PRZEGLĄD GEOFIZYCZNY

Rocznik LXIV 2019 Zeszyt 1-2

Anna ODZIMEK
Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk

OBSZARY POLARNE W BADANIACH GLOBALNEGO ATMOSFERYCZNEGO OBWODU ELEKTRYCZNEGO ZIEMI

POLAR REGIONS IN THE EARTH'S GLOBAL ATMOSPHERIC ELECTRIC CIRCUIT RESEARCH

Wstęp

Globalny Atmosferyczny Obwód Elektryczny – GOE (ang. *Global Electric Circuit* – GEC lub *Global Atmospheric Electric Circuit* – GAEC) – jest koncepcją przepływu prądu elektrycznego w atmosferze Ziemi, która powstała, by wyjaśnić istnienie malejącego z wysokością, lecz wszechobecnego w dolnej atmosferze Ziemi pola elektrycznego. GOE należy do najważniejszych i stosunkowo trudnych przedmiotów badań elektryczności atmosfery, gdyż łączy jej wszystkie pojęcia i problemy, a tym samym inne dziedziny nauk fizycznych i nauk o Ziemi. Z definicji odnosi się do całej planety, a obszary polarne są w nim specjalnymi strefami, gdzie obwód elektryczny dolnej atmosfery styka się z układem prądów jonosfery i magnetosfery Ziemi. Obszary polarne są uważane za ważne także z punktu widzenia monitorowania GOE.

Przygotowując bibliografię tematu, oparto się głównie na pracach z dziedziny elektryczności atmosfery, dotyczących obserwacji w rejonach polarnych, starając się zarazem przedstawić główne nurty w badaniach zagranicznych i krajowych. Wiedzę ogólną na temat elektryczności atmosfery oraz szczegółową o GOE i innych zagadnieniach prezentowanych w niniejszej pracy można znaleźć w podręcznikach Chalmersa (1976), Israëla (1970, 1973) oraz MacGormana i Rusta (1998), a poza pozycjami zestawionymi w literaturze w materiałach Międzynarodowej Konferencji Elektryczności Atmosfery, organizowanej co cztery lata przez Międzynarodową Komisję Elektryczności Atmosfery (ang. *International Commission on Atmospheric Electricity* – ICAE). ICAE jest

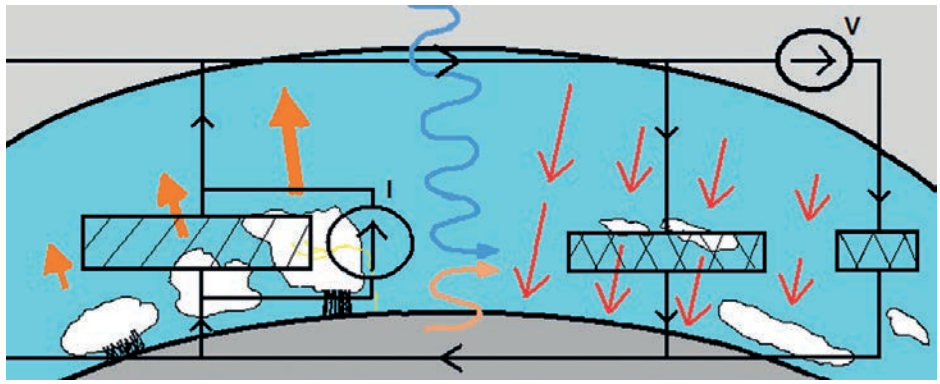
 DOI: 10.32045/PG-2019-002

obecnie komisją Międzynarodowej Asocjacji Meteorologii i Nauk o Atmosferze (ang. *International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences* – IAMAS), przy Międzynarodowej Unii Geodezji i Geofizyki (ang. *International Union of Geodesy and Geophysics* – IUGG).

W kolejnych częściach artykułu omówiono: koncepcję GOE oraz podstawowe pojęcia i wielkości fizyczne stosowane w badaniach nad elektrycznością atmosfery; znaczenie obszarów polarnych w GOE; historię pomiarów elektryczności atmosfery w rejonach polarnych do roku 2015; krajowe badania elektryczności atmosfery w rejonach polarnych oraz ich perspektywy.

Obwód elektryczny dolnej atmosfery

Przyjmuje się, że Globalny Obwód Elektryczny GOE napędzany jest przez generatory chmurowe, które stanowią chmury burzowe z wyładowaniami elektrycznymi oraz chmury konwekcyjne z ulewnym deszczem – w oryginalnej wersji ang. *thunder-clouds* i *shower-clouds* (Wilson 1921). Rozmieszczenie tych chmur na globie jest skoncentrowane w niskich i umiarkowanych szerokościach geograficznych, zwłaszcza w tzw. światowych centrach burzowych (Brooks 1925; Christian i in. 2003) zlokalizowanych w okolicach przyrównikowych w Indonezji i Azji, Afryce i Ameryce Południowej. Wyznacznikiem wysokiej aktywności centrum w GOE nie są jednak wyładowania atmosferyczne (np. Williams 2009). Ładowanie obwodu i przepływ prądu zachodzą dzięki separacji ładunku elektrycznego w zelektryfikowanych chmurach konwekcyjnych, w przybliżonej formie pionowego dodatniego dipola (nadmiarowy ładunek dodatni na górze, ujemny na dole) (np. Michnowski 1968) oraz dzięki możliwości przepływu prądu w wystarczająco zjonizowanym środowisku. Powstająca w chmurach różnica potencjałów rzędu ~10 MV wymusza przepływ prądu elektrycznego w górę (tzw. prądy Wilsona) do silniej zjonizowanej przez promieniowanie słoneczne jonosfery (elektrosfery), gdzie prąd ten się rozpływa i powraca w rejonach pięknej pogody – ściślej w tym wypadku chodzi o dolną atmosferę pozostałej części obszaru kuli ziemskiej poza jej elektrycznymi generatorami. Obwód domyka prąd płynący w dobrze przewodzącej – zarówno w porównaniu z powietrzem, jak i jonosferą – powierzchni Ziemi (rys. 1). Prąd płynący w atmosferze określany jest angielskim terminem *air-Earth current*, czyli prąd powietrze-Ziemia, jego głównym składnikiem jest prąd przewodzenia. Nośnikami prądu w dolnej atmosferze są jony dodatnie i ujemne powstające na skutek działania promieniowania kosmicznego oraz radioaktywności powietrza i podłoża (Swider 1985). Elektryczna przewodność właściwa powietrza (lub przewodnictwo właściwe, w skrócie nazywane przewodnictwem) blisko powierzchni Ziemi wyraża się w fS/m (10^{-15} jednostki), podczas gdy przewodność właściwa gleby w mS/m (10^{-3} jednostki), a wody morskiej w S/m. Podstawowy schemat obwodu GOE przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat globalnego atmosferycznego obwodu elektrycznego dolnej atmosfery Ziemi (jedna półkula); analogiczną część obwodu można narysować dla drugiej ziemskiej półkuli w obszarze szerokości umiarkowanych i biegunowych (poza rysunkiem)

Objaśnienie: strzałkami oznaczono główne prądy obwodu – prądy Wilsona i prądy powietrze-Ziemia, a także działanie jonizujące promieniowania kosmicznego i radioaktywności; Promieniowanie kosmiczne i radioaktywność (na rysunku strzałki faliste) powodują niewielką jonizację powietrza, która wystarcza jednak do podtrzymania przepływu prądu. Napięcia elektryczne w atmosferze generują zelektryfikowane chmury konwekcyjne burzowe i opadowe, wzbudzając prądy Wilsona (pomarańczowe strzałki) płynące w górę w kierunku przewodzącej jonosfery (obszar jasnoszary). Prądy te (czerwone strzałki) wracają w obszarze pięknej pogody (prąd powietrze-Ziemia) i zamykają obwód prądów w dobrze przewodzącej powierzchni gruntu (ciemnoszary). Schemat obwodu z oporami charakteryzującymi część generatora chmurowego oraz oporności obszarów pięknej pogody, prądowym generatorem chmurowym (I) i kierunkiem przepływu prądu, jest wpisany w rysunek; gałąź obwodu w obszarze pięknej pogody obszarów polarnych zawiera zmienne (także kierunkowo) źródło napięcia (V) reprezentujące generator magnetosferyczny

Fig. 1. Diagram of the global atmospheric electrical circuit of the Earth's lower atmosphere (one hemisphere); analogous fair-weather part of the circuit may be drawn in the Earth's other hemisphere over its temperate and polar latitudes (beyond the diagram)

Key: main currents in the circuit – the Wilson currents and air-Earth current are marked with arrows, as well as the ionising effects of cosmic rays and radioactivity. Cosmic rays and radioactivity (wavy arrows) slightly ionise the air but sufficiently to support the current flow. Electrical voltages in the atmosphere are generated by the electrified convective clouds like thunderstorm and shower clouds inducing the Wilson currents (orange arrows) flowing upward towards the conductive ionosphere (light grey area). These currents return in the area of fair weather (air-Earth current) and close the circuit in the well-conducting surface of the ground (dark grey). The schematics of the circuit with cloud current generator resistances and fair-weather resistances, the cloud current generator (I) and main directions of the flow is drawn over the diagram; the branch of the fair-weather area in polar regions contains a variable (also directionally) voltage source (V) representing the magnetospheric generator

Silnie zjonizowane warstwy atmosfery powyżej ~50-60 km (jonosfera o przewodnictwie przewyższającym kilka rzędów przewodnictwo przy ziemi) osiągają potencjał elektryczny (V_I) rzędu +250 kV w stosunku do powierzchni Ziemi (Markson 2007). Przyjmując, że opór atmosfery wynosi ~200 Ω (Tinsley, Zhou 2006), całkowity prąd elektryczny płynący w obwodzie atmosferycznym to 1.25 kA. Zarówno potencjał elektryczny jonosfery, jak i opór atmosfery ulegają wahaniom w związku ze zmianami intensywności generatorów chmurowych, promieniowania jonizującego oraz poziomu i rodzaju zanieczyszczeń aerozolowych. Opór elektryczny słupa atmosfery o przekroju 1 m^2 to tzw. oporność kolumnowa (R_c). Jej wartość zależy, z definicji, od lokalnego pionowego profilu przewodności powietrza atmosferycznego i wysokości nad poziomem morza. Przewodność elektryczna powietrza jest funkcją kilku czynników zmiennych z wysokością, takich jak: produkcja jonów przez promieniowanie kosmiczne, produkcja jonów przez radioaktywność gleby i powietrza (źródła jonów), współczynniki rekombinacji jonów, stężenie aerozolu, stężenie jąder kondensacji (ang. *cloud condensation nuclei* – CCN) oraz odpowiadające rodzajom aerozolu i CCN współczynniki przyłączania jonów (straty jonów). W konsekwencji oporność kolumnowa ma skomplikowany rozkład wartości we współrzędnych geograficznych i w czasie – dotyczy to również pola elektrycznego i gęstości prądu atmosferycznego. Około ~90% oporności kolumnowej przypada na pierwsze kilka kilometrów słupa atmosfery ponad powierzchnią gruntu i tu występują najsilniejsze pola elektryczne.

Pole elektryczne pięknej pogody

Zgodnie z prawem Ohma, gęstość prądu elektrycznego (J_z – jako dominujące rozważamy tylko składowe pionowe, tj. wzdłuż osi z) w danym miejscu na globie wyraża się stosunkiem potencjału jonosfery i oporności kolumnowej (1). Natomiast pole elektryczne (E_z) w danym położeniu wyraża się stosunkiem gęstości prądu i przewodności powietrza w tym miejscu (2). Z powodu zależności od przewodnictwa elektrycznego, pole elektryczne charakteryzuje ponadto zmienność z wysokością.

$$J_z = \frac{V_I}{R_c} \tag{1}$$

$$E_z = \frac{J_z}{\lambda} = \frac{V_I}{\lambda R_c} \tag{2}$$

gdzie: J_z – gęstość elektrycznego prądu (z – składowa pionowa); E_z – pole elektryczne; l – przewodnictwo elektryczne właściwe (elektryczna przewodność właściwa) powietrza; R_c – oporność kolumnowa; V_I – potencjał elektryczny jonosfery.

Wartości gęstości prądu elektrycznego w obwodzie GOE sięgają rzędu kilku lub kilkunastu pA/m^2, a pole elektryczne przy powierzchni Ziemi, w warunkach pięknej pogody, wynosi od kilkudziesięciu do kilkuset V/m. Użycie prawa Ohma zakłada, że rozważa się tylko prąd przewodzenia, czyli ruch ładunków w polu elektrycznym. Taki typ przepływu prądu elektrycznego w atmosferze stanowi jego podstawową część, choć w warstwie planetarnej występują również inne rodzaje transferu ładunku elektrycznego, takie jak: prąd konwekcji, prąd opadu, prąd koronowy, wyładowania elektryczne (MacGorman, Rust 1998), które w postaci odrębnych składowych prądu całkowitego związane są często z obszarem generatorów chmurowych (chociaż prąd konwekcyjny i inne dynamiczne zaburzenia rozkładu cząstek i ładunków, występujące w warstwie planetarnej, np. wiatr, wymiana mas powietrza, dotyczą też pozostałych obszarów). Pojawiające się zanieczyszczenia i inne aerozole wpływają poprzez przewodność na pole E_z, powodując jego zmianę nawet przy tym samym J_z. Atmosferyczne pole elektryczne w pobliżu powierzchni Ziemi jest więc zależne od czynników meteorologicznych i atmosferycznych, które wpływają na lokalne powstawanie, gromadzenie się lub odpływ ładunku elektrycznego – zatem pole lokalne różni się często od jego globalnego charakteru wynikającego z GOE. Należy mieć to na uwadze przy analizie naziemnych pomiarów parametrów elektrycznych. Pomocniczo ustalono kryteria opisujące warunki określane w elektryczności atmosfery jako piękna pogoda (*pp*), czyli takie, gdy pole elektryczne atmosfery najwyżej w małym stopniu zależy od lokalnych warunków meteorologicznych, co jest prawdopodobne przy braku zachmurzenia, opadów, mgły, pyłu i silnego wiatru (Imyanitov, Chubarina 1965). Technicznie określa się je następującymi kryteriami (np. Kubicki i in. 2016a): najwyżej niewielkie zachmurzenie w piętrze niskim (<4/8), brak opadów, mgły i osadów, niska prędkość wiatru (<6 m/s). Czasem stosuje się dodatkowe kryteria, jak minimalna i maksymalna wartości pola, wpływ stężenia i rodzaju aerozolu. Chcąc uzyskać wiarygodne obserwacje GOE, należy bezwzględnie monitorować spełnienie kryteriów *pp*. Tylko w takich warunkach pogodowych można spodziewać się, że pole odzwierciedla sygnał globalny GOE. W związku z tym pomiary elektryczności atmosfery najlepiej prowadzić w miejscach, gdzie warunki pogodowe są stabilne, a stężenie aerozolu jest niskie.

Dobowa zmienność GOE

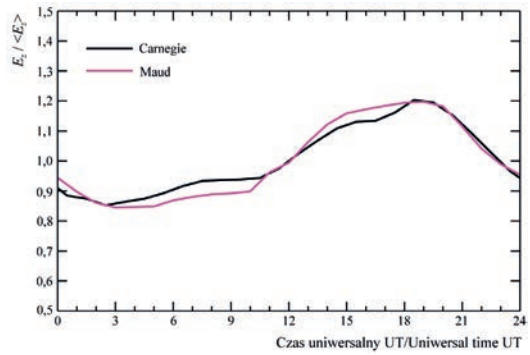
Niezwykle ważne dla badań globalnego obwodu Ziemi GOE były pomiary atmosferycznego pola elektrycznego w czystym powietrzu na Oceanie Spokojnym, Indyjskim i Atlantyckim, przeprowadzone podczas czterech rejsów żaglowca „Carnegie", zorganizowanych przez Waszyngtoński Instytut imienia Carnegiego (ang. *Carnegie Institution of Washington* – CIW) w latach 1915-1929

(Mauchly 1926; Gish i in. 1946). Dobowe średnie wahania E_z w warunkach dobrej pogody, obliczone na podstawie pomiarów z „Carnegie", pokazują zmienność pola w czasie uniwersalnym, z minimum ok. 03-04 UT i maksimum około 18-21 UT, znaną jako krzywa Carnegie (Parkinson, Torreson 1931) – rysunek 2. Podobieństwo dobowych zmian E_z z różnych miejsc w funkcji czasu uniwersalnego zauważono wcześniej dzięki obserwacjom ze stacji polarnych (Hoffmann 1924; Israël 1953). Uważa się, że ten charakter zmian dobowych pola E_z wynika przede wszystkim z regularnych, codziennych wahań konwekcyjnej i elektrycznej aktywności chmur, skoncentrowanej we wspomnianych ośrodkach w Indonezji, Azji, Afryce i Ameryce (Whipple 1929), a krzywą Carnegie uważa się za wzór zmian dobowych GOE. Z powodu wpływu efektów lokalnych obserwacje atmosferycznego pola elektrycznego na świecie potwierdzają ten wynik w różnym stopniu, w zależności czy stacja jest lądowa czy morska i zależnie od położenia na globie: szerokości geograficznej, wysokości n.p.m. oraz poziomu zanieczyszczeń (Israël 1966), a nawet odległości od centrów burzowych, np. pomiary CIW w Huankayo (Torreson, Wait 1948) mogą wskazywać na wpływ burzowego ośrodka amerykańskiego na tamtejszą dobową zmienność E_z.

Sprzężenie z układem prądów magnetosfery i jonosfery

Obwód elektryczny dolnej atmosfery zamyka się w jej wyższych warstwach na wysokości dolnych warstw jonosfery Ziemi i może przez to ulegać wpływom, którym jest ona poddawana przez zmienną pogodę kosmiczną (Michnowski 1998) z powodu sprzężenia z magnetosferą, która oddziaływuje z wiatrem słonecznym i międzyplanetarnym polem magnetycznym (ang. *Interplanetary Magnetic Field* – IMF). Przegląd wpływających zjawisk fizyki kosmicznej można znaleźć w pracach Wernik (1996); Popielawska (2002); Kłos i in. (2007), a szeroki przegląd wyników badań sprzężeń magnetosfery z wiatrem słonecznym w pracy Milan i in. (2017).

Stały wpływ na GOE ma zjawisko konwekcji jonosferycznej, związane właśnie z oddziaływaniem magnetosfery z wiatrem słonecznym i IMF. Przejawia się ono obecnością w obszarach polarnych pary lub więcej sąsiadujących ze sobą obszarów (zatok) o obniżonym i podwyższonym potencjale elektrycznym w ustawieniu względem osi Ziemia-Słońce i uzależnionym od parametrów IMF (Dungey 1961). Obszary zmienionego potencjału znajdują się zarówno na półkuli północnej, jak i południowej w rejonach okołobiegunowych magnetycznych, przy czym konwekcja na półkulach nie musi być symetryczna. Dodatkowe zmiany potencjału elektrycznego jonosfery, wywołane sprzężeniem z układem pól i prądów elektrycznych magnetosfery z dolną atmosferą (Park 1976a), będziemy dalej nazywać, jak to się przyjęło w piśmiennictwie na temat elektryczności atmosfery, generatorem lub dynamem magnetosferycz-



Rys. 2. Względne zmiany dobowe atmosferycznego pola elektrycznego E_z na podstawie pomiarów Waszyngtońskiego Instytutu im. Carnegiego w czasie rejsów badawczego żaglowca „Carnegie" (oceany) oraz „Maud" (Arktyka); wartości na podstawie wykresu w Whipple, Scrase (1936)

Fig. 2. Relative diurnal variation of the atmospheric electric field, E_z, based on Carnegie Institution of Washington measurements on research cruises of the „Carnegie" sailing ship (oceans) and „Maud" (Arctic); values based on the curves plots in Whipple and Scrase (1936)

nym. Na rysunku 1 został on schematycznie przedstawiony jako dodatkowe źródło napięcia włączone w obwód w obszarach polarnych. Dla obserwatora na Ziemi ten specyficzny rozkład potencjału elektrycznego konwekcji jonosferycznej, zwany też rozkładem potencjału czaszy polarnej (ang. *polar cap potential pattern*), obraca się zgodnie z ruchem dziennym sfery niebieskiej i generuje dodatkowe zmiany potencjału jonosfery w ciągu doby w zakresie ±20-100 kV (np. Bering i in. 1998; patrz również rys. 4).

W czasie subburz i burz magnetycznych wzmacniają się układy prądów elektrycznych związanych z konwekcją, czyli prądy Birkelanda zamykane przez prądy płynące w jonosferze, i uaktywniają się prądy zorzowe. Różnica potencjałów między zatokami dodatniego i ujemnego potencjału konwekcji, czyli potencjału czaszy polarnej (ang. *polar cap potential, transpolar voltage* lub *dawn-dusk potential*), może wtedy sięgać nawet do 250 kV; zbliżając się do tych wartości ulega nasyceniu (np. Siscoe i in. 2002). Podczas silniejszych zaburzeń wpływ konwekcji jonosferycznej i prądów zorzowych rozszerza się na niższe szerokości geomagnetyczne (np. Olson 1971). Nie są to więc nawet w przybliżeniu stałe rozkłady potencjałów i prądów, lecz dość zmienne czasowo i przestrzennie rozkłady zależne od aktualnych parametrów sprzężenia magnetosfery z wiatrem słonecznym, tj. jego prędkości i gęstości oraz od konfiguracji międzyplanetarnego pola magnetycznego i stanu magnetosfery.

Poza generatorem magnetosferycznym znaczenie ma również tzw. dynamo jonosferyczne, które powoduje dodatkową, rzędu ±10 kV, różnicę potencjału elektrycznego między półkulą północną i południową (Roble 1985; Tinsley 2000).

Obszary polarne w GOE

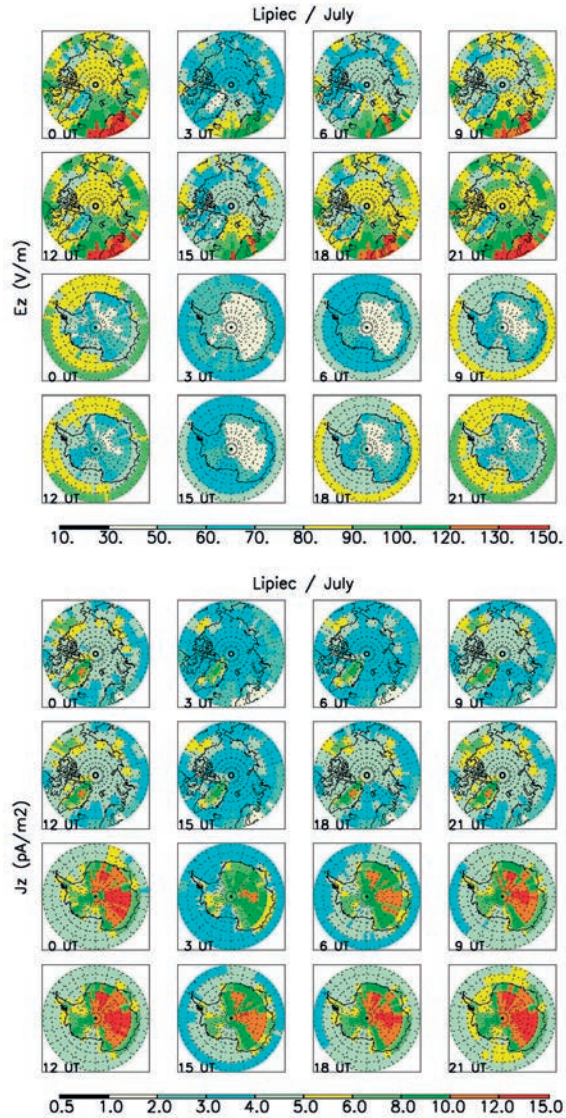
Obszary polarne są interesujące dla naukowców ze względu na właściwości GOE i możliwości jego badania. Strefy te są w oddalone od największych generatorów chmurowych, szczególnie burzowych, choć burze zdarzają się i na tych szerokościach geograficznych, np. Alaska czy Spitsbergen (Soroka, Bania 2013). W rejonach polarnych ważniejsze z punktu widzenia generacji prądu elektrycznego w atmosferze i w GOE mogą być burze śnieżne (Anderson 1966) oraz chmury Nimbostratus, których rola w obwodzie nie jest do końca zbadana (Odzimek, Lester 2009; Odzimek i in. 2014). W obserwacjach elektryczności atmosfery obszarów polarnych wyraźnie zaznacza się, ze względu na sąsiedztwo biegunów geomagnetycznego i geograficznego, obecność generatora magnetosferycznego – zwłaszcza tam, gdzie te dwie strefy przybiegunowe nakładają się na siebie (Park 1976a). Znaczna odległość od centrów generatorów chmurowych oraz mniej zanieczyszczona i stabilniejsza atmosfera, to dodatkowa zaleta obserwacji GOE z rejonów polarnych, gdzie w obszarach ze spełnionymi kryteriami *pp* powinien być widoczny sygnał obwodu. Miejscem, gdzie przez większość część roku panują warunki pięknej pogody jest przede wszystkim antarktyczny płaskowyż; wybrzeża Antarktydy mają dużo mniej korzystne warunki pogodowe ze względu na ciągłe działanie układów cyklonalnych.

Do cech, które różnią rejony polarne od pozostałych części globu z punktu widzenia biernych elementów obwodu GOE, czyli mających wpływ na przewodnictwo lub jej odwrotność, tj. oporność powietrza atmosferycznego, a w konsekwencji wpływ na oporności kolumnowe, należą:

- profil produkcji jonów atmosferycznych przez promieniowanie kosmiczne o wyższych wartościach jonizacji, bez tzw. „kolana", czyli maksimum na wysokości około kilkunastu km (Israël 1973; Tinsley, Zhou 2006, tamże rys. 4);
- osłabiona produkcja jonów atmosferycznych przez radioaktywność gruntu ze względu na pokrywę lodową oraz występowanie tzw. warstwy elektrodowej (Ruhnke 1962; Tinsley, Zhou 2006, tamże rys. 5);
- niższe stężenia aerozolu i odmienny jego rodzaj w porównaniu z innymi rejonami globu (Hess i in. 1998; Tinsley, Zhou 2006, tamże rys. 6);
- wysokość n.p.m. i występowanie płaskowyżu (Dalrymple 1966).

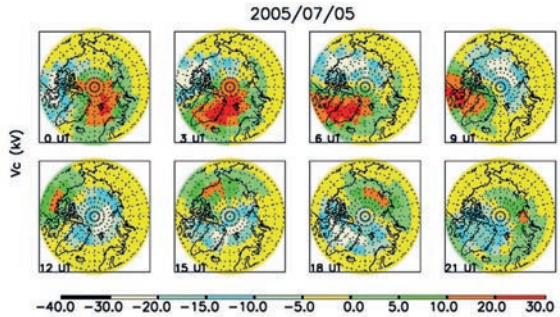
Wymienione wyżej własności, mające wpływ na przewodnictwo elektryczne dolnej atmosfery polarnej, powodują, że rejony polarne charakteryzują się niższymi opornościami kolumnowymi i niższymi wartościami pola elektrycznego, wyższymi zaś wartościami gęstości atmosferycznego prądu elektrycznego.

Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń pola elektrycznego i gęstości prądu elektrycznego z modelu GOE „EGATEC" (Odzimek i in. 2010). Na mapach (rys. 3) przedstawiono modelowe wartości przyziemnego pola elektrycznego i gęstości prądu pięknej pogody w Arktyce i Antarktyce w miesiącu lipcu



Rys. 3. Zmiany dobowe i rozkład przestrzenny wartości przyziemnego pola elektrycznego atmosferycznego pięknej pogody (E_z; górny panel) i gęstości prądu elektrycznego (J_z; dolny panel) w rejonach polarnych, dla lipca według modelu EGATEC (Odzimek i in. 2010), w terminach 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 i 21 UT; Arktyka – dwa rzędy górne, Antarktyka – dwa rzędy dolne

Fig. 3. Diurnal variations and spatial distribution of the fair-weather atmospheric electric field (E_z; upper panel) and atmospheric electric current density (J_z; bottom panel) in the polar regions, for July according to EGATEC model (Odzimek et al. 2010), at 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 and 21 UT; Arctic – two upper rows, Antarctica – two lower rows



Rys. 4. Zmiany dobowe i przestrzenne wartości potencjału elektrycznego konwekcji jonosferycznej (V_c) w Arktyce, w dniu 5 lipca 2005 roku, według modelu Weimera (Weimer 2005) w terminach 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 i 21 UT

Fig. 4. Diurnal and spatial variations of the ionospheric convection potential (V_c) in the Arctic, for 5 July 2005, according to Weimer model (Weimer 2005) at 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 and 21 UT

dla siatki punktów geograficznych z rozdzielczością 5° w szerokości i długości geograficznej oraz trzygodzinną rozdzielczością czasową z terminami 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 UT. Można zauważyć minimum aktywności GOE o 3 UT i maksimum o 21 UT (por. z rys. 2). Wartości pola elektrycznego w Arktyce to ~60-130 V/m, gęstość prądu ~3.0-6.0 pA/m^2. W Antarktyce gęstość prądu może przybierać wartości ~3.0-15.0 pA/m^2, a pole ~50-100 V/m. Przewodność właściwa powietrza polarnego przy pięknej pogodzie powinna zatem pozostawać na poziomie kilkudziesięciu i więcej fS/m, np. $\lambda^P = J_z^P / E_z^P \cong$ (4 pA/m^2)/(100 V/m) = 40 fS/m, w porównaniu do kilku lub kilkunastu fS/m, które obserwuje się np. w Świdrze k. Warszawy (Odzimek i in. 2018). Przedstawione modelowe wartości E_z i J_z są zgodne z wynikami obserwacji zamieszczonych w podręczniku Israëla (1973). Dokładniejsza analiza wyników pomiarowych i modelowych wykracza poza ramy tego artykułu.

Dla zobrazowania dodatkowych zmian potencjału jonosfery w rejonach polarnych, wynikających z konwekcji jonosferycznej, a nieuwzględnionych w bieżącej wersji modelu EGATEC, na rysunku 4 przedstawiono charakter dobowych zmian potencjału elektrycznego konwekcji jonosferycznej na półkuli północnej (Arktyka) na przykładzie 5 lipca 2005 roku (dzień spokojny magnetycznie), opracowanych na podstawie modelu Weimera (2005) w analogicznych terminach i siatce punktów jak na rysunku 3. Wejściowe parametry wiatru słonecznego i międzyplanetarnego pola magnetycznego zostały zaczerpnięte z danych OMNI w bazie NASA GSFC OMNIWeb[1]. W pracy Odzimek i in. (2011) oszacowano na podstawie danych elektrycznych z Hornsundu i modelu

[1] NASA Goddard Space Flight Center, Space Physics Data Facility, OMNIWeb http://omniweb.gsfc.nasa.gov

konwekcji z pomiarów naziemną siecią radarów HF SuperDARN (Ruohoniemi, Baker 1998), że ±10 kV potencjału konwekcji skutkuje zmianą ±10% wartości pola elektrycznego przy powierzchni ziemi.

Obserwacje GOE w obszarach polarnych

Ze względu na lokalizację w pobliżu geograficznego i geomagnetycznego bieguna, skutkującą szczególnymi cechami atmosfery i klimatu oraz powiązaniami z magnetosferą Ziemi, obszary polarne stały się ważną platformą dla badań atmosferycznych i geofizycznych oraz kosmicznych (Lessard i in. 2014) – szczególnie po okresie wypraw eksplorujących te rejony w XVIII i XIX wieku. Duże międzynarodowe wydarzenia naukowe, takie jak: I Międzynarodowy Rok Polarny (MRP, ang. *International Polar Year* – IPY) 1882-1883, Międzynarodowy Kongres Fizyków w Paryżu w 1900 roku, II Międzynarodowy Rok Polarny 1932-1933, Międzynarodowy Rok Geofizyczny (MRG, ang. *International Geophysical Year* – IGY) 1957-1958 (wymieniany czasem jako III MRP) oraz Międzynarodowy Rok Spokojnego Słońca 1964-1965 (ang. *International Quiet Sun Year* – IQSY) miały ogromny wpływ na rozwój działalności w wielu dziedzinach badawczych. Wzięło w nich udział szerokie grono naukowców z wielu krajów, a projekty te miały często w swoich planach badania w rejonach polarnych. W dziedzinie elektryczności atmosfery szczególne znaczenie miały ekspedycje Waszyngtońskiego Instytutu im. Carnegiego w pierwszej połowie XX wieku oraz przedsięwzięcia Międzynarodowej Komitetu Elektryczności Atmosfery w drugiej połowie stulecia, takie jak „*Ten-Year Program*", czyli dekada jednoczesnych pomiarów elektryczności atmosfery w różnych miejscach na globie (Dolezalek 1991).

Chociaż fizyka magnetosfery, pogoda kosmiczna i inne dziedziny zajmujące się badaniem związków Ziemia-Słońce traktowane są obecnie odrębnie od zagadnień fizyki atmosfery czy meteorologii, w szczególności elektryczności atmosfery, to jeszcze w XIX i początku XX wieku tematy związane z naturalnymi zjawiskami na Ziemi w powiązaniu z wpływem Słońca nazywano ogólnie „fizyką kosmiczną" (Kragh 2013b) i starano się koordynować badania dotyczące tej sfery nauki (Kragh 2013a). Wspomniane wydarzenia, jak I i II MRP, opierały się na tej koncepcji, pozwalając naukowcom podejmować zróżnicowaną tematykę, np. obserwacje meteorologiczne, badania zorzy polarnej czy pomiary ziemskiego pola magnetycznego np. Arctowski (1901) i inne tomy wyników Belgijskiej Ekspedycji Antarktycznej na żaglowcu „Belgica" 1897-1899, zeszyty wyników polskiej wyprawy II Międzynarodowego Roku Polarnego na Wyspę Niedźwiedzią (Lugeon i in. 1936).

Jak podkreśla Kasemir (1972), obserwacje w klimacie polarnym zapoczątkowano m.in. po to, by pozbyć się w analizach wpływu niepożądanych efektów,

takich jak np. „Austausch", związanych z pionową wymianą mas powietrza spowodowaną nagrzewaniem się lądu, która zaburza detekcję dobowego rytmu GOE w stacjach lądowych niskich i umiarkowanych szerokości. Wczesne pomiary miały na celu opisanie zjawiska GOE poprzez charakterystykę dobowych zmiany pola E_z z punktu widzenia obszarów polarnych (Israël 1953; Cobb 1976). W latach 70. XX w. i późniejszych, w publikacjach dotyczących m.in. stacji Vostok oraz Davis, skupiono się już na badaniu wpływu generatora magnetosferycznego, analizując przebiegi pola po odjęciu zmian GOE przewidzianych krzywą Carnegie, a także na badaniach zależności zmian przyziemnego pola elektrycznego od parametrów międzyplanetarnego pola magnetycznego (Park 1976b; Burns i in. 1995; Tinsley i in. 1998; Frank-Kamenetsky i in. 1999, 2001). W innych pracach starano się z obserwacji GOE usunąć efekt generatora magnetosferycznego (Corney i in. 2003; Reddel i in. 2004, Burns i in. 2005). Te dwa kierunki badań oparte na aktywności w obszarach polarnych są uprawiane do dziś (Kumar i in. 2008; Burns i in. 2012; Kleimenova i in. 2013), przy czym coraz częściej analizuje się jednoczesne pomiary z kilku stacji (Frank-Kamenetski i in. 2012; Kubicki i in. 2014; Victor i in. 2016, Burns i in. 2017), o ile spełnione są na nich warunki *pp*.

Obserwacje na stacjach arktycznych

Wkrótce po opanowaniu techniki wykonywania pomiarów pola elektrycznego obserwacje tego rodzaju prowadzono już nie tylko w strefie umiarkowanych szerokości, ale również w rejonach subpolarnych i polarnych. Systematyczne pomiary pola elektrycznego w Arktyce realizowano w czasie I MRP, podczas szwedzkiej ekspedycji na Spitsbergen (Przylądek Thordsen) (Andrée 1887; Heathcote, Armitage 1959). Kolejne pomiary przyziemnego pola elektrycznego w Svalbardzie wykonał J. Elster (1902) u brzegu Virgin Bay (Virgohamna) w czasie ekspedycji niemieckiej 1900-1901. W trakcie kolejnej niemieckiej wyprawy z lat 1913-1914 przeprowadzono pomiary pola w Obserwatorium Geofizycznym Ebeltofthafen na Półwyspie Mitra na Spitsbergenie (Hoffmann 1924).

Dłuższe pomiary elektryczności atmosfery w Arktyce prowadził wcześniej G. Simpson w norweskim obserwatorium Karasjok (Simpson 1906), dzięki specjalnemu grantowi badawczemu od Królewskiej Komisji Wielkiej Wystawy z 1851 r. Krótką kampanię pomiarową, ale za to wielu parametrów elektryczności atmosfery, wykonano na Islandii w czasie przejścia komety Halleya w roku 1910 (Ansel 1912). Do osiągnięć skandynawskich badaczy z początków ubiegłego stulecia zaliczyć należy również szwedzkie ponadroczne obserwacje w Vassijaure (Norinder 1916). Barlindhaug (1935) opisuje z kolei wyniki pomiarów E_z zebranych w Tromso w latach 1932-1933 (II MRP), ale wspomina także

o wcześniejszych krótkich epizodach pomiarowych – zarówno w obserwatorium w Tromso, jak i Hallde.

W czasie II MRP odbyło się kilka kampanii pomiarowych elektryczności atmosfery. Należały do nich obserwacje w czasie ekspedycji brytyjskiej do Fort Rae w Kanadzie (Sheppard 1937), francuskiej do Scoresby Sund na Grenlandii (Dauvillier 1938) oraz amerykańskie obserwacje w College (Fairbanks) na Alasce (Gish, Sherman 1940). W latach 30. i 40. w różnych okresach prowadzono pomiary na północnych krańcach Rosji w Jakucku, na Przylądku Czeluskin oraz w Ziemi Franciszka Józefa na Wyspie Hayesa (Lobodin, Paramonov 1972) oraz na stacji w Zatoce Cichej (Tikhaya Bay) na Wyspie Hookera w Ziemi Franciszka Józefa.

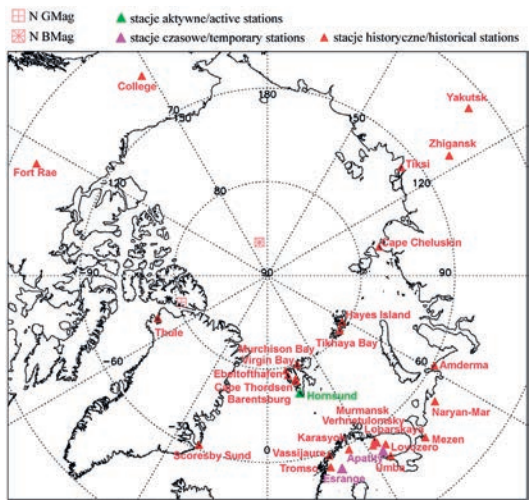
Po zakończeniu drugiej wojny światowej systematyczne obserwacje podjęto dopiero w czasie Międzynarodowego Roku Geofizycznego 1957-1958. W Arktyce prowadzono pomiary pola elektrycznego na grenlandzkim lodowcu w Thule (Kasemir 1972) oraz na Spitsbergenie w szwedzko-fińsko-szwajcarskiej stacji Kinnvika w Zatoce Murchisona (Lugeon i in. 1959), a także w Murmańsku (Popov i in. 2008). Wcześniej, w latach 50., amerykańscy badacze realizowali w rejonie Grenlandii pomiary na pokładzie specjalnego samolotu – powietrznego laboratorium elektryczności atmosfery (Clark 1957). W latach 70., gdy obowiązywał *Ten-Year Program*, w Arktyce prowadzono pomiary pola elektrycznego w College na Alasce (Shaw, Hunsacker 1976).

Na przełomie lat 1970-1980 pomiary pola elektrycznego wykonywano również na wielu stacjach arktycznych i subarktycznych Związku Radzieckiego, a ich głównym celem było dokładniejsze zbadanie efektów zórz polarnych i innych efektów magnetosferycznych oraz wpływu konwekcji magnetosferycznej (jonosferycznej) i prądów zorzowych na pole elektryczne atmosfery (Bandilet i in. 1986; Apsen i in. 1988; Sheftel 1991). Były to zarówno pomiary naziemne na stacjach, jak i powietrzne z wykorzystaniem balonów, wystrzeliwanych z Esrange na terytorium Szwecji w kampaniach pomiarowych „SAMBO" (ros. *Sinchronnije Awroralnyje Mnożestwiennyje Balonnye Observatorii*) w latach 1976, 1979 i 1982. W 1974 roku zmierzono gęstość prądu elektrycznego przy użyciu sond balonowych wypuszczonych z norweskiej stacji Andenes (Andoya) w kierunku Grenlandii (np. D'Angelo i in. 1976). Pomiary sondami wynoszonymi rakietą odbywały się na tej stacji jeszcze w latach 80. i 90., a w 1989 roku także na Wyspie Hayesa (Zadorozhny, Tyutin 1997; zestawienie i literatura do innych pomiarów E_z tamże). W Esrange w Szwecji pomiary balonowe prowadzono do końca lat 90., mierząc z ziemi gęstość prądu atmosferycznego (Belova, Kirkwood 2001). Po roku 2000 rosyjski monitoring elektryczności atmosfery prowadzono na Półwyspie Kolskim w Apatity, w ostatniej dekadzie w formie ciągłych pomiarów gęstości prądu elektrycznego (Akhmetov i in. 2010).

Od sezonu 1986/87 pomiary elektryczności atmosfery stały się elementem programu badawczego w Polskiej Stacji Polarnej im. Stanisława Siedleckiego

na Spitsbergenie (Michnowski 1996a). Co więcej, stacja w Hornsundzie jest w chwili obecnej jedyną stacją arktyczną prowadzącą od dekad stały monitoring badawczy tego rodzaju procesów. Tylko przez krótki okres w grudniu 1986 roku pomiary pola elektrycznego realizowano w rosyjskiej stacji w Barentsburgu na Spitsbergenie równolegle z obserwacjami na stacji średnich szerokości w Boroku (Zotov i in. 1991).

Rozmieszczenie arktycznych lądowych punktów lokalizacji naziemnych obserwacji elektryczności atmosfery przedstawia mapa na rysunku 5, z podziałem na stacje aktywne, czasowe i historyczne. Stacje historyczne wskazują miejsca, gdzie w przeszłości wykonywano pomiary bądź zrealizowano kampanię pomiarową, np. w czasie roku polarnego, lecz od wielu lat nie są już one wykorzystywane do obserwacji. Stacje czasowe oznaczają lokalizacje, w których pomiary odbywały się w ostatnich dwóch dekadach, ale nie wiadomo, czy są lub będą kontynuowane. Natomiast stacje aktywne to takie, w których monito-



Rys. 5. Stacje arktyczne elektryczności atmosfery – położenie stacji oznaczono trójkątami; na mapie naniesiono również bieżące położenie północnego bieguna magnetycznego (BMag N) oraz rzut osi dipola geomagnetycznego (GMag N)*; spis stacji znajduje się w tabeli 1

Fig. 5. Arctic atmospheric electricity stations – locations of the stations are marked with triangles; the current position of the north magnetic pole (BMag N) and the projection of the geomagnetic dipole axis (GMag N) is also marked; the list of stations is in table 1

* Większość wskazanych miejsc leży powyżej koła podbiegunowego (66°33'39''). Oś magnetyczna tworzy z osią Ziemi kąt około 10°, ale dokładne położenie biegunów magnetycznych odbiega od przecięć tej osi z powierzchnią Ziemi i ulega wiekowym zmianom. Aktualne położenia biegunów magnetycznych i przecięć z modelową osią magnetyczną zaczerpnięto ze Światowego Centrum Danych Geomagnetycznych w Kyoto (World Data Center for Geomagnetism, Kyoto), http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp.

ring elektryczności atmosfery odbywa się nadal – w sposób ciągły lub okresowy. Listę tych punktów zawarto w tabeli 1 wraz z informacją o mierzonych parametrach i okresie funkcjonowania. Przedstawiono stacje i miejsce pomiarowe położone na szerokościach geograficznych powyżej 60°N lub 60°S, z pominięciem europejskich obserwatoriów, jak Helsinki, Sankt Petersburg oraz Uppsala (Israël 1973; Tuomi 1989), zlokalizowanych blisko sześćdziesiątego równoleżnika.

Stacje antarktyczne

Wyprawy antarktyczne w początku XX wieku zaowocowały seriami pomiarowymi z rejonu Wyspy Petermann (Rouch 1911) i Przylądka Evansa (Simpson 1919). Koniec lat 50. i kolejna dekada, w tym Międzynarodowy Rok Geofizyczny oraz Międzynarodowy Rok Spokojnego Słońca, dały początek systematycznym stacjonarnym oraz kampanijnym obserwacjom elektryczności atmosfery na Antarktydzie (Kasemir 1972). Od tego czasu są one niezmiennie częścią antarktycznego programu naukowego. W ramach MRG pomiary prowadzono w belgijskiej stacji Base Roi Baudoin (van der Schueren, Koenigsfeld 1963; Buis 1968) i radzieckiej wówczas stacji Mirnyj (Gordiuk 1984). Wkrótce podobne programy uruchomiono na południowym biegunie geograficznym, m.in. w amerykańskiej stacji South Pole im. R. Amundsena i R. Scotta, gdzie prowadzono wieloletnie obserwacje elektryczności atmosfery, w czasie których mierzono oprócz pola również gęstość prądu elektrycznego, w tym za pomocą balonów (np. Cobb 1976; Burke, Few 1978; Muir, Smart 1981; Bering i in. 1991; Byrne i in. 1993). Amerykanie prowadzili balonowe pomiary parametrów elektrycznych także ze stacji Siple (Bering i in. 1998). Powietrzne pomiary parametrów elektrycznych w atmosferze do wysokości kilkudziesięciu kilometrów realizowali również badacze radzieccy przy pomocy rakiet wystrzeliwanych z antarktycznej stacji Molodyozhnaya (Bragin i in. 1980).

W latach 70. zainicjowano radziecko-australijsko-amerykański projekt naziemnych pomiarów pola elektrycznego atmosfery na stacji Vostok (Park 1976b; Frank-Kamenetsky 1983; Frank-Kamenetsky, Kalita 1986; Frank-Kamenetsky i in. 1999, 2001). W tamtym czasie rozpoczęto również obserwacje na japońskiej stacji Syowa (Kikuchi 1970), pod koniec lat 80. w australijskim obserwatorium Davis (Burns i in. 1995; Tinsley i in. 1998), a w latach 90. na indyjskiej stacji Maitri (Deshpande, Kamra 2001). W ostatnich dekadach pomiary prowadzone były okresowo np. w Syowa (Minamoto, Kadokura 2011) lub sporadycznie w innych miejscach – w 2015 roku przeprowadzono serię pomiarów pola elektrycznego w Halley (Nicoll, Harrison 2016). Ciągłe pomiary odbywały się w stacjach South Pole i Vostok.

Również MRP 2007-2009 wykorzystano do kampanijnych i wielopunktowych obserwacji elektryczności atmosfery. Specjalne automatyczne stacje

Tabela 1. Stacje i miejsca naziemnych pomiarów elektryczności atmosfery w Arktyce; w kolumnach: nazwa stacji (1 kolumna), mierzone wielkości i własności fizyczne – nie zawsze jednocześnie (5 kolumn), kraj wyprawy lub stacji (1 kolumna), obecność obserwacji elektryczności atmosfery w danej dekadzie rozpoczynając od 1890 do 2010 roku (13 kolumn)

Table 1. Stations and sites of ground-based atmospheric electric measurements in Arctic; columns: station name (1 column), measured parameters and physical properties – not always simultaneously (5 columns), country of expedition or station (1 column), presence of measurements in a decade starting from 1890 to 2010 (13 columns)

Nazwa stacji lub nazwa geograficzna	Mierzone wielkości i własności fizyczne					Kraj organizujący wyprawę lub będący właścicielem stacji	Dekady, w których odbywały się pomiary elektryczności atmosfery												
	E_z	J_z	λ	Jony	Aerozol		1890	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010
Cape Thordsen	X					SE	X												
Virgin Bay	X					DE		X											
Ebeltofthafen	X					DE		X											
Karasjok	X					UK		X											
Vassijaure	X					SE			X										
Tromso	X					NO					X								
College (Fairbanks)	X					US					X				X				
Fort Rae	X	X		X	X	UK					X								
Scoresby Sund	X					FR					X								
Tikhaya Bay	X					RU					X								
Hayes Island	X					RU					X								
Cheluskin	X					RU					X								
Yakutsk	X					RU					X	X							
Murchison Bay	X	X		X		CH							X						
Murmansk	X					RU							X	X	X				
Thule	X	X	X			US								X					

Nazwa stacji lub nazwa geograficzna	Mierzone wielkości i własności fizyczne					Kraj organizujący wyprawę lub będący właścicielem stacji	Dekady, w których odbywały się pomiary elektryczności atmosfery												
	E_z	J_z	λ	Jony	Aerozol		1890	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010
Amderma	X					RU									X				
Mezen	X					RU									X				
Lovozero	X					RU									X	X			
Naryan-Mar	X					RU									X	X			
Tiksi	X					RU										X			
Zhigansk	X					RU										X			
Verhnetulomskiy	X					RU										X			
Umba	X					RU										X			
Loparskaya	X					RU										X			
Apatity	X	X				RU										X			X
Barentsburg	X					RU										X			
Hornsund	X	X		X	X	PL										X	X	X	X
Esrange	X	X				SE											X	X	

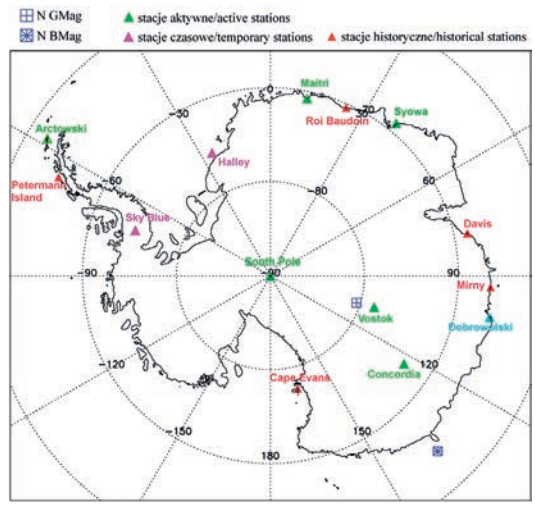
Tabela 2. Stacje i miejsca naziemnych pomiarów elektryczności atmosfery w Antarktyce; w kolumnach: nazwa stacji (1 kolumna), mierzone wielkości i własności fizyczne – nie zawsze jednocześnie (5 kolumn); kraj wyprawy lub stacji (1 kolumna); obecność obserwacji elektryczności atmosfery w danej dekadzie rozpoczynając od 1890 do 2010 roku (13 kolumn)

Table 2. Stations and sites of ground-based atmospheric electric measurements in Antarctic; columns: station name (1 column), measured parameters and physical properties – not always simultaneously (5 columns), country of expedition or station (1 column), presence of measurements in a decade starting from 1890 to 2010 (13 columns)

Nazwa stacji lub nazwa geograficzna	Mierzone wielkości i własności fizyczne					Kraj organizujący wyprawę lub będący właścicielem stacji	Dekady, w których odbywały się pomiary elektryczności atmosfery												
	E_z	J_z	l	Jony	Aerozol		1890	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010
Petermann Island	X					FR		X											
Cape Evans	X					UK			X										
Base Roi Baduoin	X			X		BE							X	X					
Mirny	X					NO							X	X					
South Pole	X	X				US								X	X	X	X	X	X
Vostok	X					RU									X	X	X	X	X
Davis	X					AU										X	X		
Syowa	X					JP									X			X	X
Maitri	X	X	X	X		IN												X	X
Concordia-DomeC	X					FR-IT/US												X	X
Sky Blu	X	X				UK													X
Arctowski	X				X	PL													X
Halley	X					UK													X

do pomiaru pola elektrycznego oraz gęstości prądu, z dodatkowymi pomiarami meteorologicznymi, opracowano w British Antarctic Survey na bazie doświadczeń australijskich i amerykańskich (Junyent i in. 2006) i wykonano serie pomiarowe na stacji Sky Blu oraz dwóch odległych punktach na antarktycznym płaskowyżu od strony Morza Weddella (M. Jarvis, British Antarctic Survey, informacja własna; miejsc nie zaznaczono na mapie rys. 6). W grudniu 2012 roku rozpoczęto ciągłe pomiary pola elektrycznego w Polskiej Stacji Antarktycznej im. Henryka Arctowskiego (Kubicki i in. 2016b).

Rozmieszczenie lokalizacji naziemnych obserwacji elektryczności atmosfery w Antarktyce przedstawiono na rysunku 6, a listę stacji w tabeli 2.



Rys. 6. Stacje antarktyczne elektryczności atmosfery; na mapie zaznaczono również bieżące położenie południowego bieguna magnetycznego (BMag S) oraz rzut osi dipola geomagnetycznego (GMag S)*; trójkątem w kolorze cyjanowym zaznaczono położenie Stacji Antarktycznej im. A.B. Dobrowolskiego (spis stacji znajduje się w tabeli 2)

Fig. 6. Antarctic atmospheric electricity stations; the current location of the southern magnetic pole (BMag S) and the projection of the geomagnetic dipole axis (GMag S) is also marked; the location of the A.B. Dobrowolski Antarctic Station is marked with a cyan triangle (the list of stations is in table 2)

Krzywa Maud

Waszyngtoński Instytut im. Carnegiego, wzorem rejsu „Carnegie", wyposażył naukowo, m.in. w przyrządy do pomiaru elektryczności atmosfery, ekspedycję Roalda Amundsena po Oceanie Arktycznym na pokładzie żaglowca „Maud" (1918-1925). Zebrane wyniki zostały opublikowane np. w pracy Sverdrup (1927). Trasa wyprawy przebiegała przez pak lodowy oraz zatoki wzdłuż

północnych wybrzeży Rosji. Z obserwacji pola elektrycznego z pokładu „Maud" pochodzi, analogiczna do krzywej Carnegie, dobowa krzywa zmian pola E_z (Whipple, Scrase 1936) przedstawiona na rysunku 2 (kolor różowy). Różnice w przebiegu obu linii można tłumaczyć wpływem generatora magnetosferycznego, który to wpływ mógł być w owym czasie nie do końca dobrze rozpoznany (D'Angelo i in. 1982).

Na przełomie lat 70. i 90. pomiary elektryczności atmosfery na Morzu Arktycznym wykonywała również radziecka dryfująca stacja morska Biegun Północny-22, SP-22 (Guglielmi i in. 1979).

Problematyka krajowych badań nad elektrycznością atmosfery i GOE strefy polarnej

Krajowe badania w dziedzinie elektryczności atmosfery w rejonach polarnych wiążą się z działalnością stacji polarnych Polskiej Akademii Nauk (PAN), tj. Polskiej Stacji Polarnej PAN im. Stanisława Siedleckiego w fiordzie Hornsund na Spitsbergenie (archipelag Svalbard, Norwegia), którą prowadzi Instytut Geofizyki PAN, oraz Polskiej Stacji Antarktycznej im. Henryka Arctowskiego na Wyspie Króla Jerzego (archipelag Szetlandów Południowych), prowadzonej przez Instytut Biochemii i Biofizyki PAN. Pomiary elektryczności atmosferycznej w Hornsundzie i na stacji Arctowskiego wraz ze stacją elektryczności atmosfery w Obserwatorium Geofizycznym Instytutu Geofizyki PAN w Świdrze tworzą krajową sieć obserwacji elektryczności atmosfery (Kubicki i in. 2016b). Pomiary te organizuje i prowadzi Obserwatorium IGF PAN w Świdrze. Pomiary elektryczności atmosferycznej w Hornsundzie, a ostatnio na stacji im. H. Arctowskiego, przeprowadzało pod okiem specjalistów z IGF wielu uczestników wypraw naukowych. W roku 2011, przy wsparciu Narodowego Centrum Nauki, w IGF PAN rozpoczęto budowę nowoczesnych stacji pomiarowych elektryczności atmosfery, przeznaczonych m.in. na stacje polarne i do przeprowadzenia analizy jednoczesnych pomiarów pola elektrycznego i stężenia aerozolu w trzech wspomnianych krajowych stacjach pomiarowych (Kubicki i in. 2016a). Rozpoczęcie w 2012 roku nowych pomiarów elektryczności na Stacji im. H. Arctowskiego było możliwe dzięki współpracy z Instytutem Biochemii i Biofizyki PAN oraz dofinansowaniu z Narodowego Centrum Nauki w latach 2011-2013 (nr umowy 2011/01/B/ST10/07118). Obecnie infrastruktura pomiarowa elektryczności atmosfery jest wspierana finansowano w projekcie PolarPOL – Polskie Multidyscyplinarne Laboratorium Badań Polarnych, a w bliskiej przyszłości CLIMEV (Głowacki 2018).

W Instytucie Geofizyki PAN, poza prowadzonymi pomiarami, badania elektryczności atmosfery i GOE strefy polarnej są od wielu lat realizowane w Zakładzie Fizyki Atmosfery. Obserwacje w Hornsundzie od początku były nakierowane na badanie wpływu wiatru słonecznego poprzez oddziaływa-

nie z ziemską magnetosferą na pola i prądy elektryczne przy powierzchni Ziemi, z wykorzystaniem dodatkowych pomiarów geomagnetycznych i jonosferycznych, zarówno krajowych, jak i zagranicznych i międzynarodowych (Michnowski 1996a-b). Oprócz pionowej składowej pola elektrycznego (Michnowski 1996c; Berlinski i in. 2007) prowadzono też pomiary gęstości prądu elektrycznego (Łosakiewicz, Drzewiecki 1991). Przez wiele lat badania realizowano przy bilateralnej współpracy Polskiej i Rosyjskiej Akademii Nauk. W ciągu trzech dekad przeanalizowano we współpracy z Instytutem Fizyki Ziemi RAN w Moskwie dziesiątki przypadków zachowania pola elektrycznego atmosfery w czasie podwyższonej aktywności wiatru słonecznego oraz subburz i burz magnetycznych. Zidentyfikowano charakterystyczne zaburzenia pola elektrycznego w czasie porannych i wieczornych subburz magnetycznych, zaburzenia pola w czasie dziennej aktywności zorzowej oraz wskutek działania układu prądów tzw. NBZ (Michnowski i in. 1991, 1996, 2003; Michnowski, Nikiforova 1996; Kleimenova i in. 1998, 2010, 2011, 2012, 2017; Nikiforova i in. 2003; Kozyreva i in. 2007) oraz zaburzenia pola elektrycznego w Świdrze w czasie burzy magnetycznej (Nikiforova i in. 2005; Kleimenova i in. 2008; Michnowski i in. 2014). Badano ponadto pulsacje geomagnetyczne (Kleimenova i in. 1998), wpływ wysypu cząstek wysokoenergetycznych na pole elektryczne (Nikiforova i in. 2003) oraz widoczność sygnału GOE w pomiarach z krajowych stacji (Kubicki i in. 2014). Przeprowadzono również analizę wpływu konwekcji jonosferycznej na pola elektryczne w Hornsundzie w czasie dni spokojnych magnetycznie, z wykorzystaniem techniki badania konwekcji jonosferycznej siecią radarów niekoherentnych SuperDARN (ang. *Super Dual Auroral Radar Network*), we współpracy z Uniwersytetem w Leicester w Wielkiej Brytanii (Odzimek i in. 2011).

Badania elektryczności atmosfery na stacji w Hornsundzie było możliwe również dzięki obserwacjom absorpcji jonosferycznej za pomocą riometru Centrum Badań Kosmicznych PAN (Kłos i in. 2007) oraz pomiarom sieci magnetometrów INTERMAGNET i IMAGE, zasilanych danymi geomagnetycznymi z obserwacji prowadzonych (m. in. w Hornsundzie) przez Zespół Obserwacji Geomagnetycznych w Obserwatorium IGF PAN w Belsku (Reda, Neska 2016)[2]. Zespół ten realizuje od 2004 roku, również w Hornsundzie, pomiary zmiennego pola magnetycznego w zakresie ekstremalnie niskich częstości ELF (Neska, Sátori 2006), w tym zjawisko rezonansu Schumanna, umożliwiające m.in. badanie występowania wyładowań na globie wiążącego się z lokalizacją burz.

Pomiary radioaktywności powietrza na Hornsundzie, prowadzone we współpracy Obserwatorium w Świdrze z Instytutem Problemów Jądrowych (obecnie Narodowe Centrum Badań Jądrowych), umożliwiały analizowanie

[2] Pomiary geomagnetyczne prowadzono wcześniej również w Stacji im. Arctowskiego przez około dwie dekady od 1978 roku (Szymański 1980; Kubicki i in. 2016b).

wpływu promieniotwórczości na parametry elektryczne, np. po awarii elektrowni atomowej w Fukushimie (Mysłek-Laurikainen i in. 2006, 2014).

Do bieżących tematów krajowych badań w zakresie elektryczności atmosfery, w tym elektryczności chmur, należy analiza pola elektrycznego w czasie występowania chmur Nimbostratus oraz Stratus, która w dłuższej perspektywie ma na celu uzyskanie parametryzacji elektryczności tego rodzaju chmur na średnich i dużych szerokościach geograficznych dla modeli GOE (Odzimek i in. 2014, 2018). W ramach projektu dofinansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w latach 2011-2013 (Nr umowy 2011/01/B/ST10/07188) rozpoczęto budowę bazy danych chmur Nimbostratus i Stratus na podstawie obserwacji meteorologicznych w Hornsundzie i badania elektryczności tych rodzajów chmur.

Stworzone w poprzednich dekadach oraz pojawiające się nowe możliwości w prowadzeniu obserwacji elektryczności atmosfery mogą zaowocować rozszerzoną współpracą krajową i międzynarodową oraz wynikami naukowymi na polu badań interdyscyplinarnych.

Kierunki badań

Po okresie specjalizacji coraz wyraźniejsza staje się potrzeba powrotu do koncepcji współpracy różnych dziedzin nauki w ramach jednego nurtu – fizyki kosmicznej, jak nazwano ją na przełomie XIX/XX wieku – by zsyntetyzować i wykorzystać dokonania uzyskane w poszczególnych obszarach. Szczególnie widoczne jest to w badaniach rejonów polarnych. Elektryczność atmosfery jest sama w sobie dziedziną interdyscyplinarną, dotykającą zagadnień meteorologii, fizyki atmosfery, jonosfery, magnetosfery, geomagnetyzmu, fizyki jądrowej, fizyki wyładowań w gazie i innych. Współpraca naukowa tych różnych środowisk powinna dać obopólne korzyści (np. Michnowski 1975).

Jednym z interdysplinarnych problemów dotyczących obszarów polarnych jest zagadnienie generatora magnetosferycznego w GOE i jego efektów związanych bezpośrednio z pogodą, ciśnieniem atmosferycznym, wpływem na mikrofizykę chmur (Tinsley 1996, 2000; Troshichev i in. 2003; Burns i in. 2007). Ponadto, wspomniane badania efektów subburz i burz magnetycznych oraz innych zjawisk pogody kosmicznej, badania fizyki atmosfery dotyczące aerozoli i ich wpływu na rezystancję atmosfery, fizyka chmur w rejonach polarnych, w szczególności chmur, które mogą być generatorami GOE, w tym zjawiska burz zwyczajnych oraz burz śnieżnych, opady atmosferyczne, pozostają aktualnymi tematami badawczymi w elektryczności atmosferycznej.

Krajowe badania i współpraca w powyżej wymienionych dziedzinach z pewnością rozwinęłyby się dzięki rozszerzeniu obserwacji elektryczności atmosfery na inne stacje. W tym względzie postęp jest możliwy zarówno w badaniach antarktycznych, jak i arktycznych. Obecnie funkcjonuje kilka

krajowych stacji naukowych na Spitsbergenie; w obwodzie pozostaje również Stacja Antarktyczna PAN im. A.B. Dobrowolskiego w Oazie Bungera (Gregorczuk 1980), która po odpowiednim zagospodarowaniu do badań geofizycznych zwiększyłaby znacznie potencjał badawczy w analizach generatora magnetosferycznego GOE z powodu odległości do bieguna geomagnetycznego, i to mimo narażenia na niewysoki stopień warunków *pp*.

Krajowe stacje pomiarowe i obserwacje w rejonach polarnych oraz prowadzone tam od lat projekty (Szymański 1976; Petelski 2002; Łupikasza 2003; Mysłek-Laurikainen i in. 2006; Neska, Satori 2006; Karasiński 2012; Górski 2014; Gluza, Siwek 2015; Marsz, Styszyńska 2015; Migała i in. 2015; Niedźwiedź 2015; Przybylak i in. 2015; Rachlewicz, Zwoliński 2015; Ustrnul 2015; Sobota i in. 2017) dają możliwości rozwoju studiów elektryczności atmosfery w kierunku badań interdyscyplinarnych w skali regionalnej. Mogą one dotyczyć wyodrębnienia wpływów lokalnych, takich jak warunki pogodowe, odległość od morza i lodowców, własności powietrza i podłoża. Bezpośrednio z problematyką GOE związane są badania własności i roli generatora chmurowego oraz generatora magnetosferycznego, który może być monitorowany i badany w skali regionalnej – np. badania efektów związanych z wpływem spokojnej i zaburzonej konwekcji jonosferycznej, przejściami owalu zorzowego związanymi z cyklem subburz magnetycznych, a także kontynuacja badań efektów zmian stężenia i rodzaju aerozolu oraz radioaktywności wraz z wpływem parametrów pogodowych. Niezbędne są przy tym równoległe pomiary meteorologiczne, ze względu na konieczność monitorowania spełnienia kryteriów pogodowych, obserwacji chmur itp. Może w tym być pomocny rozwój infrastruktury badawczej i cyfrowej dla potrzeb badań naukowych w Arktyce, który ma miejsce w ostatnich latach (np. Sikora i in. 2012) przy wsparciu środków krajowych i europejskich (Głowacki 2018). Unowocześnienie procesu badań będzie z pewnością niezwykle pomocne, ponieważ prowadzenie obserwacji w strefie polarnej niezmiennie pozostaje dużym wyzwaniem.

Zakończenie

W niniejszej pracy przedstawiono jedno z głównych zagadnień badawczych z dziedziny elektryczności atmosfery, jakim jest Globalny Atmosferyczny Obwód Elektryczny Ziemi GOE, prezentując przekrój problematyki z nim związanej w kontekście obszarów polarnych. Opisano historię badań pomiarów elektryczności atmosfery w rejonach polarnych ze szczególnym uwzględnieniem badawczych przedsięwzięć krajowych. Autor wyraża wdzięczność Profesorowi Danielowi R. Weimerowi z Virginia Polytechnic Institute and State University (USA) za udostępnienie modelu potencjału elektrycznego konwekcji jonosferycznej, co umożliwiło przygotowanie prezentowanych map potencjału. Użyte dane z modelu EGATEC pochodzą z opracowania autora.

Niniejsza praca jest bardziej szczegółowym opracowaniem tematu przedstawionego na konferencji *The Batsheva de Rothschild Seminar on The Atmospheric Global Electric Circuit* (GEC) w dniach 5-10 lutego 2017 roku w Mitzpe Ramon (Izrael) oraz na XXVIII Seminarium Meteorologii i Klimatologii Polarnej, 11-12 maja 2018 roku w Sosnowcu, na Wydziale Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego. Praca jest finansowana ze środków statutowych Instytutu Geofizyki PAN, grant MNiSW 3841/E-41/S/2018.

L i t e r a t u r a

Akhmetov O.I., Beloglazov M.I., Fedorenko Y.V., 2010, On heterogeneous structure of atmospheric current in various meteorological conditions according to the Kola Peninsula observation data, Russian Meteorology and Hydrology, 35 (5), 327-332, DOI: 10.3103/S1068373910050043

Anderson R.V., 1966, Measurements of total current density above active snowstorms, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 28 (8), 789-793, DOI: 10.1016/0021-9169(66)90026-2

Andrée S.A., 1887, Observations faites au Cap Thordsen, Spitzberg, par l'expedition suédoise publiées par L'Académie Royale des Sciences de Suéde. Tome II: 2. Électricité Atmosphérique, Exploration internationale des régions polaires 1882-1883, Kongl. Boktryckeriet, P.A. Norstedt & Söner, Sztokholm, 53 s.

Ansel A., 1912, Die luftelektrischen und meteorologischen Ergebnisse der Beobachtungen in Island vom 10. Mai bis 2. Juni 1910 anlaylich des Durchganges des Halleyschen Kometenm, [w:] Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Mathematisch-physikalische Klasse, Weidmannsche Buchhandlung, Berlin, 76-111

Apsen A.G., Kanonidi K.D., Chernysheva S.P., Chetaev D.N., Scheftel V.M., 1988, Magnetosfernye effekty v atmosfernom elektrichestve, (Magnetospheric effects in atmospheric electricity), Publications of the Academy of Sciences USSR, IZMIRAN, Nauka, Moskwa, 149 s.

Arctowski H., 1901, Aurores australes, [w:] Résultats du voyage du S.Y. Belgica en 1897-1898-1899: sous le commandement de A. de Gerlache de Gomery. Rapports scientifiques publiés aux frais du gouvernement belge, sous la direction de la Commission de la Belgica, 76 s.

Bandilet O.I., Kanonidi Kh.D., Chernysheva S.P., Sheftel V.M., 1986, Efekty magnitosfernych subbur' v atmosfernom elektriczeskom pole, Geomagnetizm i Aeronomiya, 26 (1), 159-160

Barlindhaug E., 1935, Results of registrations of the atmospheric electric potential gradient at the Auroral Observatory, Tromso, during the period March 1932 – July 1933, Geofysiske Publikasjoner, 10 (12), 3-12

Belova E., Kirkwood S., 2001, Atmospheric electricity investigations at IRF, Kiruna, Sweden, Abstracts of the 24th Annual Seminar Physics of Auroral Phenomena, 27 luty – 2 marzec 2001, Apatity, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences

Bering III E.A., Benbrook J.R., Byrne G.J., Few A.A., 1991, Measurements of vertical atmospheric electric current at a network of sites in Antarctica including manned stations and automatic geophysical observations, [w:] Proceedings of the International Workshop on Global Atmospheric Electricity Measurements, S. Michnowski, L.H. Ruhnke (red.), Publications of the Institute of Geophysics. Polish Academy of Sciences: Physics of the Atmosphere Series, D-35 (238), 119-135

Bering III E.A., Few A.A., Benbrook J.R., 1998, The Global Electric Circuit, Physics Today, 51 (10), 24-28, DOI: 10.1063/1.882422

Berlinski J., Pankanin G., Kubicki M., 2007, Large scale monitoring of troposphere electric field, [w:] Proceedings of the 13th International Conference on Atmospheric Electricity, tom 1, 13-17 sierpnia 2007, Pekin, Chiny, ICAE/IAMAS/IUGG, 124-126

Bragin A.O., Bragin, Yu A., Kocheev A.A., 1980, Direct measurements of atmospheric electroconductivity to heights of 80 km at the Antarctic station Molodezhnaya, Kosmicheskie Issledovaniia, 18

Brooks C.E.P., 1925, The distribution of thunderstorms over the globe, Geophysical Memoirs, 24, 147-164

Buis P.M., 1968, Expedition Antarctique Belgo-Néerlandaise 1964. Atmospheric electricity, Exantar, 40 s.

Burke H.K., Few A.A., 1978, Direct measurements of the atmospheric conduction current, Journal of Geophysical Research: Oceans, 83 (C6), 3093-3098, DOI: 10.1029/JC083iC06p03093

Burns G.B., Frank-Kamenetsky A.V., Tinsley B.A., French W.J.R., Grigioni P., Camporeale G., Bering E.A., 2017, Atmospheric global circuit variations from Vostok and Concordia electric field measurements, Journal of the Atmospheric Sciences, 74 (3), 783-800, DOI: 10.1175/JAS-D-16-0159.1

Burns G.B., Frank-Kamenetsky A.V., Troshichev O.A., Bering E.A., Reddell B.D., 2005, Interannual consistency of bi-monthly differences in diurnal variations of the ground-level, vertical electric field, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 110 (D10), DOI: 10.1029/2004JD005469

Burns G.B., Hesse M.H., Parcell S.K., Malachowski S., Cole K.D., 1995, The geoelectric field at Davis station, Antarctica, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 57 (14), 1783-1797, DOI: 10.1016/0021-9169(95)00098-M

Burns G.B., Tinsley B.A., Frank-Kamenetsky A.V., Bering E.A., 2007, Interplanetary magnetic field and atmospheric electric circuit influences on ground-level pressure at Vostok, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 112 (D4), DOI: 10.1029/2006JD007246

Burns G.B., Tinsley B.A., Frank-Kamenetsky A.V., Troshichev O.A., French W.J.R., Klekociuk A.R., 2012, Monthly diurnal global atmospheric circuit estimates derived from Vostok electric field measurements adjusted for local meteorological and solar wind

influences, Journal of the Atmospheric Sciences, 69 (6), 2061-2082, DOI: 10.1175/JAS-D-11-0212.1

Byrne G.J., Benbrook J.R., Bering E.A., Few A.A., Morris G.A., Trabucco W.J., Paschal E.W., 1993, Ground-based instrumentation for measurements of atmospheric conduction current and electric field at the South Pole, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 98 (D2), 2611-2618, DOI: 10.1029/92JD02303

Chalmers J.A., 1976, Atmospheric electricity, Pergamon Press, Nowy Jork, 526 s.

Christian H.J., Blakeslee R.J., Boccippio D.J., Boeck W.L., Buechler D.E., Driscoll K.T., Goodman S.J., Hall J.M., Koshak W.J., Mach D.M., Steward D.F., 2003, Global frequency distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 108 (D1), 4005, DOI: 10.1029/2002JD002347

Clark J.F., 1957, Airborne measurement of atmospheric potential gradient, Journal of Geophysical Research, 62 (4), 617-628, DOI: 10.1029/JZ062i004p00617

Cobb W.E., 1976, Atmospheric electric measurements at the South Pole, [w:] Electrical processes in atmospheres, H. Dolezalek, R. Reiter, H. Lansberg (red.), Steinkopff, Heidelberg, 161-167, DOI: 10.1007/978-3-642-85294-7_23

Corney R.C., Burns G.B., Michael K., Frank-Kamenetsky A.V., Troshichev O.A., Bering E.A., Papitashvili V.O., Breed A.M., Duldig M.L., 2003, The influence of polar-cap convection on the geoelectric field at Vostok, Antarctica, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 65 (3), 345-354, DOI: 10.1016/S1364-6826(02)00225-0

D'Angelo N., Iversen I.B., Madsen M.M., 1982, Influence of the dawn-dusk potential drop across the polar cap on the high-latitude atmospheric vertical current, Geophysical Research Letters, 9 (7), 773-776, DOI: 10.1029/GL009i007p00773

Dalrymple P.C., 1966, A physical climatology of the Antarctic Plateau, Studies in Antarctic Meteorology, 9, 195-231, DOI: 10.1029/AR009p0195

Dauvillier A., 1938, Anne Polaire Internationale, 1932-1933: Electricité atmosphérique, courants telluriques, actinométrie, radio électricité, historique des missions, tom 2, Commission nationale française de l'Année polaire, Gauthier-Villars, Paryż

Deshpande C.G., Kamra A.K., 2001, Diurnal variations of the atmospheric electric field and conductivity at Maitri, Antarctica, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 106 (D13), 14207-14218, DOI: 10.1029/2000JD900675

Dolezalek H., 1991, Discussion of an atmospheric electricity Ten-Year Program, [w:] Proceedings of the International Workshop on Global Atmospheric Electricity Measurements, S. Michnowski, L.H. Ruhnke (red.), Publications of the Institute of Geophysics. Polish Academy of Sciences: Physics of the Atmosphere Series, D-35 (238), 17-20

Dungey J.W., 1961, Interplanetary magnetic field and the auroral zones, Physical Review Letters, 6 (2), 47-48, DOI: 10.1103/PhysRevLett.6.47

Elster J., 1902, Messungen des electrischen Potentialgefälles auf Spitzbergen und Juist, Journal of Geophysical Research, 7 (1), 9-15, DOI: 10.1029/TE007i001p00009

Frank-Kamenetsky A.V., 1983, Nekotorie charakteristiki variacji vertikalnoj komponenty atmosfernogo elektriczeskogo pola po dannym st. Vostok, [w:] Atmosfernoe electrichestvo i magnitosfernye vozmuscheniya, Kh.D. Kanonidi, V.G. Kobzev, A.I. Laptukhov, L.V. Petrova, I.G. Simakov, V.M. Sheftel (red.), USSR Academy of Sciences, IZMIRAN, Moskwa, 91-98

Frank-Kamenetsky A.V., Burns G.B., Troshichev O.A., Papitashvili V.O., Bering E.A., French W.J.R., 1999, The geoelectric field at Vostok, Antarctica: its relation to the interplanetary magnetic field and the cross polar cap potential difference, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 61 (18), 1347-1356, DOI: 10.1016/S1364-6826(99)00089-9

Frank-Kamenetsky A.V., Kalita V.M., 1986, Sviaz' variacji atmosfernogo elektriczeskogo pola v polarnoj szapke s parametrami MPP, [w:] Geofizicheskie issledowania v visokich szirotach, A.V. Frank-Kamenetsky (red.), Gidrometeoizdat, Leningrad, Trudy AANNI, 405, 48-56

Frank-Kamenetsky A.V., Kotikov A.L., Kruglov A.A., Burns G.B., Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Kubitski M., Odzimek A., 2012, Variations in the near-surface atmospheric electric field at high latitudes and ionospheric potential during geomagnetic perturbations, Geomagnetism and Aeronomy, 52 (5), 629-638, DOI: 10.1134/S0016793212050064

Frank-Kamenetsky A.V., Troshichev O.A., Burns G.B., Papitashvili V.O., 2001, Variations of the atmospheric electric field in the near-pole region related to interplanetary magnetic field, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 106 (A1), 179-190, DOI: 10.1029/2000JA900058

Gish O.H., Parkinson W.C., Torreson O.W., Wait G.R., 1946, Ocean Atmospheric-Electric Results, Scientific Results of Cruise VII of the Carnegie During 1928-29, Oceanography III, CIW publication 568, Carnegie Institution of Washington, Washington D.C., 350 s.

Gish O.H., Sherman K.L., 1940, Analysis of local atmospheric phenomena at College, Alaska, Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity, 45 (2), 173-190, DOI: 10.1029/TE045i002p00173

Gluza A., Siwek A., 2015, Badania meteorologiczne na obszarze NW części Ziemi Wedela Jarlsberga (1986-2011), Problemy Klimatologii Polarnej, 25, 59-66

Głowacki P., 2018, CLIMEV – nowe narzędzie badawcze dla badań atmosfery w rejonach polarnych, XXVIII Seminarium Meteorologii i Klimatologii Polarnej, 11-12 maja 2018, Sosnowiec

Gordiuk V.P., 1984, Electrical characteristics of the atmosphere at Mirny station from the measurements of 26th SAE, [w:] Proceedings of the 2nd Union Symposium on Atmospheric Electricity, Gidrometeoizdat, Leningrad, 59-62

Górski M., 2014, Department of Polar and Marine Research: The Hornsund station and other activities in the Arctic and Antarctic regions, [w:] Achievements, history and challenges in geophysics, R. Bialik, M. Majdański, M. Moskalik (red.), Springer, 159-172

Gregorczuk M., 1980, Climate of Bunger Oasis (region of A.B. Dobrowolski Station, Antarctic), Polish Polar Research, 1 (4), 205-230

Guglielmi A.V., Klain B.I., Rusakov N.N., 1979, Geoelektriczeskoe pole po nabliudeniam na drejfujusciej stancji SP-22, Geophysical Collection of AN UkSSR, 88, 60-64

Heathcote A., Armitage N.H. de V., 1959, The Swedish expedition to Cape Thordsen (Spitsbergen), [w:] The histories of the international polar years and the inception and development of the International Geophysical Year, Annals of The International Geophysical Year, tom 1, Pergamon Press, 86-89

Hess M., Koepke P., Schult I., 1998, Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC, Bulletin of the American Meteorological Society, 79 (5), 831-844, DOI: 10.1175/1520-0477(1998)079<0831:OPOAAC>2.0.CO;2

Hoffmann K., 1924, Bericht uber die in Ebeltolthafen auf Spitsbergen in der Jahren 1913/14 durchgefurten luftelektrischen Messungen (11°36'15''E, 79°09'14''N), Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre, 11, 1-19

Imyanitov I.M., Chubarina Y.V., 1965, Elektrichestvo svobodnoy atmosfery, Gidrometeoizdat, Leningrad, 240 s.

Israël H., 1953, Luftelektrische Erfahrungen in den Polargebieten, Polarforschung, 23 (1-2), 210-215, DOI: 10.2312/polarforschung.23.1-2.210

Israël H., 1966, Significance and problems of atmospheric electric measurements at the ground in polar and oceanic regions, Polarforschung, 36 (1-2), 86-88, DOI: 10.2312/polarforschung.36.1-2.86

Israël H., 1971, Atmospheric electricity. Tom I: Fundamentals, conductivity, ions, Israel Program for Scientifc Translations, Jerozolima, 318 s.

Israël H., 1973, Atmospheric electricity. Tom II: Fields, charges, currents, Israel Program for Scientific Translations, Jerozolima, 479 s.

Junyent J., Maxfield D.J., Rose M.C., Jarvis M.J., Jansen P., Burns G., Bering E.A., 2006, Measuring the geo-electric field in the Antarctic, EGU General Assembly Conference Abstracts, Geophysical Research Abstracts, 8, EGU06-J-06073

Karasiński G., 2012, Detekcja pyłów wulkanicznych przez lidar w Polskiej Stacji Polarnej w Hornsundzie, Problemy Klimatologii Polarnej, 22, 83-94

Kasemir H.W., 1972, Atmospheric electric measurements in the Arctic and Antarctic, Pure and Applied Geophysics, 100 (1), 70-80, DOI: 10.1007/BF00880228

Kikuchi K., 1970, Observations of the atmospheric electric field at Syowa station, Antarctica, Journal of the Meteorological Society of Japan, 48 (5), 452-460, DOI: 10.2151/jmsj1965.48.5_452

Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Kubicki M., Michnowski S., 2010, Morning polar substorms and variations in the atmospheric electric field, Geomagnetism and Aeronomy, 50 (1), 48-57, DOI: 10.1134/S0016793210010068

Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Kubicki M., Michnowski S., 2011, Variations in the near--ground electric field at high latitudes and the potential drop across the polar cap during morning polar substorms, Geomagnetism and Aeronomy, 51 (3), 394-401, DOI: 10.1134/S0016793211030091

Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Kubicki M., Odzimek A., Malysheva L.M., 2012, Effect of substorms in the Earth's nightside sector on variations in the surface atmospheric

electric field at polar and equatorial latitudes, Geomagnetism and Aeronomy, 52 (4), 467-473, DOI: 10.1134/S001679321204007X

Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Michnowski S., Kubicki M., 2008, Effect of magnetic storms in variations in the atmospheric electric field at midlatitudes, Geomagnetism and Aeronomy, 48 (5), 622-630, DOI: 10.1134/S0016793208050071

Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Michnowski S., Kubicki M., 2013, Influence of geomagnetic disturbances on atmospheric electric field (Ez) variations at high and middle latitudes, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 99, 117-122, DOI: 10.1016/j.jastp.2012.07.009

Kleimenova N.G., Kubicki M., Odzimek A., Malysheva L.M., Gromova L.I., 2017, Effects of geomagnetic disturbances in daytime variations of the atmospheric electric field in polar regions, Geomagnetism and Aeronomy, 57 (3), 266-273, DOI: 10.1134/S0016793217030070

Kleimenova N.G., Michnowski S., Nikiforova N.N., Kozyreva O.V., 1998, Variations of the vertical component of the atmospheric electric field in the evening sector of polar latitudes (Observatory Hornsund), Geomagnetism and Aeronomy 38 (6), 794-799

Kłos Z., Stanisławska I., Michnowski S., 2009, Globalny elektryczny obwód atmosfery i pogoda kosmiczna, [w:] Polskie Towarzystwo Geofizyczne 1947-2007, E. Bogdanowicz, U. Kossowska-Cezak, J. Szkutnicki (red.), IMGW, Warszawa, 50-58

Kozyreva O.V., Nikiforova N.N., Kleimenova N.G., Michnowski S., Kubicki M., 2007, Electric air-Earth vertical current pulsations at Hornsund during polar substorms: case study, [w:] Proceedings of the 13th International Conference on Atmospheric Electricity, 13-17 sierpnia 2007, Pekin, Chiny, ICAE/IAMAS/IUGG, 29-33

Kragh H., 2013a, Nordic cosmogonies: Birkeland, Arrhenius and fin-de-siècle cosmical physics, The European Physical Journal H, 38 (4), 549-572, DOI: 10.1140/epjh/e2013-40014-0

Kragh H., 2013b, The rise and fall of cosmical physics: notes for a history, ca. 1850-1920, History and Philosophy of Physics, Cornell University, dostępne online: arXiv:1304.3890 (01.04.2019)

Kubicki M., Odzimek A., Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Neska M., 2014, Synchronization of main global electric circuit generators from ground-level electric field Ez at three distant locations on the globe at middle and high latitudes, [w:] Proceedings of the 15th International Conference on Atmospheric Electricity, A. Mansell, D. MacGorman (red.), ICAE 2014 Organizing Committee, 9 s.

Kubicki M., Odzimek A., Neska M., 2016a, Relationship of ground-level aerosol concentration and atmospheric electric field at three observation sites in the Arctic, Antarctic and Europe, Atmospheric Research, 178-179, 329-346, DOI: 10.1016/j.atmosres.2016.03.029

Kubicki M., Odzimek A., Neska M., Berliński J., Michnowski S., 2016b, First measurements of the Earth's electric field at Arctowski antarctic station, King George Island, by the new Polish atmospheric electricity observation network, Acta Geophysica, 64 (6), 2630-2649, DOI: 10.1515/acgeo-2016-0096

Kumar Anil C.P., Panneerselvam C., Nair K.U., Jeeva K., Selvaraj C., Gurubaran S., Rajaram R., 2008, Influence of coronal mass ejections on global electric circuit, Indian Journal of Radio and Space Physics, 37 (1), 39-45

Lessard M.R., Gerrard A.J., Weatherwax A.T. (red.), 2014, Solar-terrestrial research in polar regions: past, present, and future, University of New Hampshire, USA, 64 s.

Lobodin T.V., Paramonov N.A., 1972, Variation of atmospheric electric field during aurorae, Pure and Applied Geophysics, 100 (1), 167-173, DOI: 10.1007/BF00880237

Lugeon J., Centkiewicz C., Łysakowski W., 1936, Wyniki spostrzeżeń polskiej wyprawy na Wyspę Niedźwiedzią Roku Polarnego 1932/33, z. 1. Meteorologia, z. 2. Magnetyzm ziemski, z. 3. Trzaski atmosferyczne, z. 4. Zorza polarna, Państwowy Instytut Meteorologiczny, Warszawa

Lugeon J., Junod A., Wasserfallen P., 1959, Measures de l'electricite atmospherique et de la radioactivite de l'air a Murchison Bay, Spitsberg (80°N), pendant l'Annee Geophysique Internationale 1957-1958, Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles, 159, 1, 122-126, dostępne online: https://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=sng-005:1959:139 (17.01.2019)

Łosakiewicz A., Drzewiecki J., 1991, On the measurement of the vertical air-Earth current at Spitsbergen and in Poland, [w:] Proceedings of the International Workshop on Global Atmospheric Electricity Measurements, S. Michnowski, L.H. Ruhnke (red.), Publications of the Institute of Geophysics. Polish Academy of Sciences: Physics of the Atmosphere Series, D-35 (238), 97-107

Łupikasza E., 2003, Zmienność występowania opadów deszczu i śniegu w Hornsundzie w okresie lipiec 1978 – grudzień 2002, Problemy Klimatologii Polarnej, 13, 93-105

MacGorman D., Rust W.D., 1998, The electrical nature of storms, Oxford University Press, Nowy Jork, 422 s.

Markson R., 2007, The global circuit intensity: its measurement and variation over the last 50 years, Bulletin of the American Meteorological Society, 88 (2), DOI: 10.1175/BAMS-88-2-223

Marsz A.A., Styszyńska A., 2015, Badania polarne Akademii Morskiej w Gdyni, Problemy Klimatologii Polarnej, 25, 75-98

Mauchly S.J., 1926, Studies in atmospheric electricity based on observations made on the Carnegie, 1915-1921, [w:] Ocean magnetic and electric observations, 1915-1921, J.P. Ault, S.J. Mauchly, W.J. Peters, L.A. Bauer, J.A. Fleming, Carnegie Institution of Washington Publication, 175 (5), 384-424

Michnowski S., 1968, Uwagi o strukturze elektrycznej chmur burzowych, Materiały i Prace Zakładu Geofizyki PAN, 25, 5-17

Michnowski S., 1975, Atmospheric electricity and its application to meteorology, Publications of the Institute of Geophysics. Polish Academy of Sciences: Physics of the Atmosphere Series, D-1, (99), 3-16

Michnowski S., 1998, Solar wind influences on atmospheric electricity variables in polar regions, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 103 (D12), 13939-13948, DOI: 10.1029/98JD01312

Michnowski S., 1996a, O zastosowaniach obserwacji atmosferycznych i geomagnetycznych w Hornsundzie w badaniach oddziaływania wiatru słonecznego na atmosferę ziemską, Przegląd Geofizyczny, 41 (1-2), 49-55

Michnowski S., 1996b, Potrzeby udziału polskiej stacji polarnej Hornsund w badaniach relacji Słońce-Ziemia na tle dotychczasowych prac i planów w tym zakresie, Przegląd Geofizyczny, 41 (1-2), 7-10

Michnowski S., 1996c, Remarks on observations of the solar wind influences on the electric field measured at the Earth's surface, [w:] Proceedings of the 10th International Conference on Atmospheric Electricity, 19-24 czerwca 1991, Osaka, Japonia, 516-519

Michnowski S., Kubicki M., Drzewiecki J., Israelsson S., Kleimenova N., Nikiforova N., 2003, Variations of atmospheric electricity elements in polar regions related to the solar wind changes, [w:] Proceedings of the 12th International Conference on Atmospheric Electricity, S. Chauzy, P. Laroche (red.), 9-13 lipca 2003, Versailles, Francja, 295-296

Michnowski S., Nikiforova N.N., 1996, Długookresowe fluktuacje pola geomagnetycznego i atmosferycznego pola elektrycznego podczas subburz i innych zaburzeń magnetycznych w Hornsundzie, Przegląd Geofizyczny, 41 (1-2), 57-65

Michnowski S., Nikiforova N.N., Kleimenova N.G., 1996, The response of the ground-level electric field at Hornsund to magnetospheric-ionospheric events, [w:] Proceedings of the 10th International Conference on Atmospheric Electricity, 19-24 czerwca 1991, Osaka, Japonia, 520-523

Michnowski S., Odzimek A., Kleimenova N., Kozyreva O., Kubicki M., Nikiforova N.N., 2014, Review of examples of solar wind-lower atmosphere coupling observed in the electric field (Ez) variations at the Earth's surface during magnetic storms, [w:] Proceedings of the 15th International Conference on Atmospheric Electricity, A. Mansell, D. McGorman (red.), 21-26 lipca 2014, Norman, USA

Michnowski S., Szymański A., Nikiforova N.N., Kozyreva O.V., Ermolenko D., Zielkowski K., 1991, On simultaneous observations of geomagnetic and atmospheric electric field changes in Arctic station Hornsund, Spitsbergen, [w:] Proceedings of the International Workshop on Global Atmospheric Electricity Measurements, S. Michnowski, L.H. Ruhnke (red.), Publications of the Institute of Geophysics. Polish Academy of Sciences: Physics of the Atmosphere Series, D-35 (238), 83-96

Migała K., Piasecki J., Pereyma J., 2015, Dorobek ośrodka wrocławskiego w meteorologii i klimatologii obszarów polarnych, Problemy Klimatologii Polarnej, 25, 9-18

Milan S.E., Clausen L.B.N., Coxon J.C., Carter J.A., Walach M.-T., Laundal K., Ostgaard N., Tenfjord P., Reistad J., Snekvik K., Korth H., Anderson B.J., 2017, Overview of solar wind-magnetosphere-ionosphere-atmosphere coupling and the generation of magnetospheric currents, Space Science Review, 206 (1-4), 547-573, DOI: 10.1007/s11214-017-0333-0

Minamoto Y., Kadokura A., 2011, Extracting fair-weather data from atmospheric electric-field observations at Syowa Station, Antarctica, Polar Science, 5 (3), 313-318, DOI: 10.1016/j.polar.2011.07.001

Muir M.S., Smart C.A., 1981, Diurnal variations in the atmospheric electric field on the South Polar ice-cap, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 43 (2), 171-177, DOI: 10.1016/0021-9169(81)90077-5

Mysłek-Laurikainen B., Matul M., Mikołajewski S., Trzaskowska H., Kubicki M., Baranski P., Odzimek A., Michnowski S., 2014, Detection of Fukushima origin Caesium isotopes at Polish Polar Station in Hornsund (Spitsbergen) and its effects to atmospheric electricity parameters, [w:] Proceedings of Abstracts of 9th International Conference on Air Quality, Science and Application, Garmisch-Partenkirchen, 24-28 marca 2014, s. 194

Mysłek-Laurikainen B., Matul M., Mikołajewski S., Trzaskowska H., Preibisz Z., Garanty I., Kubicki M., Rakowski P., Krynicki T., Stefanski M., 2006, Air aerosol sampling station AZA-1000 at Polish Polar Station in Hornsund, Spitsbergen, Nukleonika, 51 (2), 137-140

Neska M., Sátori G., 2006, Obserwacje rezonansu Schumanna w Polskiej Stacji Polarnej na Spitsbergenie oraz Obserwatorium Geofizycznym w Belsku, Przegląd Geofizyczny, 51 (3-4), 189-198

Nicoll K., Harrison R.G., 2016, Electric field measurements from Halley, Antarctica, Geophysical Research Abstracts, 18, EPSC2016-7738

Niedźwiedź T., 2015, Polarne badania meteorologiczne i klimatyczne Uniwersytetu Śląskiego, Problemy Klimatologii Polarnej, 25, 33-48

Nikiforova N.N., Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Kubicki M., Michnowski S., 2003, Influence of auroral latitude precipitations of energetic electrons on variations in the atmospheric electric field at polar latitudes (Spitsbergen Archipelago), Geomagnetism and Aeronomy, 43 (4), 29-35

Nikiforova N.N., Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Kubicki M., Michnowski S., 2005, Unusual variations in the atmospheric electric field during the main phase of the strong magnetic storm of October 30, 2003, at Świder Polish mid-latitude observatory, Geomagnetism and Aeronomy, 45 (1), 140-144

Norinder E.H., 1916, Observations de l'électricité atmosphérique à Vassijaure, Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar, 55 (6), 64 s.

Odzimek A., Baranski P., Kubicki M., Jasinkiewicz D., 2018, Electrical signatures of Nimbostratus and Stratus clouds in ground-level vertical atmospheric electric field and current density at mid-latitude station Swider, Poland, Atmospheric Research, 209, 188-203, DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.03.018

Odzimek A., Kubicki M., Baranski P., 2014, Ground-level atmospheric electricity under low-level stratiform clouds, [w:] Proceedings of the 15th International Conference on Atmospheric Electricity, A. Mansell, D. McGorman (red.), 21-26 lipca 2014, Norman, USA

Odzimek A., Kubicki M., Lester M., Grocott A., 2011, Relation between the SuperDARN ionospheric potential ground electric field at polar station Hornsund, [w:] Proceedings of the 14th International Conference on Atmospheric Electricity, 8-12 sierpnia 2011, Rio de Janeiro, Brazylia

Odzimek A., Lester M., 2009, Modelling the Earth's global atmospheric electric circuit – development, challenges and directions, [w:] Recent developments in atmospheric electricity. Publication to Commemorate the 90th Birthday of Stanisław Michnowski, P. Barański, M. Kubicki (red.), Publications of the Institute of Geophysics. Polish Academy of Sciences: Physics of the Atmosphere Series, D-73 (412), 37-53

Odzimek A., Lester M., Kubicki M., 2010, EGATEC: a new high-resolution engineering model of the global atmospheric electric circuit – Currents in the lower atmosphere, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 115 (D18), D18207, DOI: 10.1029/2009JD013341

Olson D.E., 1971, The evidence for auroral effects on atmospheric electricity, Pure and Applied Geophysics, 84 (1), 118-138, DOI: 10.1007/BF00875461

Park C.G., 1976a, Downward mapping of high-latitude ionospheric electric fields to the ground, Journal of Geophysical Research, 81 (1), 168-174, DOI: 10.1029/JA081i001p00168

Park C.G., 1976b, Solar magnetic sector effects on the vertical atmospheric electric field at Vostok, Antarctica, Geophysical Research Letters, 3 (8), 475-478, DOI: 10.1029/GL003i008p00475

Parkinson W.L., Torreson O.W., 1931, The diurnal variation of the electric potential of the atmosphere over the oceans, Union Géodésique et Géophysique Internationale Bulletin, 8, 340-345

Petelski T., 2002, Rozkłady rozmiarów aerozoli morskich nad morzami europejskiej Arktyki, Problemy Klimatologii Polarnej, 8, 125-135

Popielawska B., 2002, Pogoda kosmiczna – bardzo przyziemna sprawa, Publications of the Institute of Geophysics. Polish Academy of Sciences: Miscellanea Series, M-25 (347), 305-319

Popov I.B., Shvarts Y.M., Sokolenko L.G., 2008, Atmospheric electricity measurements on a ground meteorological network of Federal Hydrometeorology and Environmental Monitoring Service (Roshydromet), [w:] Proceedings of WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2008), 27-29 listopada 2008, Sankt Petersburg, Rosja

Przybylak R., Marciniak K., Araźny A., Kejna M., 2015, Badania polarne Katedry Meteorologii i Klimatologii UMK w Toruniu, Problemy Klimatologii Polarnej, 25, 19-32

Rachlewicz G., Zwoliński Z., 2015, Poznańskie polarne badania meteorologiczne i klimatologiczne, Problemy Klimatologii Polarnej, 25, 49-58

Reda J., Neska M., 2016, The one second data collection system in Polish geomagnetic observatories, Journal of Indian Geophysical Union, Special Issue, 2, 62-66

Reddell B.D., Benbrook J.R., Bering E.A., Cleary E.N., Few A.A., 2004, Seasonal variations of atmospheric electricity measured at Amundsen-Scott South Pole Station, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 109 (A9), DOI: 10.1029/2004JA010536

Roble R.G., 1985, On solar-terrestrial relationships in atmospheric electricity, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 90 (D4), 6000-6012, DOI: 10.1029/JD090iD04p06000

Rouch J., 1911, Observations d'electricite atmospherique faites dans l'Antarctique pendant l'expedition Charcot (1909), Annuaire de la Société météorologique de France, 59, 117-124

Ruhnke L.H., 1962, Electrical conductivity of air on the Greenland ice cap, Journal of Geophysical Research, 67 (7), 2767-2772, DOI: 10.1029/JZ067i007p02767

Ruohoniemi J.M., Baker K.B., 1998, Large-scale imaging of high-latitude convection with Super Dual Auroral Radar Network HF radar observations, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 103 (A9), 20797-20811, DOI: 10.1029/98JA01288

Shaw G.E., Hunsucker R.D., 1976, A study of possible correlation between fair--weather electric field and auroral activity, [w:] Electrical processes in atmospheres, H. Dolezalek, R. Reiter, H. Lansberg (red.), Steinkopff, Heidelberg, 576-581, DOI: 10.1007/978-3-642-85294-7_89

Sheftel V.M., 1991, Effects of magnetosphere-ionosphere generators and solar flares on the atmospheric electricity of high latitudes, [w:] Proceedings of the International Workshop on Global Atmospheric Electricity Measurements, S. Michnowski, L.H. Ruhnke (red.), Publications of the Institute of Geophysics. Polish Academy of Sciences: Physics of the Atmosphere Series, D-35 (238), 23-33

Sheppard P.A., 1937, Atmospheric electricity, [w:] British Polar Year Expedition. Fort Rae, N.W. Canada, 1932-33. Vol. 1. Dicussion of results. Meteorology, terrestrial magnetism and aurora, atmospheric electricity, International Polar Year Commission, British National Committee for the Polar Year, Londyn, 309-333

Sikora S., Budzik T., Głowacki P., Ignatiuk D., Jania J., Migała K., Puczko D., 2012, System gromadzenia danych meteorologicznych i glacjologicznych w obszarach polarnych – infrastruktura pomiarowa Polskiej Stacji Polarnej im. Stanisława Siedleckiego (SW Spitsbergen), Przegląd Geofizyczny, 57 (1), 35-48

Simpson G.C., 1906, Atmospheric electricity in high latitudes, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, 205, 61-97

Simpson G.C., 1919, British Antarctic Expedition 1910-1913: Meteorology: vol. 1 – Discussion, vol. 2 – Weather maps and pressure curves, vol. 3 – Tables, Thacker, Spink & Co., Londyn-Kalkuta

Siscoe G.L., Erickson G.M., Sonnerup B.U.A., Maynard N.C., Schoendorf J.A., Siebert K.D., Weimer D.R., White W.W., Wilson G.R., 2002, Hill model of transpolar potential saturation: comparisons with MHD simulations, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 107 (A6), SMP8-1-SMP8-8, DOI: 10.1029/2001JA000109

Sobota I., 2017, Selected problems of snow accumulation on glaciers during long-term studies in north-western Spitsbergen, Svalbard, Geografiska Annaler. Series A: Physical Geography, 99 (2), 177-192, DOI: 10.1080/04353676.2017.1297679

Soroka J., Bania M., 2013, Burze w Hornsundzie (SW Spitsbergen), Problemy Klimatologii Polarnej, 23, 137-146

Sverdrup H.U., 1927, Magnetic, atmospheric-electric, and auroral results, Maud Expedition, 1918-1925, [w:] Land magnetic and electric observations, 1918-1926,

H.W. Fisk, H.U. Sverdrup (red.), Department of Terrestrial Magnetism of the Carnegie Institution of Washington, Washington D.C., 309-524

Swider W., 1985, Ionic mobility, mean mass, and conductivity in the middle atmosphere from near ground level to 70 km, Radio Science, 23 (3), 389-399, DOI: 10.1029/RS023i003p00389

Szymański A., 1980, The construction and work of magnetic observatory "Arctowski" (King George Island, South Shetland Islands), Polish Polar Research, 1 (2-3), 105-115

Tinsley B.A., 1996, Correlations of atmospheric dynamics with solar wind-induced changes of air-Earth current density into cloud tops, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 101 (D23), 29701-29714, DOI: 10.1029/96JD01990

Tinsley B.A., 2000, Influence of the solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics in the troposphere, Space Science Review, 94 (1-2), 231-258, DOI: 10.1023/A:1026775408875

Tinsley B.A., Liu W., Rohrbaugh R.P., Kirkland M.W., 1998, South Pole electric field responses to overhead ionospheric convection, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 103 (D20), 26137-26146, DOI: 10.1029/98JD02646

Tinsley B.A., Zhou L., 2006, Initial results of a global circuit model with variable stratospheric and tropospheric aerosols, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 111 (D16), DOI: 10.1029/2005JD006988

Torreson O.W., Wait G.R., 1948, Atmospheric-electric results from Huancayo Observatory, Peru, 1924-1934, Carnegie Institution of Washington Publication, 175 (19), 547 s.

Troshichev O.A., Egorova L.V., Vovk V.Ya., 2003, Evidence for influence of the solar wind variations on atmospheric temperature in the southern polar region, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 65 (8), 947-956, DOI: 10.1016/S1364-6826(03)00112-3

Tuomi T.J., 1989, Ten year summary 1977-1986 of atmospheric electricity measured at Helsinki-Vantaa Airport, Finland, Geophysica, 25 (1-2), 1-20

Ustrnul Z., 2015, Krakowskie polarne badania meteorologiczne i klimatyczne, Problemy Klimatologii Polarnej, 25, 67-74

Van der Schueren A., Koenigsfeld L., 1963, Electricite atmospherique a la Base Roi Baudoin, Institut Royal Météorologique de Belgique, Publications. Serie A, 40

Victor N.J., Manu S., Frank-Kamenetsky A.V., Panneerselvam C., Kumar Anil C.P., Elango P., 2016, Network of observations on the atmospheric electrical parameters during geomagnetic storm on 5 April 2010, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 121 (3), 2407-2417, DOI: 10.1002/2015JA022080

Weimer D.R., 2005, Improved ionospheric electrodynamic models and application to calculating Joule heating rates, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 110 (A5), A05306, DOI: 10.1029/2004JA010884

Wernik A.W., 1996, Jonosfera na dużych szerokościach i jej badania w Polskiej Stacji Polarnej na Spitsbergenie, Przegląd Geofizyczny, 41 (1-2), 31-37

Whipple F.J.W., 1929, On the association of the diurnal variation of electric potential gradient in fine weather with the distribution of thunderstorms over the globe,

Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 55 (229), 18 s., DOI: 10.1002/qj.49705522902

Whipple F.J.W., Scrase F.J., 1936, Point discharge in the electric field of the earth, an analysis of continuous records obtained at Kew observatory, Geophysical Memoirs, 68 (7), 20 s.

Williams E.R., 2009, The global electrical circuit: a review, Atmospheric Research, 91, 140-152, DOI: 10.1016/j.atmosres.2008.05.018

Wilson C.T.R., 1921, Investigation on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms, Philosophical Transactions of the Royal Society A, 211, 73-115, DOI: 10.1098/rsta.1921.0003

Zadorozhny A.M., Tyutin A.A., 1997, Universal diurnal variation of mesospheric electric fields, Advances in Space Research, 20 (11), 2177-2180, DOI: 10.1016/S0273-1177(97)00667-4

Zotov O.D., Rusakov N.N., Klain B.I., Anisimov S.V., 1991, Global variations of the vertical atmospheric electric current and their associations with some geophysical phenomena, [w:] Proceedings of the International Workshop on Global Atmospheric Electricity Measurements, S. Michnowski, L.H. Ruhnke (red.), Publications of the Institute of Geophysics. Polish Academy of Sciences: Physics of the Atmospheres Series, D-35 (238), 71-76

Słowniczek skrótów

CIW – Carnegie Institution of Washington
GAEC – Global Atmospheric Electric Circuit = GEC
GEC – Global Electric Circuit
GOE – Globalny Obwód Elektryczny
IMF – Interplanetary Magnetic Field
IAMAS – International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences
ICAE – International Commission on Atmospheric Electricity lub International Conference on Atmospheric Electricity
IGY – International Geophysical Year
IPY – International Polar Year
IUGG – International Union of Geodesy and Geophysics
MRG – Międzynarodowy Rok Geofizyczny
MRP – Międzynarodowy Rok Polarny
pp – piękna pogoda; kryteria lub warunki pięknej pogody w znaczeniu elektryczności atmosfery

S t r e s z c z e n i e

W artykule przedstawiono główne cechy ziemskich obszarów polarnych, Arktyki i Antarktyki, z punktu widzenia ich przynależności do globalnego atmosferycznego obwodu elektrycznego Ziemi oraz połączenia z układem prądów elektrycznych magnetosfery Ziemi. Omówiono lokalizację i chronologię obserwacji i badań elektryczności atmosfery w regionach polarnych do roku 2015, których znacząca liczba miała miejsce w czasie dużych przedsięwzięć geofizycznych, takich jak Międzynarodowe Lata Polarne i Międzynarodowy Rok Geofizyczny. Osobno dokonano przeglądu najważniejszych wyników badań elektryczności atmosfery w polskich stacjach polarnych – im. S. Siedleckiego w Hornsundzie na Spitsbergenie w Arktyce i im. H. Arctowskiego na Wyspie Króla Jerzego w Antarktyce. Na zakończenie przedstawiono możliwe kierunki rozwoju badań elektryczności atmosfery z wykorzystaniem polskich stacji polarnych oraz pola interdyscyplinarnej współpracy naukowej.

Słowa kluczowe: elektryczność atmosfery, globalny obwód elektryczny, GOE, Arktyka, Antarktyka, krzywa Carnegie, krzywa Maud, Międzynarodowy Rok Polarny.

S u m m a r y

The article presents the main features of the polar regions, Arctic and Antarctic, from the point of view of the Earth's global atmospheric electric circuit and its connection to the electric current system of the Earth's magnetosphere. The chronology of observations and research studies of atmospheric electricity in polar regions up to 2015 is presented, including main geophysical events such as International Polar Years and International Geophysical Year. Research studies on atmospheric electricity based on measurements at Polish polar stations: S. Siedlecki Polar Station in Hornsund, Spitsbergen, and H. Arctowski Antarctic Station on King George Island, have been reviewed separately. Article concludes with the possible directions of development of atmospheric electricity research using Polish polar stations and potential fields of interdisciplinary scientific cooperation.

Key words: atmospheric electricity, global electric circuit, GEC, Arctic, Antarctic, Carnegie curve, Maud curve, International Polar Year.