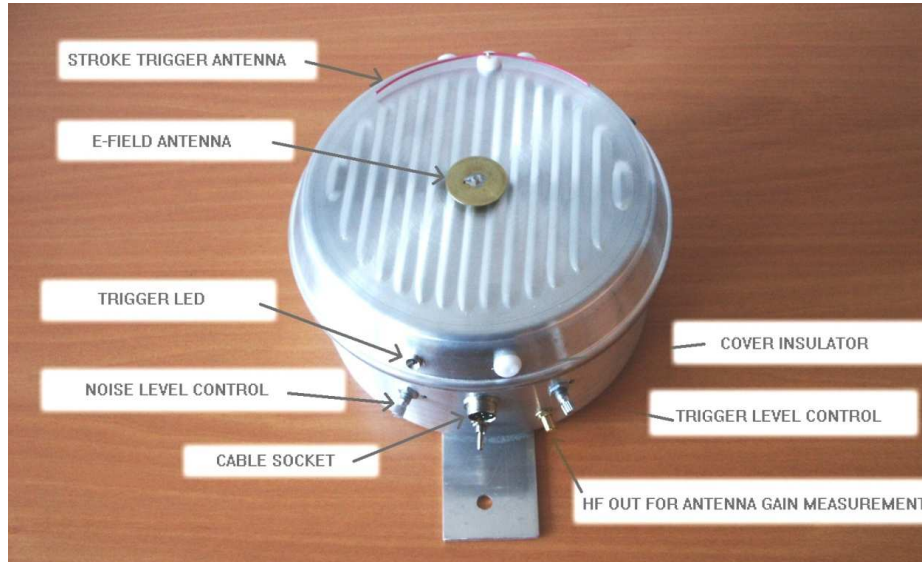
b)



Rys. 2. Widok stacji pomiarowej umieszczonej na dachu Gmachu Elektrotechniki Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej (a) oraz widok płyty czołowej i tylnej rejestratora (b).

Fig. 2 The view of measuring station located on roof of the Building of Electrical Engineering Faculty of Warsaw Technical University (a) and the view of front and back plate of the DVR (b).

Każda ze stacji wyposażona była w antenę pola elektrycznego do pomiaru składowej AC w paśmie częstotliwości LF (rys. 3). Anteny zostały skalibrowane dwukrotnie – raz w laboratorium wysokonapięciowym PW w jednorodnym polu elektrycznym (płaska elektroda z przyłożonym impulsem napięciowym), drugi raz w terenie z wykorzystaniem nośnej sygnału radiowego nadajnika „Warszawa I” w Solcu Kujawskim, oddalonego o około 200 km od sieci LSDWA w Warszawie.

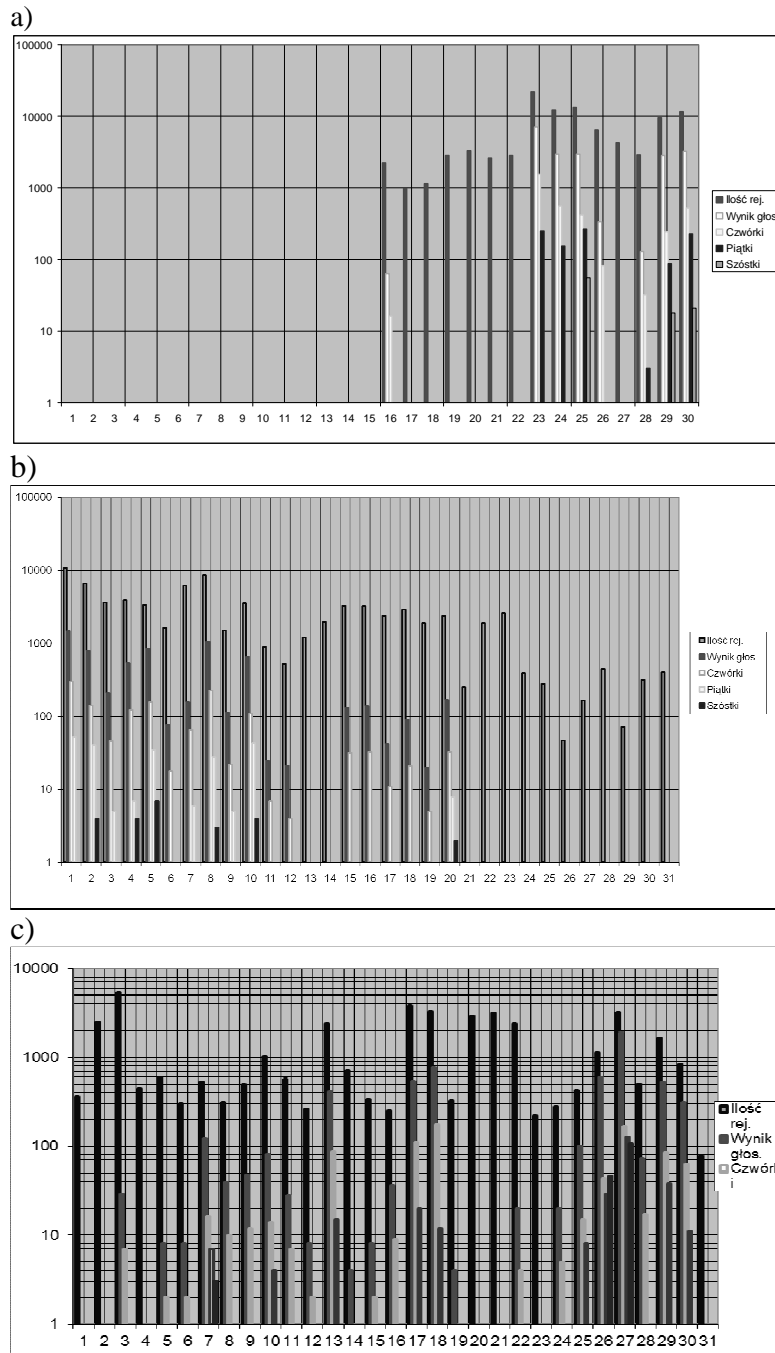


Rys. 3. Antena pola elektrycznego do pomiaru składowej AC w paśmie LF.

Fig. 3 The electric field antenna for measuring of AC component of E-field changes in LF band.

4. Statystyka rejestracji

Rejestracje prowadzone były w sezonie letnim w 2009 roku od połowy czerwca do września. Pełną statystykę, zgromadzonych w tym czasie wspólnych rejestracji pola elektrycznego przez sieć pomiarową LSDWA, przedstawiają histogramy na rys. 4.



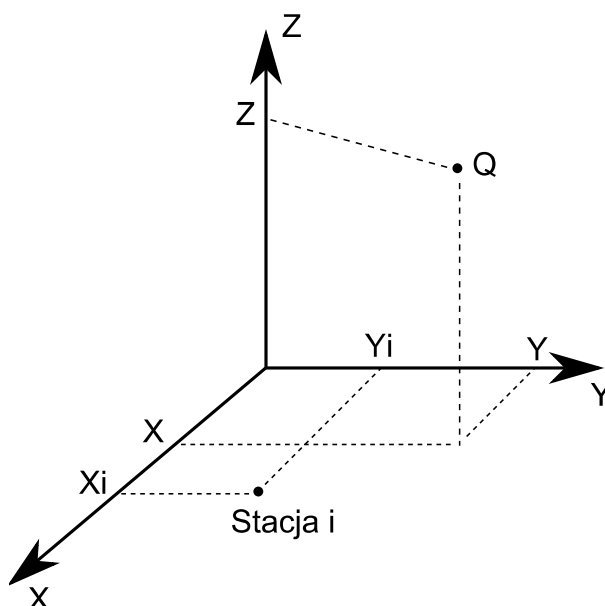
Rys. 4. Statystyka rejestracji wyładowań piorunowych w sezonie 2009: a) czerwiec, b) lipiec c) sierpień.

Fig. 4 Registration statistics of lightning strikes in 2009: a) June, b) July c) August.

Wyróżniona na rys. 4 „ilość rejestracji” odpowiada całkowitej ilości zarejestrowanych rekordów pomiarowych połączonych z jednoczesnym zadziałaniem „triggera” wyładowania doziemnego, „wynik głosowania” oznacza zbieżność czasu rejestracji w co najmniej dwóch stacjach pomiarowych, natomiast „czwórki”, „piątki” oraz „szóstki” oznaczają zbieżność czasu rejestracji w odpowiednio czterech, pięciu i sześciu stacjach sieci LSDWA.

5. Analiza struktury elektrycznej zarejestrowanych wyładowań doziemnych

Analiza „post-time” zarejestrowanych danych piorunowych, uzyskanych z sześciu niezależnych stacji pomiarowych sieci LSDWA w postaci odpowiadających zmian natężenia pola elektrycznego ΔE_i , została oparta na założonym modelu ładunku punktowego dla źródła składowej wielokrotnego wyładowania doziemnego [1, 3].



Rys. 5. Określanie współrzędnych x, y, z oraz ładunku Q punktowego źródła udaru piorunowego.

Fig. 5 Determination of the Cartesian coordinates x, y, z of a point electric charge source Q involved in lightning flash.

Ładunek Q oraz współrzędne kartezjańskie (x, y, z) punktowego źródła udaru piorunowego mogą zostać określone za pomocą zestawu równań dla każdej wykorzystanej stacji pomiarowej na podstawie zależności:

$$\Delta E_i(x, y, z, Q) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Qz}{\left[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + z^2 \right]^{3/2}} \quad (1)$$

gdzie x , y , z oraz Q są wyznaczone poprzez minimalizację funkcji chi-kwadrat opartej na formule podanej przez Krehbiela i in. [3] w postaci:

$$\chi^2 = \sum_i \frac{[\Delta E_i - \Delta E_i(x, y, z, Q)]^2}{\sigma_i^2} \quad (2)$$

gdzie σ_i jest standardowym odchyleniem pomiaru ΔE_i dla poszczególnej stacji.

Funkcja (2) jest funkcją nieliniową, dlatego do jej minimalizacji należy zastosować jedną z metod minimalizacji funkcji nieliniowych. Na początku zastosowano do tego celu wielowymiarową nieliniową metodę simplex (Downhill Simplex Method in Multidimensions) zwaną popularnie metodą „Ameba” [4]. Wyniki symulacji lokalizacji źródeł wyładowań doziemnych dla losowych parametrów (x , y , z , Q) wykazały często, że lokalizacja tą metodą była nietrafiona. Podobny rezultat osiągnięto przy minimalizacji metodą Newtona [3]. Świadczy to o tym, że lokalne minima funkcji (2) nie zawsze pozwalają prawidłowo lokalizować źródła wyładowania doziemnego oraz że bardziej skuteczna powinna być tu metoda globalnej minimalizacji funkcji (2). Do tego celu zaadaptowano więc trzy kolejne metody: metodę przeszukiwania po zadanej siatce wartości oraz dwie metody symulowanego wyżarzania [2, 5].

6. Lokalizacja 3D źródeł ładunku elektrycznego udarów piorunowych w doziemnych wyładowaniach wielokrotnych zarejestrowanych przez sieć LSDWA

Zestawienie wyznaczonych parametrów rozwoju czasowo-przestrzennego udarów piorunowych w 17 wielokrotnych wyładowaniach doziemnych zarejestrowanych w sieci pomiarowej LSDWA w czasie sezonu burzowego w 2009 r. przedstawione jest w tabeli 1.

W tabeli 1 użyty skrót *RS* (ang. return stroke) oznacza udar krótkotrwały, *CC* (ang. continuing current) udar długotrwały, zaś wartości Δd podają maksymalny rozciąg horyzontalny danego wyładowania, wartości Δz jego rozciąg pionowy, a Q_{sum} jego sumaryczny ładunek elektryczny. Zakresy wartości χ^2 określają przedział istotności (poziomu ufności) dla oszacowanych wartości parametrów (x, y, z, Q) poszczególnych udarów piorunowych w rozpatrywanych doziemnych wyładowaniach wielokrotnych.

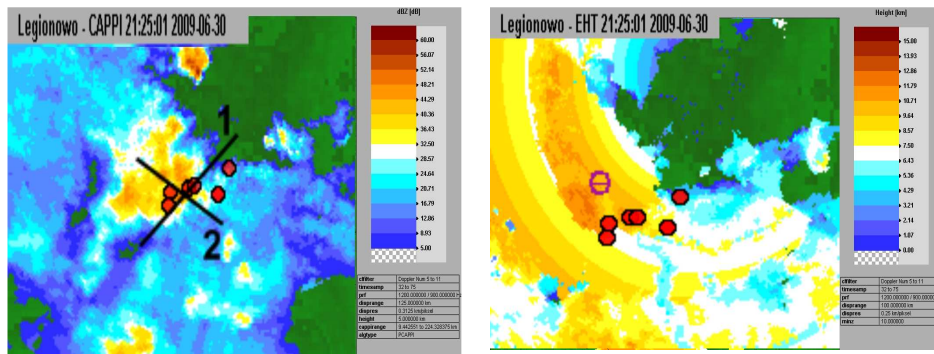
Tabela 1. Parametry rozwoju czasowo-przestrzennego udarów piorunowych w 17 wielokrotnych wyładowaniach doziemnych zarejestrowanych w sieci pomiarowej LSDWA w czasie sezonu burzowego w 2009 r.

Table 1 Parameters of the time and space development of 17 multiple cloud-to-ground flashes obtained from the LLDN recordings during thunderstorm season in 2009

L.P. wyładowania (kolejność oraz typ udaru w wyładowaniu wielokrotnym)	Odstęp czasowy między kolejnymi udarami wyładowania w ms	Δd km	Δz km	Q_{sum} C	χ^2 zakres
#1(1CC,2CC)	22	2,6	0,8	5,02	3÷3,6
#2(1RS,2CC,3CC,4CC)	46,9;59,3;51	12,2	7,5	-15,38	1÷40
#3(1RS,2CC,3CC)	82,7;25	0,5	0,2	-15,35	0,06÷0,3
#4(1RS,2RS,3RS,4RS,5RS,6CC)	23,7;25,8;34,1; 11,3;28,9	3,8	5,8	-53,62	0,4÷2
#5(1RS,2RS,3RS)	21,3;10,5	2,7	0,4	-60,77	7÷14
#6(1RS,2RS,3RS)	41,3;28,3	1	3,8	-0,53	37,7÷108,9
#7(1RS,2RS,3RS)	57,8;32,9	1	1,4	-0,21	92,5÷177,5
#8(1RS,2RS,3RS,4RS,5CC,6RS)	55;36,2;102,7; 62,1;148,1	5,7	3,8	-1,21	184,3÷223
#9(1RS,2RS,3RS,4RS)	48,2;30,7;35,1	8,1	5,8	-0,7	38,7÷187,9
#10(1RS,2RS,3RS)	40,8;36,1	0,8	0,5	-0,24	147,8÷187
#11(1RS,2RS)	49,6	4,3	0,2	-0,69	9÷20
#12(1RS,2RS,3RS)	21,2;37,8	2,7	0,1	-1,49	10÷11,6
#13(1RS,2RS,3RS)	52,3;55,9	5	0,9	-1,01	5,5÷9
#14(1RS,2RS,3RS)	70,6;66,3	6,6	0,7	-1,52	3÷6,8
#15(1RS,2RS,3RS)	46,1;66,2	0,4	1,7	-0,42	150,7÷178
#16(1RS,2RS,3RS,4RS)	32,5;64;31,7	6,4	3,4	-0,42	108÷222,8
#17(1RS,2RS)	24,6	1	1,7	-0,41	160÷211

Jako przykład nałożenia wyznaczonych lokalizacji 3D źródeł ładunku elektrycznego dla poszczególnych udarów piorunowych wielokrotnych wyładowań doziemnych, na odpowiadające czasowo mapy radarowe (skany CAPPI, EHT i VCUT) aktywnej wyładowczo chmury burzowej, wybrano sekwencję trzeciego i czwartego wyładowania (#3 i #4) z tabeli 1. Zestawienie w tabeli 1 dotyczy zdarzenia, gdy około godziny 20:00 UTC w obszarze detekcji sieci pomiarowej LSDWA utworzył się szereg komórek konwekcyjnych tworzących kompleks burzy wewnątrzmasowej. Cały ten obszar przemieszczał się z południa na północ. O godzinie 21:22:57,4899 UTC został zarejestrowany przez sieć LSDWA pierwszy udar krótkotrwały (RS) z 3-krotnego wyładowania doziemnego (#3), a o 21:28:50,9740 UTC nastąpiła ponowna detekcja pierwszego udaru RS, tym razem z serii 6-ciokrotnego wyładowania doziemnego (#4). Wszystkie udary tych dwóch wyładowań zostały zlokalizowane w obszarze jednej komórki burzowej, znajdującej się w fazie dysypacji. Do tych dwóch wielokrotnych wyła-

dowań można było dopasować czasowo, z dokładnością do 0,1 ms, tylko jedno jednokrotne wyładowanie doziemne zarejestrowane przez system PERUN.

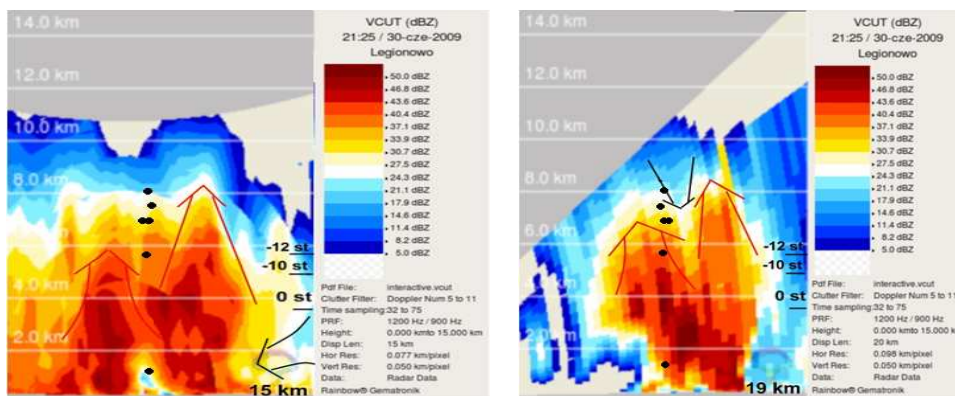


Rys. 6. Mapa odbiowości radarowej na wysokości 5000m (lewy panel) oraz mapa wysokości echa radarowego (prawy panel) z nałożonymi lokalizacjami udarów piorunowych.

Fig. 6 The CAPPI radar scan at the altitude of 5000m (left panel) and the EHT radar scan (right panel) with superimposed locations of the considered lightning strokes.

Sytuację tę przedstawia rys. 6, na którym dokonane zostało nałożenie danych lokalizacyjnych wyładowań piorunowych na mapę horyzontalnej odbiowości radarowej (skan CAPPI) oraz na mapę wysokości echa radarowego (skan EHT) chmury burzowej. Dane otrzymane z sieci LSDWA (lokalizacja udarów RS) przedstawione zostały w postaci czerwonych sześciokątów, zaś dane otrzymane z systemu PERUN jako różowy okrąg z symbolem „-”. Wzajemna odległość między lokalizacjami horyzontalnymi tych udarów wynosiła ok. 3-4 km. Dodatkowo na podstawie danych z systemu LSDWA było możliwe wyznaczenie pionowego położenia źródeł udarów piorunowych rozpatrywanych wyładowań doziemnych, tj. pierwszego RS z wyładowania #3 oraz 5-ciu kolejnych RS-ów z wyładowania #4 (patrz rys. 7).

Stadium dynamicznego rozwoju rozpatrywanej chmury burzowej charakteryzuje specyficzny układ przestrzenny dwóch prądów wstępujących (czerwone strzałki na rys. 7) oraz jednego z prądów zstępujących (strzałka czarna na rys. 7). Układ tych prądów został wyznaczony na podstawie danych z radaru dopplerowskiego i analizy pola wiatru na poziomie 3,5 km. Dodatkowo na obu przekrojach VCUT zaznaczono wysokości izoterm 0°C , -10°C oraz -12°C , otrzymane z najbliższego dostępnego terminu sondażu aerologicznego ze stacji Legionowo.



Rys. 7. Przekroje pionowe mapy radarowej CAPPI poprowadzone wzdłuż linii „1” - równoległej do wiązki radarowej (lewy panel) oraz linii „2” - prostopadłej do wiązki radarowej (prawy panel) z nałożonymi pionowymi lokalizacjami źródeł 6-ciu udarów piorunowych (czarne kropki) z dwóch wyładowań wielokrotnych zarejestrowanych w sieci LSDWA i wyróżnionych w Tab. 1.

Fig. 7 The vertical radar scans (VCUTs) obtained from the CAPPI ones and routed along the line indicated by "1" - parallel to the radar beam (left panel) and along the line indicated by "2" - perpendicular to the radar beam (right panel) with superimposed vertical locations of six electric charge sources (black dots) involved in two multiple CG flashes discharges recorded by the LLDN network and shaded in Tab.1.

Natomiast wartość parametru „CAPE” (ang. Convective Available Potential Energy), określającego z tego sondażu ilość dostępnej energii potencjalnej zgromadzonej w niezrównoważonej termicznie masie powietrza, wynosiła 2346,1 J/kg dla rozpatrywanego terminu obserwacji meteorologicznej. Dla przedziału wartości parametru „CAPE” od 1000 do 2500 J/kg stan równowagi atmosfery jest określany jako umiarkowanie niestabilny.

7. Podsumowanie

Ogółem statystyka przedstawiona w tabeli 1 obejmuje 48 ujemnych udarów RS, 7 ujemnych udarów CC oraz 2 dodatnie udary CC. Stanowią one poszczególne składowe rozpatrywanych wyładowań wielokrotnych zarejestrowanych w rejonie Warszawy. Są one zgrupowane w 12 tzw. wyładowaniach dyskretnych, tzn. występują w nich tylko udary typu RS, 4 mają charakter hybrydowy, tzn. składowymi wyładowania jest udar typu RS lub CC, a tylko jedno wyładowanie wielokrotne w tej statystyce ma same udary typu CC. Średnia arytmetyczna odstępu czasowego między poszczególnymi udarami w rozpatrywanym zestawieniu wielokrotnych wyładowań doziemnych wyniosła $45,42 \pm 25,62$ ms, a średnia geometryczna 39,64 ms. Natomiast średnia arytmetyczna dla wartości bezwzględnych ładunku elektrycznego przypadającego na jeden udar piorunowy typu CC wyniosła $2,61 \pm 2,74$ C, a średnia geometryczna dla otrzymanych warto-

ści ładunku była równa 1,39 C. Te same parametry dla składowych typu RS wyniosły odpowiednio $2,82 \pm 6,21$ C i 0,34 C.

Zbiorną charakterystykę rozkładu czasowo-przestrzennego źródeł ładunku elektrycznego wyznaczoną przez obliczanie wartości parametrów (x, y, z, Q) dla poszczególnych udarów piorunowych w rozpatrywanych doziemnych wyładowaniach wielokrotnych (wyładowania z numerami porządkowymi od 2 do 17 – patrz tabela 1) można przedstawić następująco:

- wysokość zlokalizowanych punktowych źródeł ładunku elektrycznego tych udarów była zawarta w przedziale od 0,4 km do 8,7 km, a ich maksymalna i minimalna różnica wysokości dla poszczególnego wyładowania wynosiła odpowiednio od $\Delta z = 3,9$ km do $\Delta z = 0,02$ km, przy rozciągłości horyzontalnej zmieniającej się od 5,5 km (wyładowanie najbardziej rozciągnięte) do 0,3 km (wyładowanie najbardziej skupione)
- większość wyładowań wielokrotnych (11 z 16, tj. 69%) była rozciągnięta horyzontalnie, a tylko 3 z 16 (tj. 19%) posiadały wyraźną strukturę pionową, przy czym 6 (tj. 38%) wyładowań rozwijało się zdecydowanie z góry na dół, a tylko 3 (tj. 19%) w odwrotnym kierunku z dołu do góry.

Należy podkreślić, że większość ze zlokalizowanych źródeł udarów piorunowych wielokrotnych wyładowań doziemnych (tabela 1) poza dwoma posiadała ujemny ładunek elektryczny (tj. przeciętnie -9,6 C w 1 wyładowaniu doziemnym). Spośród tych źródeł 24 znajdowało się w górnych partiach chmur burzowych, tj. na wysokości od 7 do 10 km i z temperaturą poniżej -15° C oraz odbiciowością echa radarowego na poziomie od 0 do 37 dBZ. W partii środkowej chmur burzowych, tj. na wysokości od 3 do 7 km i z temperaturą od -5 do -15° C oraz odbiciowością echa radarowego na poziomie od 10 do 38 dBZ było ich 21. Natomiast w dolnej partii chmur burzowych, tj. na wysokości od 1 do 3 km i z temperaturą od 0 do -5° C oraz odbiciowością echa radarowego na poziomie od 21 do 41 dBZ było ich tylko 12. Warto również zauważyć, iż im wyższa wartość odbiciowości radarowej tym większy i bardziej intensywny jest opad R, i tak:

- dla zakresu wartości odbiciowej od 5 do 25 dBZ opad jest słaby ($R = 0,07$ -1,3 mm/godz.)
- dla zakresu wartości odbiciowej od 30 do 35 dBZ opad jest średni ($R = 2,7$ -5,6 mm/godz.)
- dla wartości odbiciowej 40 dBZ opad jest silny ($R = 11,5$ mm/godz.)
- dla wartości odbiciowej 45 dBZ opad jest bardzo silny ($R = 23,7$ mm/godz.)
- dla wartości odbiciowej 50 dBZ opad jest intensywny ($R = 48,7$ mm/godz.)
- dla zakresu wartości odbiciowej od 55 do 60 dBZ opad deszczu lub gradu jest ekstremalny ($R = 100$ -205 mm/godz.)

8. Wnioski końcowe

Lokalizacje 3D oraz wielkość ładunku elektrycznego Q źródeł udarów piorunowych wielokrotnych wyładowań doziemnych, które zostały wyznaczone na podstawie danych z sieci LSDWA, umożliwiły uzupełnienie oraz zweryfikowanie parametrów i jakości detekcji tego typu wyładowań doziemnych, uzyskiwanych w rejonie Warszawy przez działające na obszarze Polski rutynowe systemy ciągłego monitoringu aktywności burzowej, jak np.: polska państwowa sieć VHF/LF-PERUN, czy niemiecka sieć komercyjna VLF/LF-LINET (Nowcast mobile GmbH).

Uzyskane z sieci LSDWA lokalizacje 3D źródeł udarów piorunowych wielokrotnych wyładowań doziemnych, naniesione na dopasowane czasowo mapy radarowe chmur burzowych, umożliwiły po raz pierwszy w Polsce na wyróżnienie w nich takich obszarów, w których dochodziło do inicjalizacji tych wyładowań. Jest to istotne z punktu widzenia bliższego poznania samej fizyki tego procesu oraz oceny wpływu różnych czynników dynamicznych, tj. np. procesów opadowych, czy struktury pola wiatru, na formowanie się aktywności elektrycznej w danym obszarze układu burzowego.

Badanie i poznanie rzeczywistej struktury elektrycznej doziemnych wyładowań wielokrotnych jest także bardzo istotne z punktu widzenia prowadzenia skutecznej ochrony ogromowej obiektów naziemnych. Bo chociaż doziemne wyładowania wielokrotne nie występują tak często, jak doziemne wyładowania jednokrotne, to sumaryczny ładunek elektryczny przenoszony w tych wyładowaniach jest na ogół dużo większy, niż ten transportowany w wyładowaniach jednokrotnych.

Sieć pomiarowa LSDWA może być również wykorzystana do naziemnej detekcji oraz wyznaczania elektrycznych momentów dipolowych tych bardzo silnych wyładowań doziemnych, które mogą być potencjalnym źródłem intensywnie badanych ostatnio rzadkich zjawisk świetlnych, tzw. TLE-ów (ang. Transient Luminous Events), obserwowanych ponad wysoko wypiętrzonymi chmurami burzowymi.

Podziękowania

Wszyscy autorzy wyrażają podziękowania za wsparcie finansowe otrzymane z Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach grantu COST/204/2006 na realizację specjalnego projektu badawczego oraz budowę sieci pomiarowej LSDWA w rejonie Warszawy. Dziękujemy także dwóm anonimowym recenzentom za ich cenne uwagi redakcyjne, które pozwoliły na poprawę językową pierwotnej wersji manuskryptu.

Literatura

- [1] Baranski, P., M. Loboda, J. Wiszniowski, and M. Morawski (2012); Evaluation of multiple ground flash charge structure from electric field measurements using the local lightning detection network in the region of Warsaw, *Atmos. Res.*, 117, 99-110, doi:10.1016/j.atmosres.2011.10.011.
- [2] Debski, W., 2004. Application of Monte Carlo Techniques for Solving Selected Seismological Inverse Problems. Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences, B-34(367), Warszawa.
- [3] Krehbiel P.R., M. Brook, R.A. McCrory: „An Analysis of the Charge Structure of Lightning Discharges to Ground”, *Journal of Geophysical Research*, 1979, Vol.84, No C5, pp. 2432-2456.
- [4] Jacoby, S.L.S., Kowalik, J.S., Pizzo J.T., 1972. Iterative Methods for Nonlinear Optimization Problems. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, New York.
- [5] Sen, M., Stoffa, P.L., 1995. Global optimization methods in Geophysical Inversion. *Advanced in Exploration Geophysics*, vol. 4, Elsevier, Amsterdam.
- [6] Williams, E.R., 1989. The tripole structure of thunderstorms. *J. Geophys. Res.*, 94, 13151-13167.

DETERMINATION OF CHARGE STRUCTURE OF MULTIPLE CLOUD-TO-GROUND FLASHES BASED ON ELECTRIC FIELD RECORDINGS OBTAINED FROM THE LOCAL LIGHTNING DETECTION NETWORK IN WARSAW DURING SUMMER OF 2009.

S u m m a r y

The paper presents a brief history of the genesis and description of the basic actions of the local registration system for lightning detection and location (LLDN) which has been installed in the Warsaw region during summer of 2009. The spatial configuration of the system was based on six measurement stations located in different places in Warsaw, and the maximum distance between two stations was 12.5 km. The used electric field antennas were calibrated twice: first time in the laboratory conditions and second time in the field conditions using the “Warsaw I” 225 kHz radio signal broadcast. In the following two sections of paper we have presented the main results of electric charge structure analysis of 17 events of multiple cloud-to-ground (CG) lightning flashes recorded simultaneously by all the LLDN six stations. The exemplary overlapping of 3D locations of the particular return stroke sources for two chosen multiple CG flashes on thundercloud radar scans (i.e., CAPPI, EHT and VCUT) from relevant time intervals are also shown. Presented lightning statistics covered both of the negative RS incidents, and negative and positive CC ones. These strokes are representing the particular components of multiple lightning flashes recorded in Warsaw area. On the basis of obtained data some conclusions on the time and space development of the considered lightning flashes were drawn. In the final remarks we have pointed out some applications of the measurement abilities of the LLDN system for future investigations of the important lightning flash parameters which can improve our knowledge about multiple CG flash initiation inside a thundercloud.

Keywords: lightning discharge, lightning location and detection, recordings of lightning electric field, lightning parameters

DOI: 10.7862/re.2013.16

Tekst złożono w redakcji: lipiec 2013

Przyjęto do druku: grudzień 2013