



Institute of Geophysics  
Polish Academy of Sciences

**PUBLICATIONS  
OF THE INSTITUTE OF GEOPHYSICS  
POLISH ACADEMY OF SCIENCES**

**Geophysical Data Bases, Processing and Instrumentation**

**424 (D-74)**

**Atmospheric Electricity:  
Commemorative Publication  
in Honor of Stanisław Michnowski  
on His 100-th Birthday**

**Warsaw 2018**





**INSTITUTE OF GEOPHYSICS  
POLISH ACADEMY OF SCIENCES**

**PUBLICATIONS  
OF THE INSTITUTE OF GEOPHYSICS  
POLISH ACADEMY OF SCIENCES**

**Geophysical Data Bases, Processing and Instrumentation**

**424 (D-74)**

**Atmospheric Electricity:  
Commemorative Publication  
in Honor of Stanisław Michnowski  
on His 100-th Birthday**

**Editors:**

**Anna Odzimek, Piotr Barański, and Anna Dziembowska**

**Warsaw 2018**

### **Honorary Editor**

Roman TEISSEYRE

### **Editor-in-Chief**

Marek KUBICKI

### **Advisory Editorial Board**

Janusz BORKOWSKI (Institute of Geophysics, PAS)

Tomasz ERNST (Institute of Geophysics, PAS)

Jerzy JANKOWSKI (Institute of Geophysics, PAS)

Maria JELEŃSKA (Institute of Geophysics, PAS)

Andrzej KIJKO (University of Pretoria, Pretoria, South Africa)

Natalia KLEIMENOVA (Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)

Zbigniew KŁOS (Space Research Center, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland)

Jan KOZAK (Geophysical Institute, Prague, Czech Republic)

Antonio MELONI (Istituto Nazionale di Geofisica, Rome, Italy)

Hiroyuki NAGAHAMA (Tohoku University, Sendai, Japan)

Kaja PIETSCH (AGH University of Science and Technology, Cracow, Poland)

Paweł M. ROWIŃSKI (Institute of Geophysics, PAS)

Steve WALLIS (Heriot Watt University, Edinburgh, United Kingdom)

Wacław M. ZUBEREK (University of Silesia, Sosnowiec, Poland)

### **Associate Editors**

Łukasz RUDZIŃSKI (Institute of Geophysics, PAS) – **Solid Earth Sciences**

Jan WISZNIOWSKI (Institute of Geophysics, PAS) – **Seismology**

Jan REDA (Institute of Geophysics, PAS) – **Geomagnetism**

Krzysztof MARKOWICZ (Institute of Geophysics, Warsaw University) – **Atmospheric Sciences**

Mark GOŁKOWSKI (University of Colorado Denver) – **Ionosphere and Magnetosphere**

Andrzej KUŁAK (AGH University of Science and Technology) – **Atmospheric Electricity**

Marzena OSUCH (Institute of Geophysics, PAS) – **Hydrology**

Adam NAWROT (Institute of Geophysics, PAS) – **Polar Sciences**

### **Managing Editors**

Anna DZIEMBOWSKA, Zbigniew WIŚNIEWSKI

### **Technical Editor**

Marzena CZARNECKA



## C O N T E N T S

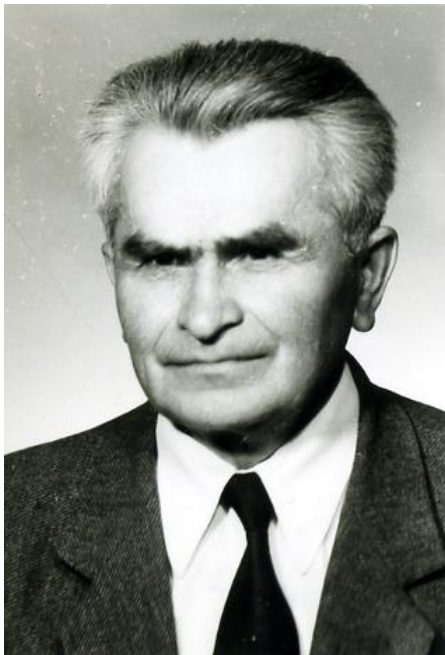
Editorial note .....	5
Earle R. Williams – Stanisław Michnowski: Maverick of the global electrical circuit .....	7
Anna Odzimek – Preface .....	9
Bibliography of publications by Stanisław Michnowski .....	13
From coworkers, colleagues and friends (Od współpracowników, kolegów i przyjaciół) .....	21
Słowo od Jubilata (Words from Stanisław Michnowski) .....	37
Selected early publications by Stanisław Michnowski .....	43
Wpływ wyładowań z ostrzy na wartość natężenia pola elektrycznego przy powierzchni Ziemi [The influence of point discharge currents on the Earth's electric field], 1955, <i>Acta Geophys. Pol.</i> <b>3</b> , 3 .....	45
Electric field variations following lightning discharges measured in Warsaw and Świder, 1967, <i>Acta Geophys. Pol.</i> <b>15</b> , 4 .....	61
Observations of electric field variations following lightning discharges, 1969, <i>Acta Geophys. Pol.</i> <b>17</b> , 3 .....	64
Electric field variations in a medium with variable conductivity, produced by a point charge above a conductive plane, 1973, <i>Acta Geophys. Pol.</i> <b>21</b> , 4 .....	76
Some results on the measurements of radioactive, atmospheric electricity and meteorological parameters at the Geophysical Observatory at Świder, 1976, <i>Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. D-1</i> (99) .....	96
Wpływ rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych na jonizację powietrza pomieszczeń mieszkalnych [Effect of building materials and structures upon air-ionization in flats], 1980, <i>Pr. Nauk. Inst. Techn. Budowl.</i> <b>35</b> .....	98
Wpływ rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych na zagrożenie zdrowia przez elektryczność statyczną [Effect of building materials and structures upon health hazard from static electricity], 1980, <i>Pr. Nauk. Inst. Techn. Budowl.</i> <b>35</b> .....	100
Partly insulated wire antenna for electric field and air-earth current measurements in the free atmosphere, 1987, <i>Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. D-26</i> (198) .....	102
A case of thunderstorm system development inferred from lightning distribution, 1987, <i>Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. D-26</i> (198) .....	103
On simultaneous observations of geomagnetic and atmospheric electric field changes at Arctic Station, Hornsund, Spitsbergen, 1991, <i>Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. D-35</i> (238) .....	158
Concluding remarks on the Mądralin Workshop, 1991, <i>Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. D-35</i> (238) .....	171
The field-dependent currents derived from electric field variation following lightning discharges observed at the earth surface, 1992, <i>Acta Geophys. Pol.</i> <b>39</b> , 3 .....	179

Supplement: Full texts in the electronic version at <https://pub.igf.edu.pl>





## Editorial Note



The current issue of *Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences*, is to commemorate the Hundredth Birthday of Stanisław Michnowski – the pioneer of experimental and theoretical research in various branches of atmospheric electricity. We republish here some of his influential early papers, which are hardly available in electronic form. We also include personal notes from the coworkers, colleagues and friends of this outstanding Scientist and Man, giving evidence for his achievements, merits, and role in the scientific communities.

This is a second issue of this journal in a new series to honor the achievements of eminent scientists associated with the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences. The first, Vol. A-30 (420), was published to commemorate the 50th anniversary of professorship of Professor Roman Teisseyre.

Marek Kubicki, Editor-in-Chief  
Anna Dziembowska, Managing Editor





## Stanisław Michnowski: Maverick of the Global Electrical Circuit

Earle R. WILLIAMS

Massachusetts Institute of Technology,  
Cambridge, MA, USA

✉ earlew@ll.mit.edu

Stanisław Michnowski has worked the Earth's global electrical circuit (GEC) in a research career whose length has now eclipsed that of C.T.R. Wilson, and which remains viable today on the eve of his 100th birthday as he prepares another manuscript. The development and utilization of three measurement sites at different latitudes (Cha-Pa in Vietnam (22 N), Świder in Poland (50 N), and Hornsund in Spitsbergen (77 N)) has enabled a broad perspective on the behavior of atmospheric electrical variables.

With his knowledge that tropical convection dominated the source for the GEC, Michnowski established an observatory far from home at Cha-Pa in North Vietnam. With his knowledge that point discharge dominated the "balance sheet" for charge transfer to Earth, one of his first research publications explored this topic in detail (Michnowski 1955). He has continued to investigate the behavior of lightning in thunderstorms both in Vietnam and in Poland from the standpoint of its role in the GEC (Michnowski 1969, Barański and Michnowski 1992).

While in Vietnam, a country adjacent to the sea, Michnowski had access to a large population of "warm" tropical clouds that would not have been present in Poland. As a relative newcomer to the field of atmospheric electricity at the time, he had the audacity to publish an observation revealing two lightning flashes in a cloud he documented to be in this "warm" category (Michnowski 1963). This finding threw a wrench into a primary role for ice-based theories and also cast doubt on the idea that the polarity of the GEC was determined by some special property of ice. This publication also fired the enthusiasm of advocates of the convective theory for storm electrification at that time.

At three different observatories, Michnowski kept a watchful eye on the behavior of the "fair-weather" electric field. Based on monitoring at Świder, he came to realize the challenges to seeing globally representative behavior against the local noise from the polluted continental boundary layer and the effects of radioactivity from weapons testing and from nuclear accidents (Kubicki et al. 2003). Undeterred by this disquieting news, he changed his focus and main observational site to higher latitude where the atmosphere was cleaner and where extra-tropospheric influences were more prevalent.

Throughout his long career, Michnowski has championed the study of the DC global circuit, and later teamed with Kraków colleagues on the Earth's Schumann resonances (Nieckarz

*et al.* 2009). One of his key contributions with the DC global circuit, stimulated by observations at Hornsund and exemplified in a review paper (Michnowski 1998), has been the emphasis that the global circuit picture of Wilson (1921) was oversimplified. The ionospheric conductor and isopotential surface does not cleanly isolate tropospheric meteorology from solar/space physics in Wilson's picture and as many students of the GEC wish to be true (this writer included). Fields and particles from the Sun and magnetosphere can traverse Wilson's isopotential to influence the fair weather field  $E_z$  at the surface (*e.g.*, Nikiforova *et al.* 2003). Michnowski's frequent use of  $E_z$  as a proxy for ionospheric potential, prevalent in other global circuit studies, deserves careful scrutiny in future work. The challenge remaining is to distinguish the effects of changes in the medium of the GEC from changes in the source.

Happy 100th Birthday Stanisław!

### References

- Barański, P. and S. Michnowski (1991), The field-dependent currents derived from the electric field variation following lightning discharges observed at the Earth surface, *Acta Geophys. Pol.* **39**, 3, 335–348.
- Kubicki, M., S. Michnowski, B. Mysłək-Laurikainen, and S. Warzecha (2003), Long-term variations of some atmospheric electricity, aerosol and extraterrestrial parameters at Świder Observatory. **In:** *Proc. 12th Int. Conf. on Atmospheric Electricity, 9-13 June 2003, Versailles, France*, 291–294.
- Michnowski, S. (1955), The influence of point discharge currents on the Earth's electric field, *Acta Geophys. Pol.* **3**, 3, 115–130 (in Polish).
- Michnowski, S. (1963), On the observation of lightning in warm clouds, *Ind. J. Meteor. Geophys.* **14**, 3, 320–322.
- Michnowski, S. (1969), Some observations of electric field variations following lightning discharges. **In:** S.C. Coroniti and J. Hughes (eds.), *Planetary Electrodynamics*, Vol. 2, Gordon and Breach Science Publ., New York, 51–54.
- Michnowski, S. (1998), Solar wind influences on atmospheric electricity variables in polar regions, *J. Geophys. Res.* **103**, D12, 13939–13948, DOI: 10.1029/98JD01312.
- Nieckarz, Z., A. Kułak, S. Zięba, M. Kubicki, S. Michnowski, and P. Barański (2009), Comparison of global storm activity rate calculated from Schumann resonance background components to electric field intensity  $E_{0z}$ , *Atmos. Res.* **91**, 2-4, 184–187, DOI: 10.1016/j.atmosres.2008.06.006.
- Nikiforova, N.N., N.G. Kleimenova, O.V. Kozyreva, M. Kubitski and S. Michnowski (2003), Influence of auroral-latitude precipitation of energetic electrons on variations in the atmospheric electric field at polar latitudes (Spitzbergen Archipelago), *Geomag. Aeron.* **43**, 1, 29–35.
- Wilson, C.T.R. (1921), Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms, *Phil. Trans. A* **221**, 582–593, DOI: 10.1098/rsta.1921.0003.



## Preface

Anna ODZIMEK

Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences  
Warsaw, Poland

✉ aodzimek@igf.edu.pl

The selected works reprinted in this issue recollect the stages and milestones in the research studies of Stanisław Michnowski, published mainly in the *Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences*, and in *Acta Geophysica Polonica*, in older paper issues and thus not widely available. More recent articles listed in the enclosed Bibliography can now be found elsewhere in the electronic form.

The research studies of atmospheric electricity can overall be divided into two main paths – research into the science of thunderstorms or more generally of electrified clouds, and studies of the electricity of atmospheric fair-weather conditions. Both of these paths are present in the scientific career of Stanisław Michnowski. What has initially brought him into the field of atmospheric electricity were problems of lightning protection and physics of lightning which he studied at Warsaw Technical University in the early years.

An experimental campaign on natural lightning and atmospheric electric fields and currents at the Geophysical Observatory in Świder near Warsaw has opened Stanisław's long chapter of research investigations in the field of atmospheric electricity at the Department of Geophysics of the Polish Academy of Sciences (PAS) in Warsaw, later the Institute of Geophysics PAS. The first article reprinted here and the first major publication of Stanisław Michnowski presents the summary of the results from the early experimental work at Świder on point discharge current (Michnowski 1955). From the beginning the work of Stanisław in his investigation of any scientific topic has been characterised by applying a wide spectrum of auxiliary methods or measurements, attention to details in the analysis of the obtained results and vision for future investigations.

The experience gathered in the following decade of development of Świder as an atmospheric electricity station and establishing an atmospheric electricity station in Cha-Pa (Sa Pa) in North Vietnam during the International Geophysical Year has led Stanisław Michnowski to take on further experimental campaigns, this time focused on lightning and specifically the variations of the atmospheric electric field after lightning discharges. These problems interested him in view of the thundercloud structure and structure of the lightning discharges which could be inferred from the observations by using models of the variations of the electric field (E-field) after lightning discharges. The conclusions of this experimental work on light-

ning-related electric field variations from Świder and Warsaw are summarised in the second paper recollected here (Michnowski 1967). As the observations have brought some new results and indicated some disagreements with the existing models of the E-field variations, Stanisław has continued the measurements of the electric field recovery after lightning during his visiting fellowship in England. The summary of the results of the whole of the experimental work has been published in the paper reprinted here as the third (Michnowski 1969). Finally, the fourth reprinted paper is the theoretical work of Stanisław Michnowski on the atmospheric electric field recovery after lightning discharges where he presents his theoretical model that describes the processes in agreement with observations (Michnowski 1973), and belongs to his main scientific achievements.

The next three articles recollected in this issue concern the results of collaboration of the Atmospheric Electricity Group led by Stanisław Michnowski with the national Central Laboratory for Radiological Protection, Central Institute for Labour Protection in Warsaw, Institute for Nuclear Research in Świerk and Warsaw Technical University. One of them is related to joint results of observations of radioactivity and its effects on atmospheric electricity measured at Świder, and further two present the results of pioneering at that time investigations of the effects of building materials on indoor air ionisation, induced static electricity and related health issues (Michnowski *et al.* 1976, 1980; Korniewicz *et al.* 1980).

The results from the publication which follows next in the list of reprints (Michnowski *et al.* 1987) belong to significant achievements of Stanisław and his collaborators from the University of Uppsala and the Institute of Meteorology and Water Management in Warsaw. The paper is one the first, pioneering works on the lightning activity and electric structure of a mesoscale thunderstorm convective system, so widely investigated nowadays in regard to severe weather events and TLE-producing (Transient Luminous Events) thunderstorms.

The scope of the observational work of Stanisław Michnowski in atmospheric electricity included international efforts and the Polish side contributed by taking part in the international comparative balloon measurements in the free atmosphere in Laramie, at the University of Wyoming, USA, in 1978. This was realised due to collaboration with the designer of instruments for the measurements of the atmospheric electric parameters, Jerzy Berliński of the Warsaw University of Technology, Stanisław's junior colleague. In connection with these efforts we recollect the publication of Berliński and Michnowski (1987).

In the late 1980s atmospheric electricity measurements have been established in the Polish Polar Station in Hornsund, Svalbard, by Stanisław Michnowski with the participation of Group members, including Stanisław Warzecha, Marek Chrobak, Andrzej Łosakiewicz, and also Jan Drzewiecki of Warsaw Technical University, and have been continued in the following years by Marek Kubicki. The paper presented here as next (Michnowski *et al.* 1991) is the first publication of the Group and Polish and international collaborators in this field.

The research paper by Stanisław Michnowski published in *Journal of Geophysical Research* (Michnowski 1998) on the effects of the solar wind and magnetosphere on the electricity of the lower atmosphere in which he outlined the directions of development of these studies against the background of the state of knowledge in the field was of great significance for the current research on atmospheric electricity in polar regions.

Due to the long-time collaboration with scientists from the Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, in Moscow: Ninel Nikiforova, Natalia Kleimenova and Olga Kozyreva, significant new results of solar-wind-magnetosphere effects on ground-level atmospheric electricity have been obtained, supported by simultaneous geophysical, meteorological and ionospheric observations that showed regularity of some phenomena, as well as their unusual character depending on the geophysical conditions. Several papers on this sub-

ject were subsequently published in *Geomagnetism and Aeronomy* (Nikoforova *et al.* 2003, 2005; Kleimenova *et al.* 2008, 2010).

The summary of the International Workshop on Global Atmospheric Electricity Measurements, 10-16 September 1989 in Maðralin, Poland, which has been organised by Stanisław Michnowski in cooperation with the International Commission on Atmospheric Electricity and the Institute of Geophysics PAS and the Polish Geophysical Society, shows his broad interest in the entire field of atmospheric electricity. The concluding remarks of the Workshop presented the state of contemporary knowledge in this field and the directions of its desired further development (Michnowski 1991).

The last paper recollected in this book (Barański and Michnowski 1992) is a co-authored work of Stanisław and his junior colleague Piotr Barański, again focused on lightning.

This is another one in the series of works authored by the junior colleagues and students of Stanisław Michnowski in the Atmospheric Electricity Group at Warsaw. A particular achievement of the group led by Stanisław and of Nguyen Manh Duc from the Vietnamese Academy of Sciences who stayed with the group on longer research fellowships, is the work on initiation of lightning discharges in thunderclouds. The hypothesis presented in the co-authored paper published in *Journal of Geophysical Research* on the cumulative effect of droplets on the initiation of atmospheric discharges is still of interest today (Nguyen and Michnowski 1996).

The full bibliography of the papers authored and co-authored by Stanisław Michnowski in this book completes the picture of his research studies in atmospheric electricity and reflects their broad scope. It is the nature of this scientific discipline that demands from its investigators multidisciplinary knowledge and complex approach, and Stanisław Michnowski in his work has always been open and preparing to the new challenges which he met on his way whether by his own choice or as the circumstances demanded.



## Bibliography of Selected Publications by Stanisław Michnowski

### Before 1960

- Michnowski, S. (1955), Główny problem elektryczności atmosferycznej w Międzynarodowym Roku Geofizycznym 1957/1958, *Post. Fizyki* **8**, 5, 567–593.
- Michnowski, S. (1955), Wpływ wyładowań z ostrzy na wartość natężenia pola elektrycznego przy powierzchni Ziemi [The influence of point discharge currents on the Earth's electric field], *Acta Geophys. Pol.* **3**, 3, 115–130.
- Michnowski, S. (1957), Point discharges in the interchange of electric charge between the Earth and the atmosphere [Wyładowania z ostrzy w wymianie ładunków elektrycznych między ziemią a atmosferą], *Acta Geophys. Pol.* **5**, 2, 123–134.
- Michnowski, S., and K. Stefanicki (1958), Pomiar elementóv elektryczności atmosferycznej prowadzone w Cha-Pa, *Acta Geophys. Pol.* **6**, 3, 303–306.

### 1960–1970

- Michnowski, S. (1960), *Introduction into Problems of Atmospheric Electricity* [So Luoc Ve Nhung Van De Dien Khi Quyen] (in Vietnamese), translated by Nguyen Manh Duc, Hanoi, 135 pp.
- Michnowski, S. (1960), Stacja elektryczno-atmosferyczna w Cha-Pa (Wietnam) [The atmospheric electricity station at Cha-Pa (Vietnam)], *Acta Geophys. Pol.* **8**, 2, 164–171.
- Michnowski, S. (1963), Obserwacje wyładowań piorunowych w chmurze ciepłej [Observations of lightning in warm clouds], *Acta Geophys. Pol.* **11**, 3, 213–217.
- Michnowski, S. (1963), On the observations of lightning in warm clouds, *Indian J. Meteorol. Geophys.* **14**, 3, 320–322.
- Michnowski, S., and Nguyen Manh Duc (1965), On the values and the variations of the atmospheric electric field at Cha-Pa, *Mater. Prace Zakł. Geofizyki* **7**, 107–123.
- Michnowski, S., and Nguyen Tac Nhan (1965), Remarks on preliminary electrical observations of fog and clouds at Cha-Pa, *Mater. Prace Zakł. Geofizyki* **7**, 144–152.
- Michnowski, S., Nguyen Manh Duc, and Nguyen Tac Nhan (1965), The seasonal and short duration variations of fallout at Cha-Pa 1958–1961, *Mater. Prace Zakł. Geofizyki* **7**, 125–134.

- Michnowski, S. (1967), Electric field variations following lightning discharges measured in Warsaw and Świdrze [Zmiany pola elektrycznego po wyładowaniach atmosferycznych obserwowanych w Warszawie i Świdrze], *Acta Geophys. Pol.* **15**, 4, 315–334.
- Michnowski, S. (1968), Zmiany pola elektrycznego chmur burzowych w warstwie przyziemnej powietrza w Świdrze i w Warszawie [Electric field variations of thunderclouds in Swider and Warsaw], *Mater. Prace Zakł. Geofizyki* **25**, 23–52.
- Michnowski, S. (1969), *Najnowsze Osiągnięcia Nauki i Techniki* [Newest Achievements of Science and Technology], R. Colborna (ed.), PWN, Warszawa, 676–690.
- Michnowski, S. (1969), Observations of electric field variations following lightning discharges [Obserwacje zmian pola elektrycznego po wyładowaniach atmosferycznych], *Acta Geophys. Pol.* **17**, 3, 241–252.
- Michnowski, S. (1969), Some observations of electric field variations following lightning discharges. **In:** S.C. Coroniti and J. Hughes (eds.), *Planetary Electrodynamics*, Vol. 2, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 51–54.
- Michnowski, S. (1969), Z prac Międzynarodowej Konferencji Elektryczności Atmosferycznej, Tokio 12–18. V. 1968 [The International Conference on Atmospheric Electricity, Tokyo], *Przegl. Geofiz.* **14**, 22, 109–111.
- Nguyen Manh Duc, and S. Michnowski (1969), Some results of lightning frequency investigation in Poland during 1966–1967 [Wstępne wyniki badań częstości wyładowań piorunowych w Polsce w latach 1966–1967], *Acta Geophys. Pol.* **17**, 2, 189–196.

### 1970–1980

- Michnowski, S. (1973), Electric field variations in a medium with variable conductivity, produced by a point charge above a conductive plane [Zmiany pola elektrycznego w ośrodku o zmiennym przewodnictwie w przypadku rozładowywania bieguna położonego ponad płaszczyznę przewodzącą], *Acta Geophys. Pol.* **21**, 4, 306–324.
- Michnowski, S. (1974), Badania zmian pola elektrycznego po wyładowaniach atmosferycznych [An analysis of electric field variation following lightning discharges], *Mater. Prace Inst. Geofiz.* **81**, p. 104.
- Michnowski, S. (1974), O badaniach elektryczności atmosferycznej w Polsce [On the research of atmospheric electricity in Poland], *Przegl. Geofiz.* **19**, 27, 95–100.
- Michnowski, S. (1974), Transient variation of electric field in nonhomogeneous medium, produced by a point charge above a conductive plane, *Arch. Meteor. Geophys. Biokl. Ser. A* **23**, 3–4, 333–347.
- Michnowski, S. (1974), Waclaw Kowalski 16 III 1915 – 5 VIII 1974 (Obituary), *Mater. Prace Inst. Geofiz.* **83**, 97–99.
- Michnowski, S. (1976), Atmospheric electricity and its application to meteorology [Elektryczność atmosfery i jej zastosowania w meteorologii], *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.* **D-1**, 99, 3–15.
- Michnowski, S. (1976), Atmospheric electricity research in the Institute of Geophysics of the Polish Academy of Sciences [Badania elektryczności atmosfery w Instytucie Geofizyki Polskiej Akademii Nauk], *Acta Geophys. Pol.* **24**, 4, 283–287.

- Michnowski, S., J. Peńsko, and B. Gwiazdowski (1976), Some results on the measurements of radioactive, atmospheric electricity and meteorological parameters at the Geophysical Observatory at Świder [Wstępne wyniki pomiarów radioaktywnych, atmosferyczno-elektrycznych i meteorologicznych prowadzonych w Obserwatorium Geofizycznym w Świdrze], *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.* **D-1**, 99, 53–63.
- Peńsko, J., S. Michnowski, S. Warzecha, and B. Gwiazdowski (1976), Pomiary elementów elektrycznych, radioaktywnych i meteorologicznych w Obserwatorium Geofizycznym PAN w Świdrze [Radioactivity, atmospheric electricity and meteorological elements measurements at Swider Geophysical Observatory], *Przegl. Geofiz.* **21**, 29, 281–286.
- Nikiforova, N., and S. Michnowski (1977), Some geomagnetic and atmospheric-electric variations observed at Świder and Belsk Observatories. **In:** H. Dolezalek and R. Reiter (eds.), *Electrical Processes in Atmosphere, Proc. 5th International Conference at Atmospheric Electricity, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2–7 September 1974*, Dr Dietrich Steinkopff Verlag, Darmstadt, 728–735.

### 1980–1990

- Korniewicz, H., J.M. Kowalski, and S. Michnowski (1980), Wpływ rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych na zagrożenie zdrowia przez elektryczność statyczną [Effect of building materials and structures upon health hazard from static electricity] **In:** *Wpływ Rozwiązań Materiałowo-Konstrukcyjnych w Budownictwie na Zdrowie Człowieka, I Krajowe Sympozjum Naukowe, Warszawa 18–19 listopada 1980 r., Pr. Nauk. Inst. Techn. Budowl.* **35**, 186–195.
- Michnowski, S., S. Warzecha, and A. Wajdycz (1980), Wpływ rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych na jonizację powietrza pomieszczeń mieszkalnych [Effect of building materials and structures upon air-ionization in flats]. **In:** *Wpływ Rozwiązań Materiałowo-Konstrukcyjnych w Budownictwie na Zdrowie Człowieka, I Krajowe Sympozjum Naukowe, Warszawa 18–19 listopada 1980 r., Pr. Nauk. Inst. Techn. Budowl.* **35**, 173–184.
- Rosen, J.M., D.J. Hofmann, W. Gringel, S. Michnowski, J. Morita, T. Ogawa, and D. Olson (1980), Balloon borne atmospheric measurements to 33 km. Part I. Small ion mobility, air-earth current density, conductivity, ionization and electric field. **In:** *Proc. 6th International Conference on Atmospheric Electricity, Manchester, England, 28 Jul – 1 Aug 1980*, preprint, 20 pp.
- Berliński, J., and S. Michnowski (1981), An antenna for electric field and air-earth current measurement in the free atmosphere, Report AP-67, Department of Physics and Astronomy, University of Wyoming, 23 pp.
- Rosen, J.M., D.J. Hofmann, W. Gringel, J. Berliński, S. Michnowski, J. Morita, T. Ogawa, and D. Olson (1982), Results of an international workshop on atmospheric electrical measurements, *J. Geophys. Res. – Oceans* **87**, C2, 1219–1227, DOI: 10.1029/JC087iC02p01219.
- Israelsson, S., M.A. Enayatollah, E. Pisler, S. Michnowski, and I. Adebokoun (1983), On the occurrence of cloud-to-ground flashes in southern Sweden, *Publs. Inst. High Volt. Res., Uppsala Univ.*, 37 pp.



- Michnowski, S., and M.A. Enayatollah (1983), On the estimation of random error for the LLP System, *Publs. Inst. High Volt. Res., Uppsala Univ.*, 14 pp.
- Michnowski, S., V. Corray, and I. Koszewski (1983), On the system of recording of fast and slow electric field variations produced by lightning, *Publs. Inst. High Volt. Res., Uppsala Univ.*
- Michnowski, S., J. Parfiniewicz, S. Israelson, A. Enayatollah, and E. Pislser (1984), Distribution of cloud to ground lightning discharges and their polarity during thunderstorms observed in Sweden on May 18, 1982. **In:** *VII International Conference on Atmospheric Electricity, June 3-8, 1984, Albany, USA.*
- Astrom, E., and S. Michnowski (1987), On the application of the dynamical method for recording of electric fields by a dual field-mill [O stosowaniu metody dynamicznej do rejestracji pól elektrycznych za pomocą podwójnego młynka], *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.* **D-26**, 198, 181–200.
- Barański, P., and S. Michnowski (1987), Variations of the electric field and precipitation measured under thunderclouds in Warsaw [Zmiany pola elektrycznego mierzone pod chmurami burzowymi w Warszawie], *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.* **D-26**, 198, 59–74.
- Berliński, J., and S. Michnowski (1987), Partly insulated wire antenna for electric field and air-earth current in the free atmosphere [Częściowo izolowana antena do pomiaru natężenia pola elektrycznego i gęstości prądu pionowego w wolnej atmosferze], *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.* **D-26**, 198, 215–238.
- Michnowski, S., S. Israelsson, J. Parfiniewicz, A. Enayatollah, and E. Pislser (1987), A case of thunderstorm system development inferred from lightning distribution [Analiza mezoskalowego układu burz na podstawie wyładowań atmosferycznych], *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.* **D-26**, 198, 3–57.
- Nikiforova, N.N., S. Michnowski, and J. Marianiuk (1987), Sopostavlenie variatsii geomagnitnogo i atmosferno-elektricheskikh poley po materialam Observatorii Swider i Belsk. **In:** *Estestvennoye Elektromagnitnoe Pole Ziemi*, Izd. Nauka, Moskva, 88–97.
- Warzecha, S., and S. Michnowski (1987), On the effect of insolation on aerosol and atmospheric ions density at Swider [O wpływie insolacji na koncentrację aerosolu i jonów atmosferycznych w Świdrze], *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.* **D-26**, 198, 155–180.
- Barański, P., and S. Michnowski (1988), Estimation of the field-dependent currents from the electric field variation following lightning discharges. **In:** *Proc. 8th International Conference on Atmospheric Electricity, June 13–16, 1988. Uppsala, Sweden*, Inst. High Volt. Research Uppsala Univ., 833–840.
- Michnowski, S., S. Warzecha, and S. Israelsson (1989), Variations of atmospheric ion concentrations and conductivity related to air pollution and radioactive debris. **In:** *14th General Assembly of the European Geophysical Society, Barcelona, Spain, March 12–19, 1989.*

**1990–2000**

- Michnowski, S. (1991), Concluding remarks on the Maðralin Workshop. *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.* **D-35**, 238, 249–256.
- Michnowski, S., A. Szymański, N.N. Nikiforova, O.V. Kozyreva, D. Ermolenko, and K. Zielkowski (1991), On simultaneous observations of geomagnetic and atmospheric electric field changes at Arctic Station, Hornsund, Spitsbergen, *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.* **D-35**, 238, 83–95 (Proceedings of the International Workshop on Global Atmospheric Electricity Measurements, Maðralin, Poland, 10–16 September 1989).
- Barański, P., and S. Michnowski (1992), The field-dependent currents derived from electric field variation following lightning discharges observed at the earth surface, *Acta Geophys. Pol.* **39**, 3, 335–348.
- Kleimenova, N.G., O.V. Kozyreva, S. Michnowski, A. Szymański, and D.Yu. Ermolenko (1992), Vysokoshirotnye dlinnoperiodnyye pulsatsii v geomagnitnom pole i atmosfernom elektrichestve po nablyudenii na Arch. Shpitsbergen., *Geomagn. Aeron.* **32**, 2, 41–48 (in Russian).
- Kleimenova, N.G., S. Michnowski, N.N. Nikiforova, and O.V. Kozyreva (1995), Dlinnoperiodnyye pulsacii i fluktuacii napriazennosti elektricheskogo pola atmosfery na szirokach poliarneho kapsa, *Geomagn. Aeron.* **35**, 4, 38–48 (in Russian).
- Michnowski, S. (1996), O zastosowaniu obserwacji atmosferyczno-elektrycznych w Hornsundzie w badaniach oddziaływań wiatru słonecznego na atmosferę ziemską [Atmospheric-electric and geomagnetic observations at Hornsund in the studies of solar wind effects on the atmosphere], *Przegl. Geofiz.* **41**, 1-2, 1–2.
- Michnowski, S. (1996), Potrzeby udziału Polskiej Stacji Polarnej Hornsund w badaniach relacji Słońce-Ziemia na tle dotychczasowych prac i planów w tym zakresie [On possible participation of Polish Polar Station Hornsund in Sun-Earth relations research], *Przegl. Geofiz.* **41**, 1-2, 7–10.
- Michnowski, S. (1996), Remarks on observations of the solar wind influences on the electric field at the earth's surface in Polar Regions. **In:** *Proc. 10th International Conference on Atmospheric Electricity, June 10–14, 1996, Osaka, Japan*, 516–519.
- Michnowski, S., and N.N. Nikiforova (1996), Długookresowe fluktuacje pola geomagnetycznego i atmosferycznego pola elektrycznego podczas subburz i innych zaburzeń magnetycznych w Hornsundzie [Long-period fluctuations of geomagnetic and atmospheric-electric field at Hornsund during substorms and other magnetic disturbances], *Przegl. Geofiz.* **41**, 1-2, 57–65.
- Michnowski, S., N.N. Nikiforova, and N.G. Kleimenova (1996), The response of ground atmospheric-electric field at Hornsund to magnetospheric-ionospheric events. **In:** *Proc. 10th International Conference on Atmospheric Electricity, June 10–14, 1996, Osaka, Japan*, 520–523.
- Nguyen, M.D., and S. Michnowski (1996), On the initiation of lightning discharge in a cloud: 1. The high field regions in a thundercloud, *J. Geophys. Res. – Atmos.* **101**, D21, 26669–26673, DOI: 10.1029/96JD02339.

- Nguyen, M.D., and S. Michnowski (1996), On the initiation of lightning discharge in a cloud: 2. The lightning initiation on precipitation particles, *J. Geophys. Res. – Atmos.* **101**, D21, 26675–26680, DOI: 10.1029/96JD02338.
- Kleimenova, N.G., S. Michnowski, N.N. Nikiforova, and O.V. Kozyreva. (1998), Variatsii vertikalnoy sostavlayushchey atmosfernogo elektricheskogo pola v viechernom sektore polarnykh shirot (Obs. Hornsund), *Geomagn. Aeron.* **38**, 6, 149–156 (in Russian).
- Michnowski, S. (1998), Solar wind influences on atmospheric electricity variables in polar regions, *J. Geophys. Res. – Atmos.* **103**, D12, 13939–13948, DOI: 10.1029/98JD01312.

## 2000–2010

- Nikiforova, N.N., N.G. Kleimenova, O.V. Kozyreva, S. Michnowski, and M. Kubicki (2000), Atmospheric electric field variations in polar cap as a response to substorm ionosphere disturbances. **In:** *International Conference on Problems of Geophysics* (poster).
- Kobyliński, Z., and S. Michnowski (2002), On correlations of tropospheric dynamics with solar activity during a presence of volcanic aerosols in stratosphere. **In:** *EGS XXVII General Assembly, Nice, France, Geophys. Res. Abstr.* 4, EGS02–A02541 (CD-ROM).
- Kobyliński, Z., and S. Michnowski (2003), On the atmospheric response to solar cosmic ray events. **In:** *Proc. 12-th ICAE Conference, 9–13 June 2003, Versailles, France*, Vol. 1, 381–382.
- Kubicki, M., S. Michnowski, B. Mysiek-Laurikainen, and S. Warzecha (2003), Long term variations of some atmospheric electricity, aerosol, and extraterrestrial parameters at Świdler Observatory. **In:** *Proc. 12-th ICAE Conference, 9–13 June 2003, Versailles, France*, Vol. 1, 291–294.
- Michnowski, S., M. Kubicki, J. Drzewiecki, S. Israelsson, N. Kleimenova, N. Nikiforova, and O. Kozyreva (2003), Variations of atmospheric electricity elements in polar regions related to the solar wind changes. **In:** *Proc. 12th International Conference on Atmospheric Electricity, 9–13 June 2003, Versailles, France*, Vol. 1, 295–296.
- Nikiforova, N.N., N.G. Kleimenova, O.V. Kozyreva, M. Kubicki, and S. Michnowski (2003), Influence of auroral-latitude precipitation of energetic electrons on variations in the atmospheric electric field at polar latitudes (Spitsbergen Archipelago), *Geomagn. Aeron.* **43**, 1, 29–35.
- Nikiforova, N.N., N.G. Kleimenova, O.V. Kozyreva, M. Kubicki, and S. Michnowski (2005), Unusual variations in the atmospheric electric field during the main phase of the strong magnetic storm of October 30, 2003, at Świdler Polish midlatitude Observatory, *Geomagn. Aeron.* **45**, 1, 140–144.
- Kleimenova, N.G., O.V. Kozyreva, N.N. Nikiforova, S. Michnowski, and M. Kubicki (2006), Atmospheric electric field variations at polar latitudes (obs. Hornsund, Spitsbergen). **In:** *Proc. 3rd International Conference Geophysical Research in Spitsbergen Archipelago, Murmansk-Barentsburg, 03–05 October*, 11–18.
- Kozyreva, O.V., N.N. Nikiforova, N.G. Kleimenova, M. Kubicki, and S. Michnowski (2006), Case study on the pulsations in the atmospheric electric current and polar cap sub-

- storms. **In:** *Proc. 6-th International Conference on Problems of Geocosmos, St. Petersburg, 23–27 May 2006*, 226–227.
- Nikiforova, N.N., M. Kubicki, and S. Michnowski (2006), The research on atmospheric electric field anomaly as an index for short-impending prediction of earthquakes. **In:** *Proc. 6-th International Conference on Problems of Geocosmos, St. Petersburg, 23–27 May 2006*, 131–132.
- Barański, P., S. Michnowski, G. Masłowski, and W. Gajda (2007), Signatures of electric field changes associated with the continuing current stage of cloud-to-ground flashes. **In:** *Proc. 13th Conference on Atmospheric Electricity, 13–17 August 2007, Beijing, China*, Vol. I, 489–492.
- Kobylinski Z., and S. Michnowski (2007), Atmospheric electric and electromagnetic field rapid changes as possible precursors of earthquakes and volcano eruption: a brief review, *Sun and Geosphere* **2**, 1, 43–47.
- Kozyreva, O., N. Nikiforova, N. Kleimenova, S. Michnowski, and M. Kubicki (2007), Electric air-earth vertical current pulsations at Hornsund during polar substorms. Case studies. **In:** *Proc. 13th Conference on Atmospheric Electricity, 13–17 August 2007, Beijing, China*, Vol. I, 29–33.
- Kubicki, M., S. Michnowski, and B. Mysłek-Laurikainen (2007), Seasonal and daily variations of atmospheric electricity parameters registered at the Geophysical Observatory at Świder (Poland) during 1965–2000. **In:** *Proc. 13th Conference on Atmospheric Electricity, 13–17 August 2007, Beijing, China*, Vol. I, 50–54.
- Michnowski, S., M. Kubicki, N. Kleimenova, N. Nikiforova, O. Kozyreva, and S. Israelsson (2007), The polar ground-level electric field and current variations in relation to solar wind changes. **In:** *Proc. 13th Conference on Atmospheric Electricity, 13–17 August 2007, Beijing, China*, Vol. I, 9–12
- Nieckarz, Z., A. Kułak, M. Kubicki, S. Michnowski, and P. Barański (2007), Calculating global storm activity rate on the basis of Schumann resonance background component. **In:** *Proc. 13th Conference on Atmospheric Electricity, 13–17 August 2007, Beijing, China*, Vol. I, 72–75.
- Nikiforova, N.N., K.P. Teisseyre, S. Michnowski, and M. Kubicki (2007), On atmospheric electricity field anomaly before the Carpathian earthquake of 30.08.1986 at the Polish Observatory Świder. **In:** *Proc. 13th Conference on Atmospheric Electricity, 13–17 August 2007, Beijing, China*, Vol. I, 37–40.
- Kleimenova, N.G., O.V. Kozyreva, S. Michnowski, and M. Kubicki (2008), Effect of magnetic storms in the atmospheric electric field at midlatitudes, *Geomagn. Aeron.* **48**, 5, 622–630, DOI: 10.1134/S0016793208050071.
- Kleimenova, N.G., O.V. Kozyreva, S. Michnowski, M. Kubicki, and N.N. Nikiforova (2008), Magnetic storm effects in the atmospheric electric field variations. **In:** *Proc. 7th International Conference on Problems of Geocosmos, St. Petersburg, Russia, 26–30 May 2008*, 123–128.
- Kleimenova, N.G., O. Kozyreva, M. Kubicki, and S. Michnowski (2009), Variations of the mid-latitude atmospheric electric field ( $E_z$ ) associated with geomagnetic disturbances and Forbush decreases of cosmic rays, *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.* **D-73**, 412, 55–64.

- Michnowski, S., M. Kubicki, Z. Kłos, N. Kleimenova, O. Kozyreva, N. Nikiforova, and S. Israelsson (2009), Ground-level electric field and current variations in polar and mid-latitude regions, in relation to solar wind changes (extended abstract), *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.* **D-73**, 412, 129–131.
- Nieckarz, Z., A. Kułak, S. Zięba, M. Kubicki, S. Michnowski, and P. Barański (2009), Comparison of global storm activity rate from Schumann resonance background components to electric field intensity  $E_z$ , *Atmos. Res.* **91**, 2-4, 184–187, DOI: 10.1016/j.atmos.2008.06.006.

### Since 2010

- Kleimenova, N.G., O.V. Kozyreva, M. Kubicki, and S. Michnowski (2010), Morning polar substorms and variations in the atmospheric electric field, *Geomagn. Aeron.* **50**, 1, 48–57, DOI: 10.1134/S0016793210010068.
- Kleimenova, N.G., O.V. Kozyreva, M. Kubicki, and S. Michnowski (2011), Global electric circuit response to the geomagnetic disturbances. **In:** *Proc. 14th International Conference on Atmospheric Electricity, 8–12 August 2007, Rio de Janeiro, Brazil*, 4 pp.
- Kleimenova, N., O. Kozyreva, M. Kubicki, and S. Michnowski (2011), Substorm effects in the polar latitude atmospheric field disturbances. **In:** *Proceedings of XXXIII Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”*, Polar Geophysical Institute, Kola Science Centre RAS, Apatity, 167–170.
- Kleimenova, N.G., O.V. Kozyreva, M. Kubicki, and S. Michnowski (2011), Variations in the near-ground electric field at high latitudes and the potential drop across the polar cap during morning polar substorms, *Geomagn. Aeron.* **51**, 3, 394–401, DOI: 10.1134/S0016793211030091.
- Kleimenova, N., O. Kozyreva, S. Michnowski, and M. Kubicki (2013), Influence of geomagnetic disturbances on atmospheric electric field ( $E_z$ ) variations at high and middle latitudes, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* **99**, 117–122, DOI: 10.1016/j.jastp.2012.07.009.
- Michnowski, S., A. Odzimek, N. Kleimenova, O. Kozyreva, M. Kubicki, and N.N. Nikiforova (2014), Review of examples of solar wind lower atmosphere coupling observed in the electric field ( $E_z$ ) variations at the Earth’s surface during magnetic storms. **In:** *Proc. 15th International Conference on Atmospheric Electricity, 21–26 June 2014, Norman, USA*, 4 pp., [http://www.nssl.noaa.gov/users/mansell/icae2014/preprints/Michnowski\\_185.pdf](http://www.nssl.noaa.gov/users/mansell/icae2014/preprints/Michnowski_185.pdf).
- Kubicki, M., A. Odzimek, M. Neska, J. Berliński, and S. Michnowski (2016), First measurements of the Earth’s electric field at the Arctowski Antarctic station, King George Island, by the new Polish atmospheric electricity observation network, *Acta Geophys.* **64**, 6, 2630–2649, DOI: 10.1515/acgeo-2016-0096.
- Michnowski, S., and A. Odzimek (2017), Ninel Nikolaevna Nikiforowa (1932–2016), *Przegl. Geofiz.* **1-2**, 101–102.

## From Coworkers, Colleagues and Friends (Od Współpracowników, Kolegów i Przyjaciół)

### My work with Professor Stanisław Michnowski

I met Professor Stanisław Michnowski first time in St. Petersburg in the end of 1980s. I forgot the subject of the Meeting on which Stanisław was with his student Nguyen Manh Duc, but I could not forget his enthusiasm in speaking about relationship between the geomagnetic disturbances and atmospheric electric field variations. His arguments were very convincing so that I too became interested this new research and started to study this subject which was very far for me in that time.

Now the influence of the interplanetary conditions on the magnetosphere and ionosphere is termed “space weather effects”. But Stanisław was the first who seriously started to develop this problem applying it to the atmospheric electricity because he understood the physical basis of the possible influence of the interplanetary magnetic change on the global electric circuit and, correspondently, on the atmospheric electric field features near the Earth surface. In 1998, Stanisław has published that idea in the most important scientific international journal, *Journal of Geophysical Research*, where he has demonstrated how the solar and magnetosphere activity may significantly control a global electric circuit state due to ionosphere electric field disturbances.



Stanisław Michnowski with his Russian collaborators, Natalia Kleimenova and Olga Kozyreva, Świder 2009

Later on, for the long time, we have worked together analyzing the  $Ez$  observation data from the Polish middle latitude Świder and polar latitude Hornsund stations and discussing the possible physical interpretation of the discovered facts. It was very nice and fruitful time of our cooperation. Every time, his brilliant ideas helped us to reveal and explain the new experimental results.

Stanisław was the first in studying a role of the magnetospheric field aligned currents (FAC) in the atmospheric electric field variations. It was found that these currents play the controlling role in the  $Ez$  feature measured at the Earth's surface. For example, it was established that at polar latitudes, the  $Ez$  deviations were positive under the downward FAC and negative under the upward FAC.

For the first time, it was found that during the main phase of a strong magnetic storm, a strong daytime negative  $Ez$  deviations could be observed at middle latitudes simultaneously with the magnetic substorms measured at the night side of the auroral zone. As well, it was found the strong mid-latitude  $Ez$  depletion in response to the magnetically quiet-time  $Ez$  data during the days of cosmic ray Forbush decrease development. We presented our results at different international meetings and published several common papers. One of them has been published last year.

Stanisław is not only outstanding scientist, but also a versatile, interesting person who, for example, introduced me to many important details of the Polish history which were unknown for me. I am lucky to have not only a colleague, but such a good friend!

Natalia Kleimenova  
*Institute of Physics of the Earth*  
*Russian Academy of Sciences*

\* \* \*



Stanisław Michnowski i Roman Teisseyre during the International Geophysical Year

I met Stanisław Michnowski before the International Geophysical Year 1957-58 when I organized scientific expedition to Vietnam. He was responsible for organization of atmospheric electricity branch of the expedition. Shortly we became friends.

Stanisław Michnowski is a pioneer of modern research in some branches of atmospheric electricity and lightning investigations. He organized the atmospheric electricity laboratory of our Institute over 70 years ago, and was its many-year head. He is well-known in the scientific world and highly appreciated by the international community of atmospheric electricity researchers. Therefore, it is a very good idea to commemorate his 100 birthday by reproducing some of his most influential papers, quoted up to now.

I would like to especially point out a number of contributions related to his research in the frame of our scientific expedition to Vietnam during the International Geophysical Year 1957-



58; Stanisław Michnowski has organized continuous observations and recordings of the electric field at the stations Cha-Pa and Phu-Lien established there in a frame of cooperative Polish-Vietnamese geophysical program. He has continued this scientific cooperation with the Vietnamese researchers during almost 50 years!

Last but not least, I have to point out his important personal contribution to the resistance against the Nazis occupation of Poland during the II World War, documented in numerous historical publications.

In spite of hundred years of age, Stanisław Michnowski is a very active and hard working scientist, full of plans and ideas for future research, so we are looking forward to his next contributions.

Roman Teisseyre  
*Institute of Geophysics*  
*Polish Academy of Sciences*

### **Dear Prof. Michnowski**

Piotr Baranski tells me that you will soon celebrate your 100th birthday. On this occasion, I would like you to know that you and your research work have been major sources of inspiration to me here at the University of Arizona. I have followed your research since the 1960s when you examined the effects of point discharge currents on the earth's electric field and global electric circuit, and also your analyses of the recovery of the surface electric field following lightning discharges. We found this work to be particularly valuable for our analyses of thunderstorm electric fields and lightning at the NASA Kennedy Space Center. Later you examined many topics that were clearly ahead of their time such as the diurnal and seasonal variations in the total air-earth current, particularly at northern latitudes; the electrical conductivity of the atmosphere as a function of height, aerosol content, etc.; and most recently the effects of geomagnetic substorms on the atmospheric electric field at polar latitudes.

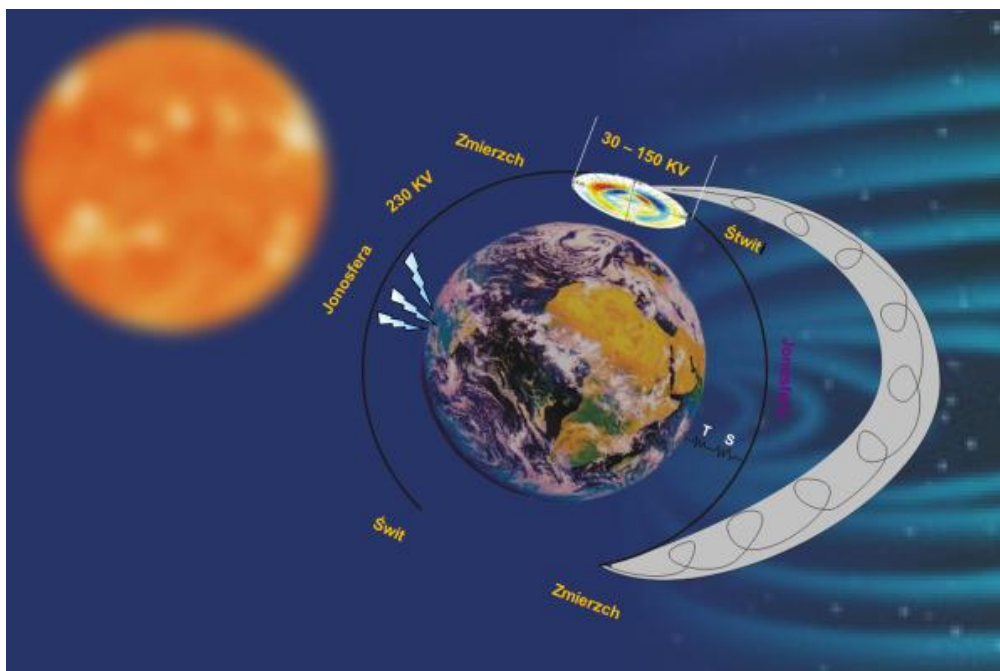
You were also a valuable source of support while I was President of the International Commission on Atmospheric Electricity, and you and your collaborators have clearly made lasting contributions to this field. In closing, I would like to note that much of your early work was accomplished in spite of the difficult circumstances caused by the chaos of war, external occupation, and political upheaval.

Please accept my very best wishes on the occasion of your 100th birthday and my warm personal regards.

E. Philip Krider,  
*Department of Atmospheric Sciences*  
*Institute of Atmospheric Physics*  
*The University of Arizona*

### **Przyjemne atmosferyczne pole elektryczne w obszarach polarnych a wiatr słoneczny – frapujące pytanie Dra Stanisława Michnowskiego**

Poznałem Dra Stanisława Michnowskiego kiedy rozpocząłem swoją pracę w ówczesnym Zakładzie Geofizyki PAN – w październiku 1969 r. Ze względu na kłopoty lokalowe wyznaczono mi mój „desk” w bibliotece, w której to spędzałem cały dzień regulaminowej pracy.



Globalny układ prądowy

Bardzo częstym gościem był tam człowiek w kasku a raczej z kaskiem-hełmem ochronnym. To był Stasio Michnowski, który w mojej pamięci krążył pomiędzy dachem Instytutu, gdzie była ulokowana aparatura obserwująca wyładowania atmosferyczne (stąd ten kask ochronny) a biblioteką, gdzie weryfikował swoje obserwacje na bieżąco. Cały czas podczas mojej pracy w Instytucie Geofizyki mogłem przekonać się, że to nie tylko osoba kierująca Pracownią Elektryczności Atmosfery IGF PAN, ale mentor tych badań w Polsce. Potrafiący z ogromnym zaangażowaniem przekonywać do swoich wizji. Czego można mu pozazdrościć to szerokiego kąta widzenia problemów związanych z badanymi zjawiskami. W tych dawnych latach, Staś z Zespołem skupiał się na badaniach i pomiarach składowej przyziemnej pola elektrycznego atmosfery Ziemi. Rozbudowywał pomiarowe sieci obserwacyjne, których punktem centralnym było Obserwatorium w Świdrze. Potrafił zaprosić do obserwacji innych parametrów fizycznych atmosfery instytuty badawcze z Warszawy. Stworzył w ten sposób komplementarne stanowisko pomiarów i interpretacji przyziemnego pola elektrycznego atmosfery.

Kiedy Instytut Geofizyki zaczął organizować bazę na Spitzbergenie w ramach polskiego Programu Polarne go zaoferowano tam również pomiary parametrów elektryczności atmosfery, ale też i jonosfery, które zorganizowało Centrum Badań Kosmicznych, mojego nowego miejsca pracy. Tutaj też nad problemami geofizyki polarnej nastąpiło moje spotkanie badawcze z elektrycznością atmosfery i współdziałanie z drem Stanisławem Michnowskim.

Położenie stacji na Horsundzie, gdzie magnetyczne południe wypada o 09 UT, jest doskonałe i zmienia się w odniesieniu do projekcji linii sił pola geomagnetycznego Ziemi. Stacja może znajdować się pod obszarem owalu zorzowego lub pod otwartymi liniami pola z obszaru czapy polarnej. Jest to więc doskonały punkt obserwacji. Dla Stasia było naturalne, że w tym obszarze przyziemne pole elektryczne atmosfery musi sprzęgać się z elektrycznym polem magnetosferycznym – tym generowanym w oddziaływaniu wiatru słonecznego na granicy magnetosfery. Tak to myśli Stanisława Michnowskiego pobiegły w kosmos.

Na Horsundzie zorganizowano komplet pomiarów monitorujących:

- przyziemne pole elektryczne przez radioaktywne kolektor i młynek pola;
- gęstość wertykalnego prądu atmosfera-ziemia przez długa linie antenową;

- parametry meteorologiczne;
- zestaw pomiarów helio-geofizycznych: trzy składowe pola geomagnetycznego, obserwacje zorzowe, absorbcję jonosferyczną riometrami, TEC-GPS oraz sondowania jonosferyczne.

Horsund stworzył tym samym operacyjną platformę do monitoringu wielu aspektów relacji fizycznych Słońce-Ziemia i był to w dużej mierze wynik inicjatyw dra Stanisława Michnowskiego.

Powszechnie wiadomo, że zmiany w oddziaływaniu wiatru słonecznego na granicy ziemskiej magnetosfery mapują się wzdłuż linii sił pola magnetycznego w dół do jonosfery, która poprzez swoje wysokie przewodnictwo elektryczne zamyka ten obwód. Z drugiej strony poziome wielkoskalowe elektryczne pola w jonosferze mapują się do powierzchni ziemi, gdyż ziemska atmosfera doznaje zmian przewodnictwa elektrycznego poprzez bombardowanie strumieniami kosmicznego promieniowania galaktycznego. W obszarze polarnym te zmiany przewodnictwa dodatkowo wzmocniają strumienie wysokoenergetycznych cząstek z magnetosfery. Tak więc istnieją elektromagnetyczne uwarunkowania aby przyziemne wertykalne pole atmosferyczne było czułe na zmiany pola jonosferyczno-magnetosferycznego, tzw. pola konwekcji magnetosferycznej.

Jednakże wciąż odpowiedź atmosferycznego pola przyziemnego jak i prądu wertykalnego na zmiany w polu konwekcji nie jest w pełni zrozumiała. Stacja Horsund i jej pomiary przybliżają poznanie fizycznej natury tych relacji pomimo różnorodnej skali czasowo-przestrzennej występujących zakłóceń.

Wybrane przypadki dla dobrze określonych warunków pięknej pogody przez S. Michnowskiego i współpracowników (Michnowski *et al.* 2007) pokazały, że dla silnych zmian zarówno pole przyziemne jak i prąd wertykalny sprzęgają się ze zmianami magnetosferycznymi.

Jakkolwiek wciąż ilościowa statystyka tych zjawisk jest konieczna, to idee nakreślone przez dra Stanisława Michnowskiego w jego publikacjach w *Journal of Geophysical Research* brukują drogę tych badań.

Zbigniew Kłos  
Centrum Badań Kosmicznych  
Polska Akademia Nauk

#### References

- Michnowski, S., M. Kubicki, N. Klejmenova, N. Nikoforova, O. Kozyreva, and S. Israelsson (2007), The polar ground level electric field and current variations in relation to solar wind variations. **In:** *Proc. 13 Int. Conf. on Atmospheric Electricity, August 2007, Beijing, China.*

### **Działalność Stanisława Michnowskiego w Polskim Towarzystwie Geofizycznym**

Sekcja Fizyki Litosfery i Przestrzeni Okołoziemskiej (FLiPO) powstała w 1980 r. – początkowo pod nazwą Sekcja Fizyki Wnętrza Ziemi i Przestrzeni Okołoziemskiej – na wniosek grupy geofizyków zajmujących się badaniami naukowymi w rozmaitych dyscyplinach fizyki wnętrza Ziemi oraz fizyki przestrzeni międzyplanetarnej, a które nie były (praktycznie biorąc) reprezentowane w ówczesnym przekroju zainteresowań Polskiego Towarzystwa Geofizycznego (PTGF). Z początkiem roku 1981 sekcja FLiPO została afiliowana przy Oddziale Warszawskim PTGF. Przewodniczącym Sekcji został Stanisław Michnowski, zresztą jej promotor i główny organizator. Od samego początku w działalności Sekcji FLiPO były dwa główne pola zainteresowań: elektrodynamika dolnej i górnej atmosfery w strefach polarnych

(z uwzględnieniem szczególnej roli Polskiej Stacji Polarnej – PSP Hornsund na Spitsbergenie) oraz historia geofizyki w Polsce w XIX i XX wieku. Metody pracy w Sekcji stopniowo przybierały urozmaicone formy, a więc: akcja odczytów z wybranych zagadnień geofizyki o charakterze interdyscyplinarnym przy współdziałaniu pracowników z różnych ośrodków naukowych (Instytut Geofizyki PAN, Instytut Geofizyki UW, Centrum Badań Kosmicznych PAN, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Państwowy Instytut Geologiczny, Muzeum Ziemi PAN i in.); specjalistyczne konwersatoria dotyczące problemów fizyki wnętrza Ziemi i fizyki przestrzeni okołoziemskiej z zakresu bieżących prac naukowych prowadzonych przez członków Sekcji; organizowanie wycieczek naukowych (np. do Obserwatorium Astronomicznego i Radioastronomicznego Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, Obserwatorium Geofizycznego im. St. Kalinowskiego w Świdrze); gromadzenie i opracowywanie materiałów związanych z rozwojem różnych dyscyplin geofizyki w Polsce oraz opieka nad nauką spuścizną polskich geofizyków; publikowanie artykułów w kwartalniku *Przegląd Geofizyczny* oraz wymiana prac własnych z zagranicznymi ośrodkami naukowymi.

W trakcie kadencji St. Michnowskiego jako przewodniczącego Sekcji FLiPO, 1981-1999, zorganizowano kilkanaście odczytów z udziałem autorów krajowych i zagranicznych (ze Stanów Zjednoczonych, Szwecji, Rosji), reprezentujących różne placówki naukowo-badawcze związane z szeroko pojętą geofizyką. Tematyka wystąpień była urozmaicona, ale z reguły związana z aktualnymi osiągnięciami i trendami rozwoju w danej dyscyplinie geofizyki ziemskiej czy geofizyki planetarnej (np. geodynamika, sejsmologia i sejsmika, planetologia, elektromagnetyzm dolnej i górnej atmosfery, elektrodynamika jonosfery, fizyka plazmy magnetosferycznej, relacje Słońce–Ziemia). Specjalistycznych roboczych konwersatoriów odbyło się około setki. Dotyczyły np. teorii pól wektorowych, oddziaływań Słońce–Ziemia, badań rozkładu prądów elektrycznych w dolnej atmosferze strefy polarnej, elektromagnetycznych oddziaływań magnetosfera–jonosfera w rejonach polarnych, pól elektromagnetycznych w dolnej atmosferze w PSP Hornsund, fizyki wyładowań elektrycznych w dolnej atmosferze, termodynamicznych i elektronowo-optycznych własności minerałów płaszcza Ziemi, sejsmiczno-termicznego modelowania kontynentalnej litosfery, konstrukcji aparatury pomiarowej (np. spektrometr ruchliwości jonów w dolnej atmosferze). Sekcja FLiPO aktywnie uczestniczyła w roboczym spotkaniu dotyczącym geodynamicznych badań w Obserwatorium Astrogeodezyjnym Politechniki Warszawskiej (Józefosław) powiązanych z programem „International Service for Geodynamics” oraz projektu geodynamicznych badań CERGOP (Central European Geodynamic Project). Wzięła również czynny udział w organizowaniu przez Instytut Geofizyki PAN i PTGF (we współpracy z Międzynarodową Komisją Elektryczności Atmosferycznej) międzynarodowej Konferencji „Global Atmospheric Electrical Measurements”. Wraz z Instytutem Geofizyki PAN i Centrum Badań Kosmicznych PAN Sekcja FLiPO zorganizowała w Warszawie w 1994 r. seminarium pod nazwą „Polska Stacja Polarna Hornsund w badaniach dotyczących oddziaływań Słońce–Ziemia”. Zainteresowanie historią badań geofizycznych w Polsce dotyczyło, w początkowym okresie pracy Sekcji, gromadzenia różnych materiałów (publikacje, maszynopisy, listy, fotografie, odręczne notatki, dokumenty urzędowe) związanych z działalnością wybitnych polskich geofizyków, jak np. Maurycy Pius Rudzki (1862-1916), Henryk Arctowski (1871-1958), Marian Smoluchowski (1872-1917), Antoni Bolesław Dobrowolski (1872-1954), Stanisław Kalinowski (1873-1946), Henryk Orkisz (1903-1995), Edward Stenz (1897-1956), Tadeusz Olczak (1907-1983). W 1987 r. Sekcja FLiPO zorganizowała w gmachu Muzeum Ziemi PAN w Warszawie, seminarium z okazji 125 rocznicy urodzin Maurycego P. Rudzkiego. Zaowocowało ono współpracą z Komitetem Geofizyki PAN w przygotowaniu obchodów setnej rocznicy powołania na Uniwersytecie Jagiellońskim w Krakowie, pierwszej w świecie katedry geofizyki (pod nazwą: Katedra Geofi-

zyki Matematycznej i Meteorologii). Uroczysta sesja naukowa w UJ miała miejsce 20 listopada 1996 r.

W grudniu 1999 r. Sekcja FLiPO\FWZiPO przekształciła się w samodzielny, ogólnopolski Oddział Fizyki Wnętrza Ziemi i Przestrzeni Okołoziemskiej Polskiego Towarzystwa Geofizycznego (z siedzibą w Warszawie). Wybrano nowy Zarząd Oddziału, a Stanisław Michnowski został jego Honorowym Prezesem. Za zasługi w efektywnej działalności na niwie Towarzystwa Geofizycznego, Stanisław Michnowski został uhonorowany Złotą Odznaką PTGF (1997 r.), a w roku 2009 Walne Zgromadzenie PTGF wybrało Go Członkiem Honorowym Polskiego Towarzystwa Geofizycznego.

Sławomir Maj  
*Instytut Geofizyki  
Polska Akademia Nauk*

### **Tak to się zaczęło...**

Był to rok 1976, jesienne popołudnie. Szykowałem się do wyjścia do domu, gdy do drzwi mojego pokoju w Instytucie Podstaw Elektroniki usłyszałem pukanie i pojawił się nieznajomy z miłym uśmiechem na twarzy. Zapytał, czy możemy chwilę porozmawiać. Rozmowa stała się bardzo interesująca, więc chwila wydłużyła się znacznie. Nigdy przedtem nie słyszałem o tym co usłyszałem, a było to bardzo interesujące, zwłaszcza że propozycja dotyczyła udziału w badaniach otaczającego nas środowiska przyrodniczego – elektrycznych właściwości atmosfery. Temat był mi całkowicie nieznany ale tak zachęcający, że połknąłem „haczyk” i zgodziłem się współpracować, zwłaszcza dlatego, że w perspektywie miałem konstruować aparaturę pomiarową, a to było moim „hobby”.

Nieznajomy stał się moim bardzo dobrym Znajomym, obecnie Jubilatem obchodzącym dziś setną rocznicę urodzin. Po latach współpracy chcę powiedzieć, że jest nie tylko przyjacielem lecz „GURU” – przewodnikiem i inspiratorem moich dokonań.

Ale kontynuując, nasze rozmowy w czasie których znowu poczułem się studentem, trwały czasem tak długo aż zrozumiałem lub tak mi się wydawało. Spotkania były w siedzibie Instytutu Geofizyki przy ulicy Pasteura lub w „moim” Instytucie, czasem w mieszkaniu „Stasia”. Użyłem tu tego bardzo sympatycznego imienia Jubilata, bo dopiero niedawno usłyszałem, że tak o Nim mówią w rodzimym IGFie. Ale do rzeczy, po blisko roku współpracy powstał pierwszy przyrząd do pomiaru natężenia pola elektrycznego w powietrzu. Był to dipol typu „long wire” unoszony pod balonem. Próba odbyła się w Instytucie Meteorologii w Legionowie. Wszystko działało do chwili, gdy włączono radar w celu lokalizacji sondy. To ją „zabiło”.

W 1977 roku usłyszałem bardzo intrygującą nowinę – możemy pojechać do USA by uczestniczyć w międzynarodowym „workshopie”, ale aby to było możliwe to musimy zbudować przyrządy pomiarowe, ponieważ celem tego spotkania ma być porównanie przyrządów i metod pomiaru tych samych parametrów elektrycznych atmosfery wykonywanych różnymi przyrządami używanymi przez badaczy.

To była rewelacyjna nowina, jak możliwym może się stać wyjazd „na dziki Zachód” (jak wtedy się mówiło) z „socjalistycznej” strefy. Wtedy dowiedziałem się, jak wielkim autorytetem cieszył się Pan Stanisław (tak się do Niego zwracałem) w światowym kręgu naukowców. To zaproszenie do udziału w badaniach było tego potwierdzeniem.

Z wielkim entuzjazmem przystąpiliśmy do budowy sondy typu „long wire” lecz zmodyfikowanej, umożliwiającej przemienny pomiar natężenia pola elektrycznego oraz prądu piono-



W laboratorium w Laramie – Stanisław Michnowski(z prawej) i autor (z lewej)

wego. Entuzjazm był tak duży, że przystąpiliśmy do budowy drugiego przyrządu, co było dla mnie tak trudne do realizacji, że sprostanie wymaganiom wydawało się niemożliwe.

Był to unikalny przyrząd do badania spektrum ruchliwości jonów w atmosferze. Trudności techniczne były (przy uwzględnieniu ówczesnego dostępnego stanu techniki i potrzeby pomiaru prądu o wartości mniejszej od 1 pA w warunkach zmian temperatury w czasie lotu pod balonem aż do  $-40$  stopni) prawie nie do przezwyciężenia.

Jednak to właśnie entuzjazm i zaufanie jakie miałem do mojego „guru” umożliwiło zrobienie przyrządu w wymaganym terminie. Paszporty czekały, lot zarezerwowany, tylko w głębi duszy pozostawała obawa, czy aby nas wypuszczą z taką „rurą” długości około 1 m i wyglądającą raczej na coś z arsenału. Szczęśliwie przeszliśmy kontrolę i w drogę.

Wyjazd był „na zaproszenie” University of Wyoming w Laramie. Aby tam dotrzeć, w końcowej fazie lotu nad periami lądowaliśmy często w małych miejscowościach. Po kolejnym starcie stewardessa, po odebraniu informacji od pilota, wstała i powiedziała do pasażerów – pilot bardzo przeprasza pasażerów, ale musimy wrócić na lotnisko bo zapomniał zatankować. Jednak po chwili dodała – bo na następnym lotnisku nie można tankować, ponieważ pompa jest zepsuta. Zapewne obaj to pamiętamy.

W Laramie uczestniczyli znani mi dotąd z literatury badacze z wielu krajów. Zaskoczeni byliśmy tym, że niedługo po przyjeździe dostaliśmy klucze do laboratorium i do magazynu, aby móc pracować kiedy chcemy. Tak potraktowano nas mimo, że przyjechaliśmy z „socjalistycznego” kraju. Jestem przekonany, że to wyłącznie autorytet „Stasia” zadziałał.

W Laramie zostaliśmy o kilka dni dłużej po oficjalnym zakończeniu i dzięki organizatorom, prof. Hofmannowi i prof. Rosenowi, wykonano loty balonu z naszym spektrometrem ruchliwości jonów. Przyrząd działał. Dalsze losy spektrometru przerwały wydarzenia historyczne w kraju w rezultacie których odłożone „do lamusa” badania kalibracyjne nie zostały przeze mnie dokończone.

Kolejne lata współpracy również z udziałem wychowanków „Stasia” w IGFie zaowocowały nowymi przyrządami: różnicowy miernik pola elektrycznego, system monitorowania

wyładowań doziemnych, miernik pola elektrycznego typu „wirujący dipol”, miernik prądu powietrze-ziemia.

Doświadczenia z wieloletniej współpracy z kolegami z IGF były dla mnie pomocne przy innych konstrukcjach przyrządów pomiarowych. Wszystko zaczęło się dawno temu i trwa do dziś. Nie byłoby tych „przygód” naukowych bez ducha i inspiracji naszego „Stasia”.

Sto lat – to za mało. Życzymy wszyscy więcej, dołączam się do tych życzeń.

Jerzy Berliński

*Instytut Podstaw Elektroniki – obecnie Instytut Systemów Elektronicznych  
Politechnika Warszawska*

### **Na Jubileusz 100-lecia Doc. dra hab. Stanisława Michnowskiego**

Jubileusz ten ma szczególną rangę, zbiega się dokładnie z niepodległościowym Jubileuszem naszej Ojczyzny i dotyczy okresów wielkich jej zagrożeń, wymagających stanowczych reakcji patriotycznych, w których swoje bojowe i naukowe talenty z żarliwością rozwijał Jubilat. Urodził się On w Skarżysku Kamiennej, w dniu 10 listopada 1918 r., a więc w przeddzień odzyskania niepodległości, którą cieszył się przez niemal 21 lat w postawie „Bóg, Honor i Ojczyzna”. Już w wieku młodzieńczym związał się z Sodalacją Mariańską i z Legią Akademicką, a w 1937 r. podjął studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej i bardzo aktywnie rozwijał działalność akademicką.

Niestety w 1939 r. Jego studia zostały przerwane i nadszedł okres trudnych zmagania z najeźdźcą niemieckim i sowieckim. Brał w nich udział kolejno w Skarżysku Kamiennej, Puławach, Lublinie, Zamościu, Włodzimierzu, Łucku, Hrubieszowie, Rawie Ruskiej i – do chwili kapitulacji – w Horonowie, a po niej w Leżajsku, Sandomierzu, Nowej Słupi i w Lasach Świętokrzyskich. Powrót do Skarżyska Kamiennej był początkiem Jego, wspieranej przez miejscowych Franciszkanów, działalności konspiracyjnej. Przysięgę organizacyjną złożył na ręce swojego kolegi szkolnego i uczelnianego, późniejszego wspaiałego profesora P.W., Stefana Bernasa, który w listopadzie 1939 r. powierzył Mu zadanie łącznika z Konspiracją Warszawską.

W 1940 r. nasiliły się represje i rosły straty konspiracyjne, wymagające większej czujności. Pewną nadzieję na zmianę przyniosła w 1941 r. wojna niemiecko-bolszewicka, powodując nasilenie aktywności konspiracyjnej. Jubilat działał wówczas w ramach Polski Niepodległej (PN), ukończył kurs podchorążych w Szkole AK i od 1942 r. pozostawał w dyspozycji jej komendanta, realizując zlecane przez niego zadania specjalne, np. zorganizowanie konspiracyjnej siatki kontrwywiadowczej Kedywu AK, odbieranie rozkazów i przesyłanie systematycznych meldunków do przełożonych.

W 1944 r. cudem wydostał się z tzw. kotła, musiał się ukrywać, opuścić Skarżysko Kamienną i dalszą działalność rozwijać w różnych miejscach rejonu Warszawy. Nieco dłużej zatrzymał się w Ursusie u wspomnianego już kolegi S. Bernasa, stając się jego podkomendnym w zgrupowaniu AK „Kordian”, gotowym do udziału w Powstaniu Warszawskim. Udział ten jednak został udaremiony w Lesie Sękocińskim przez dywizję pancerną „Hermann Goering”. Resztki rozproszonego zgrupowania powróciły do Ursusa, by tam do grudnia 1944 r. przeżywać tragedie Powstania, a następnie – z uwagi na zbliżający się front sowiecki – powrócić do Skarżyska Kamiennej. Tu, zachowując nadal ostrożność, trzeba było pogodzić się ze skrzętnie ukrywaną, ale równie groźną nową okupacją kraju, w którym NKWD wraz z UB dokonywało licznych aresztowań, szyłek, tortur i morderstw.



Po 6 latach wojennych zmaganiach wznowił On studia, choć trudności i zagrożenia trwały nadal. Wszelkie niepoprawne politycznie działania, a nawet ujawniane poglądy, kończyły się represjami, aresztowaniem, torturowaniem, a nawet utratą życia. Kontynuując studia na Wydziale Elektrycznym P.W., podjął pracę asystentką w Katedrze Matematyki i nadal współdziałał z Sodalacją Mariańską, z wydawnictwem *Tygodnika Warszawskiego* oraz z Redakcją czasopisma naukowo-technicznego *Politechnika*, w której pełnił też funkcję Naczelnego Redaktora. Inwigilacje i represje z powodu tych – mających rzekomo „niewłaściwy” wpływ na środowisko akademickie – działań, zmusiły Go w 1949 r. do ich zaprzestania. Stan stresu jednak pozostał, ale na szczęście nie przeszkodził w ukończeniu podjętej – pod kierunkiem Prof. J.L. Jakubowskiego – rozprawy na temat zagrożeń piorunowych i w uzyskaniu w 1950 r. dyplomu magisterskiego. Prowadzone śledztwo, groźba aresztowania i brak zatrudnienia utrzymywały Go nadal w bardzo trudnej sytuacji.

Odmowa przystąpienia do PZPR uniemożliwiła Mu zatrudnienie w Państwowym Instytucie Elektrotechniki. Udało się jedynie podjąć dodatkowe studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego i korzystać z dorywczych zatrudnień w Głównym Instytucie Fizyki Technicznej, w Zakładzie Wysokich Napięć P.W., w Obserwatorium Geofizycznym w Świdrze i w Zakładzie Geofizyki PAN. Dopiero w 1954 r., po przekształceniu tego Zakładu w Instytut Geofizyki PAN, uzyskał On tam stałe zatrudnienie, trwające do końca Jego aktywności zawodowej, którą poświęcił fizyce atmosfery z ukierunkowaniem na zjawiska piorunowe.

Na wspólny odcinek Jego drogi naukowej trafiłem w połowie lat sześćdziesiątych z racji mojego zaangażowania w badania zjawisk piorunowych również pod kierunkiem Prof. J.L. Jakubowskiego. Początkiem był nasz wspólny udział w rozpoznawaniu problemów naukowych doktoranta wietnamskiego Nguyen Manh Duca. W tym czasie zaistniała też możliwość dokonywania rejestracji wyładowań piorunowych w Polsce za pomocą liczników CIGRE, uzyskanych w Szwecji przez Prof. J.L. Jakubowskiego. Stało się to nie tylko zachętą do ich instalowania, ale również do rozwiązywania trudnych i bardzo ważnych problemów ich czułości, zasięgu działania i selektywnej rejestracji wyładowań doziemnych. Działo się to zarówno w nowo otwartym w 1965 r. Centralnym Obserwatorium Geofizycznym w Belsku, jak też i w ramach dotychczasowych badań elektryczności atmosfery w Obserwatorium Geofizycznym w Świdrze. Dzięki dużej fachowości Jubilata udało się wkrótce dokonać kalibracji liczników i selektywnie rejestrować wyładowania doziemne, a w efekcie uzyskać wiarygodność dokonywanych rejestracji i zaangażować się kolejno w rozwój nowych systemów lokalizacji wyładowań piorunowych (LLS), takich jak: IMPACT, SAFIR, PERUN, czy LINET. Był to jednak tylko drobny wycinek Jego badań z zakresu elektryczności atmosfery. Główną uwagę skupiał On na problemach dotyczących elektromagnetycznego pola atmosfery, a w szczególności na występujących w nim zmianach i powodowanych nimi zakłóceniach środowiskowych w powiązaniu z przebiegami prądów piorunowych. Rezultatem było stopniowe uściślanie danych, charakteryzujących zjawiska towarzyszące wyładowaniom piorunowym i ich rozpowszechnianie w intensywnej współpracy z przedstawicielami krajowych i zagranicznych ośrodków naukowych.

Wielce ceniony był Jego udział w licznych seminariach i sympozjach naukowych, a zwłaszcza w pracach Polskiego Komitetu Ochrony Odgromowej (PKOO). Niemal od chwili zaistnienia w 1958 r. tego Komitetu był On jednym z głównych jego filarów, a dla mnie busolą naukową w jego prowadzeniu przez okres 40 lat.

Wyraźnie przyczynił się On do wzbogacenia naszej wiedzy o wyładowaniach piorunowych i o sposobach zwalczania powodowanych przez nie zagrożeń oraz do uściślenia niezbędnych do tego danych, a przez to do rozwoju całej dziedziny, jaką jest ochrona odgromowa i przeciwprzepięciowa.

Składam tu gorące podziękowania, Drogemu Jubilatowi, za wszelkie dobro, jakie z dużą determinacją wyświadczył naszej Ojczyźnie, naszej profesjonalnej społeczności i całej Nauce. Gratuluję wspaniałego Jubileuszu i życzę wszystkiego, co najlepsze, na przyszłe lata.

Zdobysław Flisowski  
*Politechnika Warszawska*

## 100-lat Pana Stanisława

Zaczynałem od burzy i gradu (magisterka 1969) a kończę z Piotrem Barańskim na tornadach (Parfiniewicz and Barański 2014, Parfiniewicz 2017). Kiedy w trudnych latach 80-tych musiałem w IMGW odejść od synoptyki i prognoz numerycznych a przeszedłem formalnie do zanieczyszczeń (do Karola Budzyńskiego i Krzysia Aberta), można powiedzieć zatrzymali mnie w zawodzie Krzysztof Haman i właśnie Stanisław Michnowski. Tego się nie zapomina.

Pan Stanisław wykorzystał, można powiedzieć, moje zainteresowania fenomenologiczne (synoptyka) i fascynacje numeryką do interpretacji wyładowań atmosferycznych (Michnowski *et al.* 1984). To chyba mój charakter (wybuchowy) spowodował, że błyskawice i PERU-Ny wyznaczyły moją trajektorię naukową, chociaż początkowo nie traktowałem tego serio. A jednak, Pan Stanisław dał mi kolejne zadanie (Michnowski *et al.* 1987) a następnie związał z Piotrem. W 2008 r. już przyszła pora na tornada. Pierwsze seminarium na ten świeży wówczas temat w Polsce wygłosiłem, za namową Mistrza, właśnie w Instytucie Geofizyki: „Tornado w rejonie Częstochowy – 20 lipca 2007” (Parfiniewicz 2009). Ginęli ludzie, dewastowane były domy – zależało mi by do publicznej świadomości dotarło, że są to właśnie groźnie brzmiące tornada, a nie eufemistyczne trąby powietrzne. Teraz, kiedy Łowcy Tornad upowszechnili ten termin i jest on używany naprzemiennie, nie ma to już znaczenia. Wracając do seminarium. Tam został ujawniony dość osobisty wątek mojego “uzależnienia” od Pana Stanisława. Związany jest z okupacją (niemiecką). Urodziłem się bowiem i wychowałem na Żoliborzu, na ul. Krasińskiego 16, w dawnej kwaterze dowódczej Żywiciela (rzut oka na kościół Św. Stanisława, ostoję ks. Popiełuszki) i tradycje powstańcze są wpisane w mój życiorys. Kiedy spytałem Pana Stanisława dlaczego chce ze mną współpracować, odpowiedział mi, że jeszcze z czasów KEDYWu, została mu umiejętność oceny ludzi. I to była moja najpiękniejsza recenzja.

Podsumowując, jeżeli moje prace i nasze wspólne prace z Piotrem, przyczyniły się do precyzyjniejszego ostrzegania przed gwałtownymi zjawiskami konwekcyjnymi, to za wszystkim stoi przywództwo duchowe Pana Stanisława.

Jan Parfiniewicz  
*Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej*

## References

- Michnowski, S. *et al.* (1984), Distribution of cloud to ground lightning discharges and their polarity during thunderstorms observed in Sveden on May 18th,1982. **In: VII Int. Conf. on Atmospheric Electricity, Albany, USA.**
- Michnowski, S., S. Israelsson, J. Parfiniewicz, M.A. Enaytollah, and E. Pišler (1987), A case of thunderstorm system development inferred from lightning distribution, *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.* **D-26**, 198, 3–57.
- Parfiniewicz, J. (2009), Tornado w rejonie Częstochowy – 20 lipca 2007. Cz. I, II, *Prz. Geof.* **LIV**, 3-4, 147–182.

- Parfiniewicz, J. (2017), Trochę o burzach + sprawy bieżące. Cel: zmniejszenie niepewności związanej z prognozą aktywności burzowej. Dzień Meteorologa, IMGW, 24 Marca 2017, Warszawa.
- Parfiniewicz, J., and P. Barański (2013), Thunderstorm potential prediction – thunderstorm quantification issue. **In:** *13th Ann. Meet. of the European Meteorological Society (EMS) and the 11th Europ. Conf. on Applications of Meteorology (ECAM), Reading, England, 10-15 September 2013*; <http://meetingorganizer.copernicus.org/ems2013/sessionprogramme>.
- Parfiniewicz, J., and P. Barański (2014), An explosive convection over Europe with 8-minute tornado incident in Poland on July 20, 2007, *Int. J. Environ. Eng. Natur. Resour.* **1**, 6, 262–276; <http://www.ethanpublishing.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=193&id=360>.
- Parfiniewicz, J., P. Barański, and W. Gajda (2009), Preliminary analysis of dynamic evolution and lightning activity associated with supercell event: case story of the severe storm with tornado and two heavy hail gushes in Poland on 20 July 2007, *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.* **D-73**, 412, 65–88.
- Parfiniewicz, J., P. Barański, and A. Jaczewski (2011), Concerning tornado prediction – a real case conclusions. **In:** *9th Int. SRNWP-Workshop on Nonhydrostatic Modelling, May 2011*, ISSN 1430-0281.

\* \* \*

Stanisław Michnowski to wielki uczony i patriota, który będzie obchodził swoją 100 rocznicę urodzin dzień przed obchodami 100-lecia odzyskania niepodległości przez Polskę. Koincydencja tych dwóch wydarzeń jest wprawdzie przypadkowa, ale jakże symboliczna, biorąc pod uwagę cały życiorys tego wielkiego człowieka. W trakcie mojej wieloletniej współpracy ze Stanisławem Michnowskim i jego współpracownikami z Instytutu Geofizyki PAN miałem okazję i zaszczyt prowadzić badania nad identyfikacją różnych faz wyładowań atmosferycznych na podstawie rejestrowanego wolno- i szybkozmiennego pola elektrycznego. Wynikiem tej współpracy, oprócz wspólnych publikacji, jest działająca w Rzeszowie stacja rejestracji wyładowań atmosferycznych. Prowadzone w Politechnice Rzeszowskiej badania dostarczają nowych wyników, które przykładowo w tym roku były prezentowane na konferencjach: 16th International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE2018) w Nara w Japonii oraz 34th International Conference on Lightning Protection w Rzeszowie. To dowód na to, że długoletnia i owocna praca badawcza Stanisława Michnowskiego w zakresie fizyki atmosfery jest nadal kontynuowana. Jego wielki wkład w rozwój nauki jest doceniany na całym świecie o czym mogłem się przekonać współpracując z w ramach konferencji ICAE oraz z pracownikami Uppsala University w Szwecji. Dlatego też należy podkreślić, że całe życie i praca Stanisława Michnowskiego mogą stanowić wzór do naśladowania dla kolejnych pokoleń młodych naukowców.

Grzegorz Masłowski  
*Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza*  
Rzeszów

\* \* \*

Stanisław Michnowski był moim kolegą ze studiów na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej; studia rozpoczął jeszcze przed wojną, w 1937 roku, ale zakończył je razem ze mną w 1950 roku. Miałem z Nim wiele owocnych kontaktów, zwłaszcza w okresie

dużo późniejszym, podczas kilkuletniej współpracy między Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej i Instytutem Geofizyki. Badania radioaktywności wykonywaliśmy na terenie Obserwatorium w Świdrze, w powiązaniu z prowadzonymi tam od dawna cennymi pomiarami elektryczności atmosferycznej i danymi meteorologicznymi. Zostały one opisane między innymi w tomie jubileuszowym wydanym z okazji dziewięćdziesiątych urodzin Stanisława Michnowskiego (Peńsko 2009).

Jerzy Peńsko  
*Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej*

#### References

Peńsko, J. (2009), Brief outline of the long history of collaboration between the Central Laboratory for Radiological Protection and the Atmospheric Electricity Laboratory of the Institute of Geophysics, *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.* **D-73**, 412, 15–21.

\* \* \*

I am most probably the oldest living collaborator of Stanisław Michnowski in the Atmospheric Electricity Laboratory of the Institute of Geophysics. My work began already before my graduation from Warsaw University, and Staś was then a man of 43. He hired me to a position of research assistant at the Institute of Geophysics, and this turned out to be a very fortunate decision for me, since I have been keeping my association with the Institute until now. I was overwhelmed by his great engagement, deep knowledge, and strong emotions toward what he was doing. And this first impression has not changed until now, and comes to my mind whenever I meet him.

We were working together on fair-weather electricity problems for some time. Our scientific collaboration ended rather soon, but the friendship has remained, in spite of many ideological differences. Staś is a man of very strong faith, but open to hear opposite views.

He has an amazing memory, remembering not only facts, but also all science he has learned. Therefore, he is able to continue doing research in spite of his eye problems. He has everything in his head. This also concerns his priceless recollections from the World War II period, when he was very active in resistance movement. He belongs to the decaying group of eye witnesses of those times.

Staś is a perfectionist. He has never presented his results without very deep analysis, carefully editing and “polishing” his publications. Quite often he preferred to postpone publication until everything was “perfect”. His Hundredth Birthday happened in the middle of his “refining” a recent publication. I am wishing him many years to come.

Anna Dziembowska  
*Institute of Geophysics  
Polish Academy of Sciences*

## Po latach

Stanisława Michnowskiego poznałem w Zakładzie Geofizyki PAN (wtedy tak się nazywał obecny Instytut Geofizyki PAN) na początku lat sześćdziesiątych, kiedy zaczynałem tam pracować. W roku 1964 okazało się, że po kilku latach funkcjonowania stacja geofizyczna założona w Wietnamie w 1957 roku w ramach Międzynarodowego Roku Geofizycznego wymagała renowacji. Przyrządy pracujące w klimacie tropikalnym należało poddać naprawom i kalibracji. W sierpniu 1964 roku z Instytutu Geofizyki PAN wyruszyła do Wietnamu czteroosobowa grupa. Uczestniczyłem w tej wyprawie, a moim zadaniem, między innymi, były prace związane z systemami pomiarowymi elektryczności atmosferycznej. Do tych działań przygotowywał mnie Stasio Michnowski. Pamiętam długie, bardzo cenne rozmowy, które dotyczyły również współpracy międzyludzkiej. W razie kłopotów miałem się szybko kontaktować z Nim telefonicznie. Niestety, ze względów technicznych i politycznych okazało się to praktycznie niemożliwe (w Wietnamie zanosilo się na wojnę). W obserwatoriach wietnamskich prace przebiegały w miarę poprawnie. Michnowski był dobrze zapamiętany przez notabli wietnamskich, oczywiście jako znakomity naukowiec, natomiast dla wysoko postawionych działaczy partyjnych problem stanowiła jego działalność religijna. Michnowski przemycił z Polski, pod pozorem przewożenia aparatury pomiarowej, obraz Matki Boskiej do kościoła w Cha-Pa oraz zorganizował tam mszę św. W czasie mojego pobytu w Wietnamie w rozmowie ze mną wysoki działacz partyjny wspominał, że gdy w związku z otwarciem obserwatorium jechali samochodem z Hanoi do Cha-Pa, Michnowski poprosił go o zabranie razem z nimi jeszcze jednego „towarzysza” wietnamskiego. Problem powstał kiedy okazało się, że „towarzysz” jest wietnamskim księdzem. Dla partyjnego notabla musiało to być szokiem, skoro wspominał o tym po latach. Z Michnowskim jestem w kontakcie naukowym i towarzyskim od początku mojej pracy w IGF; w ostatnich latach już raczej tylko towarzyskim.

Marek Górski  
*Instytut Geofizyki*  
*Polska Akademia Nauk*

\* \* \*

Gdy przed ponad pół wiekiem rozpoczynałam pracę w Instytucie, Stasio Michnowski już pracował. Był kierownikiem Pracowni Elektryczności Atmosferycznej. Elektryczność atmosfery niewiele miała wspólnego z moją dziedziną czyli sejsmologią, jednak Stasia zapamiętałam od początku, ponieważ był osobą zwracającą uwagę. Wszędzie było Go pełno, bo pełen był różnorodnych pomysłów i inicjatyw.

Z biegiem lat nasza znajomość się zacieśniała. W ostatnich latach, gdy choroba ograniczyła Stasia kontakty ze światem zewnętrznym, odwiedzałam Go w domu. Odwiedziny moje wiązały się, poza kontaktami towarzyskimi i koleżeńskimi, z opracowywanymi przez Stasia publikacjami. Wspominał przeżycia związane z II wojną światową, Powstaniem Warszawskim, w którym uczestniczył w Zgrupowaniu „Obroża”. Wspominał też lata wcześniejsze, które przypadły na okres odzyskania przez Polskę, po latach zniewolenia, niepodległości, a znane Mu były z opowiadań rodzinnych. Lata dzieciństwa i młodości spędził w Skarżysku Kamiennej. Opis jego dziejów przedstawił w książce: „Z dziejów Polski i Skarżyska Kamiennej (wspomnienia rodzinne relacje i refleksje)”. Obecnie, jak mi wiadomo, opracowuje część drugą Dziejów, dotyczącą lat 1939-2015. Obdarzony jest fenomenalną pamięcią. Ale pogłębiająca się choroba oczu nie pozwala Mu na szybkie postępy w pracy. Zmusiła Go do korzy-



Stanisław Michnowski w swoim mieszkaniu

stania z pomocy pana Janusza Kuraszkiewicza, któremu dyktuje to, co pragnie przenieść na papier, by nieznane, a często bolesne, fakty z historii Polski nie uległy zapomnieniu. Owocem tych zmagień, poza wspomnianą publikacją, były opracowania: „O Sodalicii Mariańskiej Akademików w Warszawie” i „Łukasz Ciepliński – wciąż za mało znany ostatni naczelny dowódca Polski Podziemnej” (z współautorką Moniką Koniecko).

Staszek Michnowski był i pozostał, człowiekiem aktywnym w różnych dziedzinach, nie tylko naukowych. Życzę Ci Staszku, byś chociaż w części zdążył zrealizować swoje zamierzenia.

Maria Wernik  
*Instytut Geofizyki  
Polska Akademia Nauk*



Stanisław Michnowski during the ceremony to commemorate his 90th birthday



Marx Brook visiting the Institute of Geophysics in the early 1970s. From the left: Małgorzata Degórska, Head of Ozone Laboratory; Stanisław Michnowski; Marx Brook; Jan Słomka, Director of the Central Geophysical Observatory at Belsk; and Anna Dziembowska



## Słowo od Jubilata

Pragnę gorąco podziękować moim kolegom i współpracownikom oraz wyrazić hołd tym, którzy odeszli. Do pracy w Zakładzie Geofizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie (taką nazwę nosił wtedy obecny Instytut Geofizyki) przyjął mnie prof. **Tadeusz Olczak** w roku 1954, powierzając mi stanowisko adiunkta i kierownika Pracowni Elektryczności Atmosfery, której kierownikiem byłem aż do przejścia na emeryturę. Wdzięczny jestem prof. **Stefanowi Manczarskiemu** za podjęcie się bycia promotorem mojej pracy doktorskiej. Szczególnie mocne podziękowania kieruję do prof. **Romana Teisseyre'a**, dyrektora naukowego, a potem naczelnego Instytutu, który interesował się moją pracą i stale udziela mi dużego wsparcia.

Spośród ówczesnych pracowników w pierwszym rzędzie pragnę wymienić **Stanisława Warzechę**, kierownika stacji elektryczności atmosfery w Obserwatorium Geofizycznym im. Stanisława Kalinowskiego w Świdrze, współtwórcę jej dużej rozbudowy. Duże uznanie i nasza wdzięczność należy mu się za prace badawcze na podstawie danych z obserwacji stacyjnych. Znane są jego prace o wpływie prób jądrowych i katastrofy jądrowej w Czarnobylu na elektryczność atmosfery w Świdrze. Wyniki obserwacji Stanisław Warzecha dokumentował przez długie lata w postaci roczników danych elektryczności atmosfery w Świdrze. Dane pomiarowe opracowywali wszyscy zatrudnieni w Pracowni Elektryczności Atmosfery, w tym **Józef Gadomski** i **Andrzej Kobendza**. Prace stacyjne kontynuuje obecny kierownik Obserwatorium w Świdrze **Marek Kubicki**, w rozszerzonym stale zakresie.

Szczególnie dużo zawdzięczam mojemu głównemu współpracownikowi w tematyce elektryczności burzowej i wyładowań atmosferycznych **Piotrowi Barańskiemu**, który osiągnął wysoki poziom eksperymentalnych badań zmian pola elektrycznego emitowanego przez wyładowania.

Dużo zawdzięczam **Annie Dziembowskiej**, która była aktywna w naszej pracowni, a następnie zajęła się sprawami wydawniczymi, oraz innym członkom Pracowni, którymi byli teoretyk **Andrzej Łosakiewicz**, zaangażowany też w badania eksperymentalne na Hornsundzie, oraz **Marek Chrobak**, który przez wiele lat z dużym oddaniem wykonywał prace techniczne i aparaturowe.

W roku 2009 do grupy dołączyła **Anna Odzimek**, która m.in. prowadzi ze mną badania elektryczności atmosferycznej w rejonie polarnym na podstawie pomiarów w Hornsundzie. Jej zainteresowania i zaangażowanie w badania nad atmosferycznym elektrycznym obwodem globalnym mogą znacznie rozszerzyć prowadzone dotychczas prace grupy elektryczności atmosfery.

Spośród licznych przedstawicieli innych, polskich i zagranicznych instytucji, bez których nasze osiągnięcia nie byłyby możliwe, pamięć i szczupłość miejsca pozwala mi na wymienienie tylko niektórych.

W okresie 1957-1958 pionierskie badania elektryczności atmosferycznej mogły być rozszerzone dzięki międzynarodowemu wsparciu i akcji Międzynarodowego Roku Geofizycznego. Dzięki temu mogłem zorganizować stację badawczą elektryczności atmosfery w miejscowości Cha-Pa w Wietnamie. Rozpoczęło to długoletnią współpracę z Instytutem Geofizyki Wietnamskiej Akademii Nauk. W ramach tej współpracy na długoletnim stażu przeby-

wał **Nguyen Manh Duc**. W kierowanej przeze mnie Pracowni obronił pracę doktorską i wysoce zawansował pracę habilitacyjną, która jest również cennym wkładem we współpracę polsko-wietnamską.

Dużym osiągnięciem w badaniach eksperymentalnych było zorganizowanie, wspólnie z moimi kolegami, stacji elektryczności atmosferycznej w Polskiej Stacji Polarnej w Hornsundzie.

Przy szczupłości etatów dla zatrudnionych w tym okresie w Pracowni osób, w opracowywaniu danych z Hornsundu konieczna była zewnętrzna pomoc. Udzieliła jej początkowo **Ninel Nikiforova** z Instytutu Fizyki Ziemi z Moskwy, a następnie **Natalia Kleimenova** i **Olga Kozyreva** z tegoż Instytutu. Współpraca ta okazała się owocna. Wspólne opracowania doprowadziły m.in. wyżej wymienione Panie do odkrycia efektów oddziaływań burz magnetycznych na pole elektryczne przy powierzchni ziemi w średnich szerokościach geograficznych. W badania te, intensywnie kontynuowane obecnie, wnieśli swój wkład **Kajetan Zielkowski**, **Iwona Stanisławska** i **Zbigniew Kłos** z Centrum Badań Kosmicznych PAN; zaangażowany był również **Sven Israelsson** z Uniwersytetu w Uppsali. Ten ostatni, wraz z **Edvardem Pislerem** i **Alim Enayatollahem**, był również współpracownikiem w badaniach układów burzowych i rozkładu wyładowań atmosferycznych na terenie Szwecji; współpracowałem też z **Ernstem Åströmem** z Uppsali nad teorią młynka do pomiaru pola elektrycznego.

Spośród projektów realizowanych wspólnie z przedstawicielami instytucji krajowych, godny szczególnego podkreślenia jest udział pracowników Politechniki Warszawskiej, że wymienię tylko **Zdobysław Flisowski** z Wydziału Elektrycznego, **Jerzego Berlińskiego**, utalentowanego konstruktora uznanych na świecie przyrządów do pomiaru pola elektrycznego oraz **Jana Drzewieckiego**, który prowadził pomiary atmosferycznego prądu elektrycznego w Józefosławiu i Hornsundzie.

Z wdzięcznością wspominam również współpracę z Instytutem Meteorologii i Gospodarki Wodnej, głównie z **Kazimierzem Stefanickim**, który okazał mi wiele wsparcia, oraz **Jackiem Walczewskim** i **Janem Parfiniewiczem**.

Długoletnie niezwykle cenne badania radioaktywności powietrza mogliśmy prowadzić w Obserwatorium w Świdrze przy współpracy z Instytutem Badań Jądrowych oraz Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej, przy udziale **Jerzego Peński** i **Bogdana Gwiazdowski** z CLOR oraz **Bogny Myslek-Laurikainen** z IBJ.

Od dawna współpracuję również ze **Zbigniewem Kobylińskim** nad efektami szeroko rozumianej aktywności słonecznej na elektryczność dolnej atmosfery oraz elektrycznymi prekursorami trzęsień ziemi.

W końcu lat 1970-tych pionierskie w Polsce badania elektryczności statycznej i jonizacji powietrza w pomieszczeniach zamkniętych prowadzone były we współpracy z Centralnym Instytutem Ochrony Pracy w Warszawie (w czym uczestniczyli **Henryk Korniewicz** i **Zygmunt Grabarczyk**) i Politechniką Warszawską (**Andrzej Wajdewicz**).

Godna odnotowania jest również współpraca z Politechniką Rzeszowską, w szczególności z **Grzegorzem Masłowskim**, w ramach działalności Polskiego Komitetu Ochrony Odgromowej przy Stowarzyszeniu Elektryków Polskich NOT. Wynikiem tej współpracy jest działająca w Rzeszowie stacja rejestracji wyładowań atmosferycznych.

Wspólne prace nad problematyką globalnej aktywności burzowej prowadziliśmy też z Pracownią Pól ELF i Rezonansu Schumanna w Krakowie (Uniwersytet Jagielloński i Akademia Górniczo-Hutnicza), pod kierownictwem **Andrzeja Kułaka**.

A cofając się do wczesnego okresu badania burz, gdy nie było możliwości zakupu nowoczesnych przyrządów, chciałbym jeszcze wspomnieć o współpracy z **Józefem Koszewskim** z

Instytutu Chemii Fizycznej PAN przy konstrukcji niezwykle użytecznej aparatury do rejestracji szybkich zmian pola elektrycznego.

Podczas mojego długiego życia miałem szczęście zetknąć się z wybitnymi osobami, które miały duży wpływ na moją drogę zawodową, poczynając od studiów na Politechnice Warszawskiej pod kierunkiem prof. **J.L. Jakubowskiego**, poprzez ponad roczny staż naukowy w Anglii, u prof. **B.J. Masona** w Imperial College w Londynie i u prof. **J.A. Chalmersa** w Durham, po różne kontakty z wybitnymi badaczami elektryczności atmosfery, jak **Hans Israël**, **Marx Brook**, **Bernard Vonnegut**, **Nobu Kitagawa**, **Toshio Ogawa**, **Hannes Tammet**. Bardzo dużo zawdzięczam **Samuelowi Coronitiemu**, sekretarzowi Międzynarodowej Komisji Elektryczności Atmosfery ICAE przy Unii Geofizycznej. Będąc wielokrotnym członkiem tej komisji mogłem nawiązywać ścisłe kontakty i możliwości współpracy z wieloma osobami. Pozwolę sobie wymienić tylko niektóre nazwiska: **Hans Dolezalek** – sekretarz ICAE, **Lothar Ruhnke** – prezydent ICAE. Ponadto kontaktowałem się z wieloma osobami na konferencjach i podczas ich wizyt w Polsce.

Serdecznie dziękuję wszystkim, z którymi miałem przyjemność współpracować, za wspólne działania. Dziękuję również autorom wzruszających notatek zamieszczonych w tym tomie, przypominających podejmowane wysiłki i prace, oraz przedstawiających niektóre fakty z mojego życia. Wypowiedziane słowa uznania należą się całej grupie Pracowni Elektryczności Atmosfery i jej Współpracowników, która skupiła osoby solidarne i ofiarne oraz całkowicie oddane pracom naukowym z dziedziny elektryczności atmosfery.

Najprawdopodobniej w takim gronie spotykam się po raz ostatni; w związku z tym chcę jeszcze raz bardzo serdecznie wyrazić wielką wdzięczność za życzliwość i wszelkie dobro, jakie od obecnych tutaj i wymienionych wyżej uzyskałem. Korzystając z tej okazji pragnę również bardzo przeprosić tych, którym zrobiłem jakąkolwiek przykrość lub w jakiejś mierze zawiodłem, nie spełniając pokładanych we mnie oczekiwań.

Stanisław Michnowski

## Words from Stanisław Michnowski

I wish to warmly thank my colleagues and coworkers and pay tribute to those who passed away. I was employed at the Department of Geophysics, Polish Academy of Sciences (now the Institute of Geophysics PAS) by Professor **Tadeusz Olczak** in 1954; and since that time I have been the head of the Atmospheric Electricity Laboratory until my retirement. I am indebted to Professor **Stefan Manczarski** for agreeing to be my PhD supervisor. Special thanks go to Professor **Roman Teisseyre**, Deputy Director and then Director of the Institute, who was interested in my work and is still giving me a strong support.

Among the members of the atmospheric electricity group at that time, it is **Stanisław Warzecha** who deserves to be mentioned in the first place; he was the head of the Atmospheric Electricity Station at the Stanisław Kalinowski Geophysical Observatory at Świder, one of the persons responsible for its development. We acknowledge his research based on observational data from Świder. Well-known are his papers assessing the effect of nuclear tests and Chernobyl nuclear accident on atmospheric electricity at Świder. Results of observations have for many

years been documented in the form of atmospheric electricity yearbooks. Measurement data were processed by all members of the Atmospheric Electricity Laboratory, including **Józef Gadomski** and **Andrzej Kobendza**. Observatory works are now continued by the Świder Observatory Director, **Marek Kubicki**, in still increasing range.

I am particularly indebted to **Piotr Barański**, my main collaborator in the field of thunderstorm electricity and lightning discharges, who reached a high level of experimental research of the electric field emitted by lightning discharges.

I also owe a lot to **Anna Dziembowska**, who had been active in our group, and then became engaged in editorial works, and to other members of the Laboratory, namely, theoretician **Andrzej Losakiewicz**, participating also in experimental projects in Spitsbergen, and **Marek Chrobak** who, for many years, was doing technical and instrumental duties with great dedication.

In 2009, our group was joined by **Anna Odzimek**, who has carried out, with my assistance, the atmospheric electricity research in a polar region on the basis of Hornsund measurements. Being interested and involved in studying the global electric circuit she is able to widely expand the scope of investigations that are currently under way by the atmospheric electricity group.

Out of numerous representatives of other, Polish and foreign institutions, without whom our achievements would not be possible, the memory and shortage of place enable me to mention just a few.

In the years 1957-1958, pioneering atmospheric electricity investigations have been expanded, owing to international support and the action of International Geophysical Year. Hence, I was able to establish a research station in the locality Cha-Pa in Vietnam. This initiated many year cooperation with the Institute of Geophysics of the Vietnamese Academy of Sciences. In the framework of this cooperation, we hosted a post-graduate student **Nguyen Manh Duc**, who stayed with us for some years. Under my guidance, he defended his PhD thesis and highly advanced his habilitation dissertation, which is also a valuable contribution to Polish-Vietnamese cooperation.

A great accomplishment in experimental studies was to organize, together with my coworkers, an atmospheric electricity station at the Polish Polar Station in Hornsund, Spitsbergen.

Because our group was composed of just a few people, it was necessary to have an outer help to process the Hornsund data. The first help came from **Ninel Nikoforova** from the Institute of Earth Physics in Moscow, followed by **Natalia Kleimenova** and **Olga Kozyreva** from the same institute. The cooperation turned out to be very fruitful. Joint research enabled the above-mentioned ladies to detect the effects of magnetic storms on the electric field at the Earth's surface in middle latitudes. Contribution to these studies, intensely continued up to now, was brought by **Kajetan Zielkowski**, **Iwona Stanisławska** and **Zbigniew Klos** from the Space Research Center, as well as **Sven Israelsson** from the University in Uppsala. The latter, jointly with **Edvard Pislarem** i **Ali Enayatollah**, was also taking part in the studies of thunderstorm systems and lightning distribution over Sweden; I also worked with **Ernst Åström** from Uppsala on the theory of a field mill for electric field measurements.

Among the projects realized together with representatives of domestic institutions, worth special emphasis is the participation of people from Warsaw Polytechnic; let me mention just **Zdobysław Flisowski** from the Electrical Engineering Faculty; **Jerzy Berliński**, gifted constructor of world recognized instruments for electric field measurements; and **Jan Drzewiecki**, who performed atmospheric electric current measurements in Józefosław near Warsaw and Hornsund.

With gratitude I also mention the cooperation with the Institute of Meteorology and Water Management, mainly with **Kazimierz Stefanicki**, who gave me a strong support, as well as **Jacek Walczewski** and **Jan Parfiniewicz**.

At the Świder Observatory, we were able to make very valuable, long-lasting investigations of air radioactivity, in cooperation with the Nuclear Research Center and Central Laboratory of Radioactive Protection, with participation of **Jerzy Peńsko**, **Bogdan Gwiazdowski** and **Bogna Myslek-Laurikainen**.

I am also cooperating, for a long time, with **Zbigniew Kobylński**, in a research into the effects of broadly understood solar activity on the electricity in the lower atmosphere and earthquake precursors in the electric field.

In the late 1970s we also performed, quite novel in our country, measurements of static electricity and air ionization indoors, in collaboration with Central Institute of Labour Protection in Warsaw (**Henryk Korniewicz** and **Zygmunt Grabarczyk** being the main participants) and Warsaw Polytechnic (**Andrzej Wajdewicz**).

Worth mentioning are our joint works with Rzeszów Polytechnic, notably with **Grzegorz Masłowski**, in the framework of Polish Committee of Thunderstorm Protection at the Association of Polish Electrical Engineers. These brought as a result the lightning recording station operating in Rzeszów.

We participated, too, in joint research on the global thunderstorm activity in cooperation with ELF Field and Schumann Resonance Laboratory in Cracow (Jagiellonian University and AGH University of Science and Technology) led by **Andrzej Kulak**.

Speaking about the early period of thunderstorm studies, when we were unable to buy modern equipment, I want to mention the cooperation with **Józef Koszewski** from the Institute of Physical Chemistry, PAS, in constructing a very useful instrument for the recordings of fast electric field variations.

During my long life I was lucky to meet eminent persons who exerted strong influence on my professional path, beginning with studies in the Warsaw Polytechnic under the guidance of Professor **J.L. Jakubowski**; through a research fellowship for over one year in England, visiting Professor **B.J. Mason** at Imperial College in London and Professor **J.A. Chalmers** in Durham; to various contacts with outstanding scientists in the field of atmospheric electricity: **Hans Israël**, **Marx Brook**, **Bernard Vonnegut**, **Nobu Kitagawa**, **Toshio Ogawa**, **Hannes Tammet**. I owe a lot to **Samuel Coroniti**, secretary of International Commission on Atmospheric Electricity at the Geophysical Union. Being a member of this commission I was able to make close contacts and a possibility to cooperate with many persons. Let me mention just two names: **Hans Dolezalek** – Secretary of ICAE, and **Lothar Ruhnke** – President of ICAE. Moreover, I had many fruitful encounters with eminent scientists at conferences and during their visits to Poland.

I am very thankful to everybody with whom I had pleasure to collaborate. I am also indebted to the authors of touching notes enclosed in this book, recollecting our common efforts and some facts from my life. The appreciation expressed concerns the whole Atmospheric Electricity Group and its collaborators, which gathers people who are supportive and fully devoted to scientific work.

Most probably, we meet in this group for the last time, so I want to express once again my gratitude for the kindness and goodwill I acquired from those present here and those enumerated above. I am also taking the opportunity to sincerely apologize to those to whom I made any harm or disappointed them by not fulfilling their expectations.

Stanisław Michnowski

(translated from Polish by Anna Dziembowska)



**Selected Early Publications**  
**by Stanisław Michnowski**





WPLYW WYŁADOWAŃ Z OSTRZY NA WARTOŚĆ NATEŻENIA  
POLA ELEKTRYCZNEGO PRZY POWIERZCHNI ZIEMI

## 1. WSTĘP

W czasie burzy można czasami zaobserwować niewielkie świetlące wyładowania<sup>1</sup>, widoczne przy ostrych krawędziach przedmiotów wystających nad powierzchnią ziemi, np. przy uziemionych metalowych prętach często stosowanych jako zwody urządzeń piorunochronowych. Dla odległości chmura — ziemia stanowią one ostrza, przy których występuje znaczne zwiększenie wartości nateżeń pola elektrycznego. Nateżenia pola elektrycznego przy ostrzach osiągają czasami wartości wystarczające do wywołania intensywnej jonizacji, prowadzącej do widocznych lub niewidocznych wyładowań. Wyładowania te mogą odgrywać pewną rolę w zagadnieniach ochrony obiektów od bezpośrednich uderzeń pioruna. W nowszej literaturze spotyka się hipotezy (J. Frenkel 1949, W. I. Arabadz 1950) usiłujące przypisywać tym wyładowaniom ważne znaczenie w ochronnym działaniu zwodu, przy czym literatura dotycząca tego tematu nie podaje badań doświadczalnych, potwierdzających stawiane hipotezy. Eksperymentalnie problemem tym zajął się J. L. Jakubowski (1953) [8], który przeprowadził w warunkach laboratoryjnych serię prób na modelach. Próby te nie wykazały wyraźnego wpływu wyładowań z ostrzy na wybór miejsca uderzenia sztucznego pioruna. Jednakże J. L. Jakubowski wyciąga wnioski uzasadniające potrzebę dalszego badania tego wpływu na modelach przy spełnieniu szeregu dodatkowych warunków, jak również stwierdza konieczność badań w skali naturalnej. W związku z tym autor podjął na terenie Obserwatorium Geofizycznego w Świdrze pomiary prądu wyładowań z ostrza i nateżenia pola elektrycznego przy powierzchni ziemi.

## 2. OBECNY STAN ZAGADNIENIA

Na podstawie pomiarów nateżenia pola elektrycznego przy powierzchni ziemi i pomiarów występującego w tym samym czasie prądu z ostrza<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Nazywane ogniami św. Elma.

<sup>2</sup> Prąd był mierzony z ostrza wysuniętego nad powierzchnię ziemi na wysokość 8,4 m, w odległości 14,5 m od otaczających drzew, o tej samej co ostrze wysokości, sonda radioaktywna znajdowała się w odległości kilkunastu metrów od masztu z ostrzem (Obserwatorium w Kew).

F. J. Whipple i F. J. Scrase [18] wyznaczyli następującą empiryczną zależność między odpowiadającymi sobie w czasie wartościami prądu i natężenia pola:

$$J = A(K^2 - K_0^2) \quad (1)$$

gdzie  $J$  — prąd z ostrza w mikroamperach,

$K$  — natężenie pola przy powierzchni ziemi w V/cm,

$A, K_0$  — wartości stałe dla określonego układu.

Zależność ta została znaleziona na podstawie tylko tych pomiarów, które odnosiły się do stanów prawie stacjonarnych. F. B. J. Schonland, W. M. Chiponkar [7], F. R. Perry, S. H. Webster i F. W. Baguley [13] wykonywali pomiary w układach różniących się między sobą usytuowaniem wysuniętego nad powierzchnią ziemi ostrza i aparatury do pomiaru natężenia pola. Otrzymane przez nich zależności posiadały ten sam charakter, różniły się natomiast między sobą jedynie wartościami współczynnika  $A$  i stałej  $K_0$ .

Gdy do ustalenia zależności między prądem z ostrza i natężeniem pola przy ziemi wykorzystywano również wyniki pomiarów ze stanów niestacjonarnych (zachodzących przy szybkich zmianach, które towarzyszą wyładowaniom piorunowym), otrzymano krzywe, odbiegające od zależności (1). Na podstawie wyników pomiarów prądu w stanie quasistacjonarnym i niestacjonarnym M. N. Gierasimowa [6] określiła<sup>3</sup> zależność między prądem z ostrza  $J$  i natężeniem pola elektrycznego  $K$  w sposób następujący:

$$J = A(K^p - K_0^p), \quad (2)$$

gdzie współczynnik potęgowy nie jest równy 2, lecz ok. 1,7. Wyniki pomiarów W. C. Hutchinsona [7] obejmujące stany quasistacjonarne i niestacjonarne wykazały, iż zależność  $J = F(K)$  dla gradientów o wartości bezwzględnej większej od 40 V/cm przechodzi w zależność liniową. Przy niższych zakresach było charakterystyczne występowanie pewnych odchyłeń od parabolicznego przebiegu krzywej. Odchylenia te były widoczne również przy zestawieniu średnich wartości wyników pomiaru Whipple'a i Scrase'a [7], branych ze stanów quasi- i niestacjonarnych, z otrzymaną przez nich zależnością (1).

Według wszystkich przytoczonych zależności dodatniemu kierunkowi natężenia pola przy powierzchni ziemi odpowiada dodatni kierunek prądu płynącego do ostrza (w kierunku ziemi)<sup>4</sup>. Dlatego też na specjalną

<sup>3</sup> W warunkach wysokogórskich: 4250 m nad poziomem morza.

<sup>4</sup> W niniejszej pracy kierunek przepływu prądu z atmosfery do ostrza (odpowiadający ładunkom dodatnim) jest przyjęty za dodatni. Dla gradientu potencjału pola elektrycznego przyjmuje się powszechnie za dodatni również kierunek w stronę ziemi. W tekście pod terminem „gradient” rozumie się natężenie pola elektrycznego przy powierzchni ziemi.



uwagę zasługują pomiary C. W. Lutz a [9], stwierdzające w pewnych okresach czasu występowanie gradientu przy powierzchni ziemi i prądu z wysuniętego ponad jej powierzchnię ostrza o znakach przeciwnych. Lutz w dłuższych okresach czasu (do 20 minut) zaobserwował zjawisko występowania dodatnich natężeń pola przy powierzchni ziemi, podczas gdy z ostrza odpływały dodatnie ładunki w stronę chmury.

Oprócz efektów tego rodzaju, które nazywać będziemy przeciwstawnością kierunków mierzonego prądu i gradientu, Lutz zanotował występowanie pewnych opóźnień zmian prądu z ostrza względem zmian natężenia pola. Opóźnienia te były widoczne na wykresach w postaci przesunięć odpowiadających sobie kształtem krzywych prądu z ostrza i natężenia pola w funkcji czasu i dochodziły do 1—2 minut.

Obserwacje C. W. Lutz a zostały później potwierdzone pomiarami W. C. Hutchinson a [7], w których jednak przeciwstawności i opóźnienia występowały mniej wyraźnie.

Wykonane przez C. W. Lutz a pomiary wykazały, iż w okresach przeciwstawności kierunku gradientu i kierunku prądu, występował również ładunek przestrzenny o dużej gęstości w przyziemnych warstwach powietrza. Na tej podstawie wysunął Lutz tezę, iż ładunki te są przyczyną przeciwstawności omawianych kierunków pola elektrycznego i prądu. Według niego ładunki przestrzenne wytwarzają przy powierzchni ziemi tak silne przeciwpole, że może ono przewyższać przeciwnie skierowane pole chmury burzowej. Hutchinson przyjął interpretację Lutz a, a słabszy stopień obserwowanych przez siebie efektów przeciwstawności przypisywał mniejszej wysokości ostrza oraz gorszej izolacji swego układu od układu Lutz a.

Pomiary W. C. Lutz a [9] i M. N. Gierasimowej [6] wykazały pewną zgodność i podobieństwo przebiegów zmian prądu z ostrza w czasie i zmian gęstości ładunku przestrzennego, mierzonego równocześnie przy powierzchni ziemi, w oddaleniu kilkunastu metrów od masztu z ostrzem. To, że duże wartości mierzonego ładunku przestrzennego występowały zawsze równocześnie z występowaniem dużych wartości prądu z ostrza, jest według Lutz a zrozumiałe, ponieważ pole elektryczne przy powierzchni ziemi może dochodzić do wartości, które wystarczą, by w otoczeniu miejsca pomiaru ładunku przestrzennego wywołać wyładowania z ostrzy [9]. Wyładowaniom tym przypisywali Lutz i Gierasimowa występowanie w czasie burzy dużych gęstości ładunku przestrzennego.

Według H. Norindera i S. Siksnys [12] powstawanie w czasie burzy znacznych gęstości ładunku należy tłumaczyć w sposób odmienny. Uważają oni, że większe gęstości jonów wywołane są w głównej mierze konwekcją czynników jonizujących i że za takie czynniki można uważać

przede wszystkim wyładowania (ulot) z elektrycznie naładowanych kropeł deszczu oraz substancje radioaktywne znajdujące się w opadach.

Ponieważ w badaniach H. Norindera i S. Siksnys równocześnie z pomiarami liczby jonów<sup>5</sup> nie przeprowadzono pomiarów prądu z ostrza i pomiarów natężenia pola przy powierzchni ziemi, nie można było ustalić zależności między tymi wielkościami. Wydaje się więc, że dokonane przez nich porównania własnych wyników pomiarów z wynikami pomiaru gradientu, otrzymanymi przez innych autorów, nie wystarczają do postawienia ostatecznych wniosków.

Poglądy na sprawę przyczyn występowania w czasie burzy znacznych gęstości ładunków przestrzennych przy powierzchni ziemi nie są więc jeszcze całkowicie uzgodnione. Występowanie tych ładunków jest czynnikiem istotnym przy badaniu wpływu wyładowań z ostrza na wartości natężeń pola zarówno przy powierzchni ziemi, jak też w otoczeniu ostrza. W celu zbadania tego wpływu staje się potrzebne wyznaczenie rozkładu ładunku przestrzennego i przewodności powietrza w bliższym i dalszym otoczeniu ostrza. Przy obecnym stanie techniki pomiarowej bezpośrednio wyznaczanie eksperymentalne tego rozkładu w otoczeniu ostrza uważać można za niemożliwe [3].

W niniejszym artykule przytoczono wstępne pomiary prądu wyładowań z ostrza umieszczonego nad powierzchnią ziemi i natężenia pola elektrycznego przy jej powierzchni. Omówiono przy tym wpływ ładunków przestrzennych na prąd z ostrza i gradient pola elektrycznego przy powierzchni ziemi.

### 3. UKŁAD POMIAROWY

Układ pomiarowy<sup>6</sup> składał się z układów odpowiednio rozmieszczonych na określonej części terenu Obserwatorium, a mianowicie: z układu do pomiaru natężenia prądu wyładowania z ostrza, z układu do pomiaru natężenia pola elektrycznego przy powierzchni ziemi i z układu do pomiarów meteorologicznych.

#### A. UKŁAD DO POMIARU PRĄDU Z OSTRZA

Ostrze zostało wykonane z drutu manganinowego o średnicy 0,5 mm i długości 7 cm i osadzone na pręcie metalowym odpowiednio izolowanym (ebonit, pleksiglas) od uziemionej konstrukcji wsporczej, składającej się z drewnianego słupa i zainstalowanego na nim masztu (rys. 1). Maszt

<sup>5</sup> Przy używanej aparaturze licznikowej Eberta i Israëlego nie mogły być wykazane szybkie zmiany mierzonej wielkości, ponieważ pomiar pozwalał na odczyt co 4 minuty.

<sup>6</sup> Rozumiemy jako całość przyrządy wraz z terenem.

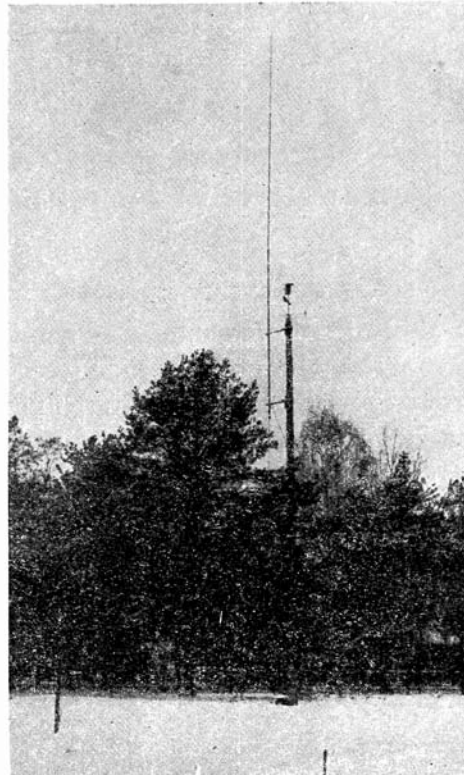


wykonany z rur stalowych mógł być demontowany i zakładany ponownie, przy czym możliwa była zmiana wysokości umieszczenia ostrza.

Ostrze z prętem, umieszczonym w odpowiednim uchwycie, połączone zostało za pomocą ekranowanych kabli z dodatnim zaciskiem galwanometru, którego ujemny zacisk był uziemiony. Galwanometr posiadał czułość  $2,28 \cdot 10^{-8}$  A/dz, oporność wewnętrzną  $1080 \Omega$  oraz odznaczał się dobrą stałością punktu zerowego. Skala z zerem pośrodku pozwalała, bez zmiany zakresu, mierzyć prądy tylko do wartości  $\pm 9,12 \cdot 10^{-7}$  A. Rozszerzenie i zmienną regulację zakresu pomiarowego uzyskano przy pomocy boczniaka Ayertona zestawionego z oporników dekadowych.

Jako zabezpieczenie galwanometru przy ewentualnym uderzeniu pioruna zestawiono odpowiedni układ ochronny, który składał się z iskiernika, uziemienia, cewki ochronnej i kabla prowadzącego do stanowiska pomiarowego. Całość z wyjątkiem części metalowego pręta z ostrzem była osłonięta uziemionym metalowym ekranem.

Oporność uziemienia wynosiła  $60 \Omega$ , oporność żył kabli i przewodów doprowadzających  $1,6 \Omega$ . Oporność izolacji układu pomiarowego mierzona galwanometrem wynosiła ponad  $100 M\Omega$ .



Rys. 1. Maszt z ostrzem zainstalowany na terenie Obserwatorium Geofizycznego w Świdrze

#### B. UKŁAD DO POMIARU NATĘŻENIA POLA ELEKTRYCZNEGO PRZY POWIERZCHNI ZIEMI

Aparatura użyta do pomiaru natężenia pola elektrycznego przedstawiała dwa klasyczne zestawy typu *Bennedorf*a. Radioaktywne sondy zwieszone były na wysokości 2,2 m przy pomocy metalowych anten o długości 35 m. W odległości ok. 20 m od sond znajdowały się najbliższe drzewa i domek, w którym umieszczone są elektrometry. Mierzone napięcie było rejestrowane co 60 sek. w zakresie  $\pm 260$  V i  $\pm 600$  V. Wartości potencjału sond występujące przy wyładowaniach piorunowych wychodziły

poza zakres mierzonych wartości<sup>7</sup>. Pomierzony podczas pogody współczynnik redukcyjny, tj. stosunek wartości natężenia pola mierzonego w terenie otwartym do natężenia pola mierzonego w miejscu, w którym była podczas burzy zainstalowana sonda, wynosił ok. 3,2.

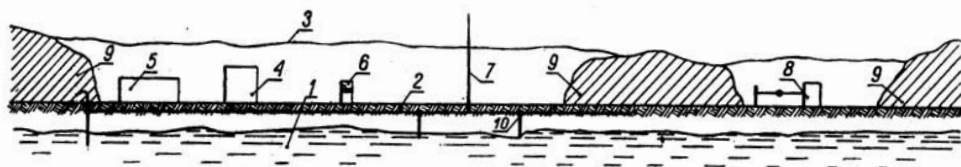
#### C. UKŁAD DO POMIARÓW WIELKOŚCI METEOROLOGICZNYCH

Do pomiaru szybkości i kierunku wiatru służył wiatromierz Wilda, zainstalowany na szczycie słupa o wysokości 10 m (rys. 1).

Do pomiaru temperatury, wilgotności względnej i ciśnienia powietrza służyły: termometr, higrometr i barometr z ciągłą automatyczną rejestracją. Przyrządy te zainstalowane były w klatce meteorologicznej, odległej o 20 m od słupa z masztem. W odległości paru metrów od klatki znajdował się pluwiometr Hellmanna.

#### D. ROZMIESZCZENIE PRZESTRZENNE URZĄDZEŃ POMIAROWYCH W TERENIE

Rozmieszczenie urządzeń pomiarowych i innych obiektów (drzewa, słup itp.) wybrane było pod kątem badań efektów przeciwstawności obserwowanych przez Lutza i Hutchinsona. Z tego względu umieszczono ostrze na dużej wysokości i w stosunkowo niewielkiej odległości od drzew.



Rys. 2. Orientacyjny przekrój pionowy przez układ pomiarowy wzdłuż kierunku maszt—sonda

#### Oznaczenia :

1 — warstwa przewodząca (woda podskórna), 2 — warstwa przepuszczalnego piasku o oporze właściwym  $10^4 \Omega \text{ cm}$ , 3 — linia wierzchołków drzew, 4 — budynek mieszkalny, 5 — garaż, 6 — klatka meteorologiczna, 7 — maszt z ostrzem, 8 — układ do pomiaru gradientu, 9 — przekrój przez gęste zadrzewienia, 10 — fragmenty uzziemia

Rys. 2 przedstawia orientacyjny szkic rozmieszczenia poszczególnych urządzeń pomiarowych w przekroju pionowym, wzdłuż kierunku: maszt—sonda. Terenem pomiarowym jest płaski, zadrzewiony obszar z polanami. Na jednej z nich znajduje się układ do pomiaru natężenia pola, na skraju zaś drugiej — słup z masztem i zainstalowanym ostrzem. Ostrze umieszczono na wysokości 19,20 m, co odpowiada jego wysunięciu o ok. 8 m ponad przeciętną wysokość sąsiednich drzew, znajdujących się w odległości ok. 23 m. od słupa. Odległość masztu od miejsca zainstalowania sondy

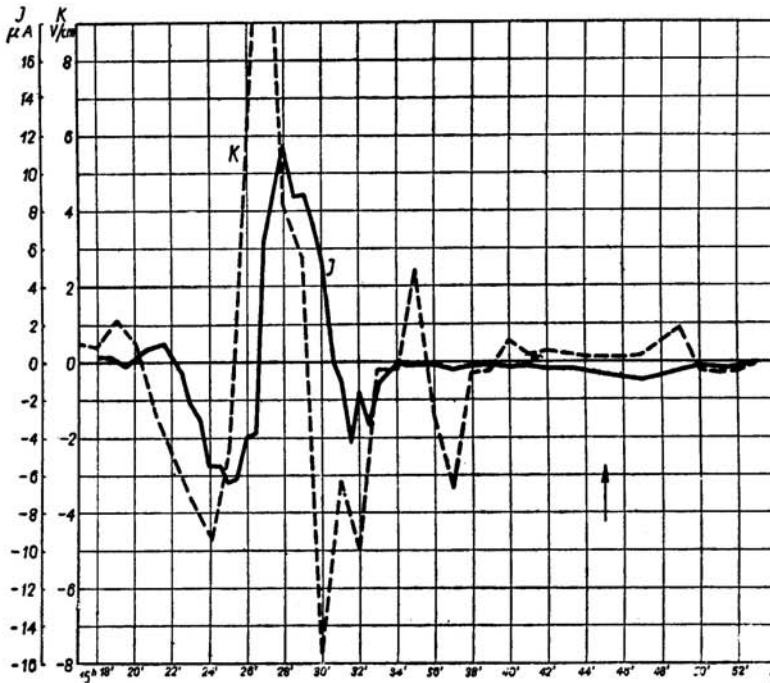
<sup>7</sup> Gwałtowne zmiany natężeń pola w czasie wyładowań piorunowych wymagają do ich badań innej aparatury i nie są tu specjalnie rozpatrywane.



wynosi 96 m. Przeciętna wysokość linii wierzchołków drzew, szczytów domów wynosi ok. 12 m. Podłoże terenu Obserwatorium w Świdrze jest piaszczyste, o dużej oporności właściwej rzędu  $10^6 \Omega\text{cm}$ , przy czym (wg pomiarów przeprowadzonych metodą oporową) warstwa lepiej przewodząca znajduje się na głębokości ok. 6 m.

#### 4. POMIARY

W czasie burz we wrześniu 1953 r. autor wykonał łącznie około 1000 pomiarów prądu z ostrza i natężenia pola elektrycznego przy powierzchni ziemi. Odczyty natężenia prądu z ostrza dokonywano w odstępach czasu co 30 sek.; przy czym co drugi odczyt prądu z ostrza przeprowadzano



Rys. 3. Fragment wykresu zmian natężenia pola elektrycznego przy powierzchni ziemi „K” i prądu z ostrza „J”. Strzałką oznaczono chwilę wystąpienia podmuchu wiatru

w chwili rejestracji potencjału sondy. Celem sprawdzenia prawidłowego działania układu, w okresie pomiędzy pomiarami zasadniczymi dokonywano co godzinę pomiaru izolacji układu.

Temperaturę, ciśnienie i wilgotność względną powietrza określano na podstawie zapisów przyrządów samorejestrujących. Kierunek i siłę wiatru oraz nasilenie i czas trwania opadów oznaczano orientacyjnie. Obserwacje

ostrza przeprowadzano z odległości 40 m. Zarówno podczas dnia, jak i w nocy nie zauważono świetleń czy snopień przy ostrzu w okresie wykonywania pomiarów.

##### 5. WYNIKI POMIARÓW I ANALIZA WYNIKÓW

Wyniki pomiarów naniesiono na wykresy. Łącząc punkty odpowiadające wynikom pomiarów prądu w odstępach czasu co 30 sek., a natężenie pola elektrycznego co 60 sek otrzymano krzywe  $J=f(t)$ ,  $K=f(t)$ . Jeden z fragmentów takiego wykresu ilustruje rys. 3, na którym widoczne są silne, typowe dla burzy, zmiany natężenia pola elektrycznego i prądu z ostrza, przy tym, podobnie jak przy pomiarach Lutza, zmiany prądu są opóźnione w stosunku do zmian natężenia pola. Osobliwa jest końcowa część wykresu, gdzie w ciągu ok. 10 minut występują przeciwstawne kierunki prądu z ostrza i gradientu. Przedstawiony wykres zdjęto przy przepływie dość dużej chmury (Cb) podczas względnej ciszy. Na terenie Obserwatorium zanotowano wówczas jedynie ślad opadu, stąd wydaje się, iż występujące w badanym układzie ładunki przestrzenne pochodziły głównie z wyładowań z ostrzy.

Na podstawie wszystkich wykresów  $K=f(t)$   $J=f(t)$ , zdjętych podczas serii omawianych burz, można było stwierdzić, że:

a) na ogół zachodziła zgodność znaków prądu i gradientu; niezgodność to znaczy przeciwstawność kierunku prądu i gradientu trwa znacznie krócej od zgodności kierunków. Przypadków występowania przeciwstawności (trwających czasem do 6 minut) naliczono kilkanaście. Szczególnie jaszkrawo efekt ten wystąpił w przytoczonym przebiegu  $J$  i  $K$  (rys. 3).

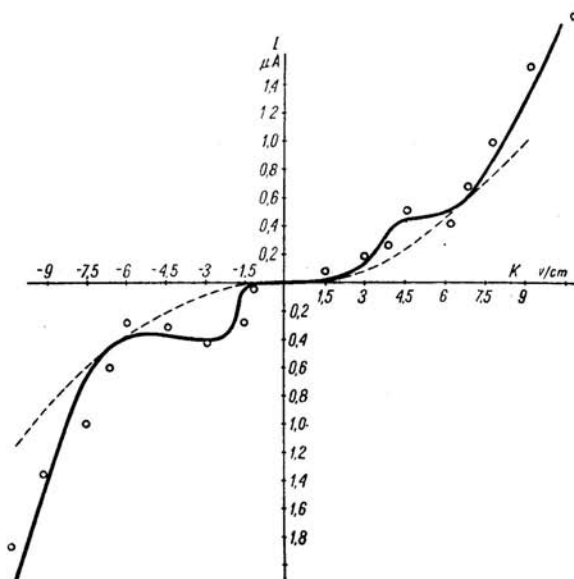
b) w większości pomiarów można było zaobserwować podobny charakter i pewną odpowiedniość przebiegów prądu i gradientu, występujących w tym samym czasie, przy czym na ogół zmiany prądu z ostrza opóźniały się względem zmian natężenia pola. Opóźnienia te występowały wyraźnie przy szybkich zmianach natężenia pola i nie przekraczały 3 minut. Nie były one jednakowe, w b. nielicznych przypadkach zaobserwowano niewielkie wyprzedzanie zmian prądu w stosunku do zmian gradientu.

Wyniki pomiarów zestawione na wykresie o współrzędnych prądu z ostrza i gradientu wykazują znaczny rozrzut. Wyznaczając dla określonych wartości gradientu (co 1,5 V/cm) średnią wartość odpowiadających im w tym samym czasie wartości prądu, otrzymano zależność przedstawioną przy pomocy krzywej ciągłej  $J=F(K)$  wykreślonej na rys. 4. przy użyciu wszystkich wyników, odpowiadających stanom quasistacjonarnym i niestacjonarnym. Ponieważ nie otrzymano dostatecznej liczby



wyników odpowiadających stanom quasistacjonarnym, nie sporządzono dla nich wykresu. Jedynie na rys. 4 poprowadzono w przybliżeniu krzywą przerywaną, wyznaczającą parabolę, która w pewnej mierze odzwierciedla zależność  $J=f(K)$  dla stanów quasistacjonarnych w danym układzie pomiarowym. Analogiczny charakter zależności dla tych stanów otrzymywali na podstawie wyników swych pomiarów Whipple i Scrase, Schonland, Chiponkar i inni, co było wyżej powiedziane.

Krzywa ciągła z rys. 4 wykazuje odchylenia od krzywej przypuszczalnie odpowiadającej stanom quasistacjonarnym — natomiast w przybliżeniu podobna jest do krzywych Whipple'a i Scrasego (rys. 5) i Hutchinsonsona [7]



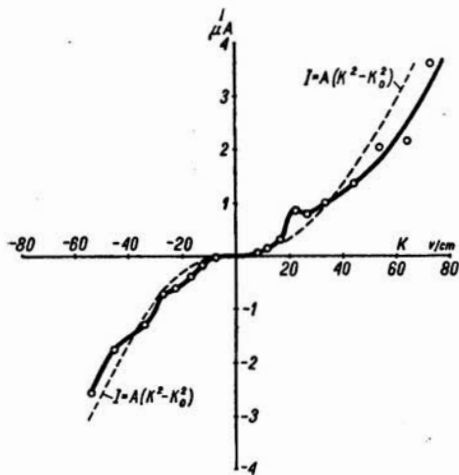
Rys. 4. Wykres średnich wartości prądu z ostrza w zależności od gradientu otrzymany z wyników pomiarów w Świdrze. Krzywą przerywaną orientacyjnie zaznaczono przybliżoną zależność odpowiadającą stanom stacjonarnym, krzywą ciągłą wykreślono przy użyciu wyników w stanach stacjonarnych i niestacjonarnych.

wykreślonych na podstawie średnich wyników pomiarów, odpowiadających stanom quasistacjonarnym i niestacjonarnym.

Odchylenia od parabolicznego przebiegu otrzymanej krzywej są dość znaczne i występują wyraźnie przy pewnych wartościach prądu z ostrza. Nie dadzą się one jednak przypisać tylko błędom pomiaru, można natomiast podjąć próbę powiązania tych odchyłeń z warunkami panującymi w ukła-

dzie<sup>8</sup>. Warunkami takimi nie mogły być: temperatura, ciśnienie, wilgotność, ponieważ wielkości te w porównaniu z szybkimi zmianami prądu zmieniały się bardzo powoli.

Nasuwa się przypuszczenie, że odchylenia przebiegu krzywej  $J=F(K)$  mogą być wywołane dodatkowymi źródłami pola, wpływającymi na wartość



Rys. 5. Wykres średnich wartości prądu z ostrza w zależności od gradientu przy powierzchni ziemi, otrzymany z wyników pomiarów Whipple'a i Scrasego w Kew. Krzywą przerywaną oznaczono zależność otrzymaną na podstawie wyników pomiarów odnoszących się do stanów stacjonarnych, krzywą ciągłą wykreślono przy użyciu wyników w stanach stacjonarnych i niestacjonarnych

Być może, jest to wywołane mniejszą ruchliwością dodatnich jonów w porównaniu z ujemnymi.

Jak widać z rys. 3, w okresie czasu między 15<sup>h</sup>39<sup>m</sup> i 15<sup>h</sup>49<sup>m</sup>30<sup>s</sup> w dniu 5. 9. 1953 r. wystąpiła stosunkowo długotrwała przeciwstawność kierunków prądu z ostrza i gradientu potencjału pola elektrycznego, mie-

ność mierzonego gradientu. Najbardziej prawdopodobne wydaje się przy tym przypuszczenie, że obserwowane na wykresie odchylenia są wywołane przez ładunek przestrzenny, wytwarzany przy wyładowaniach z ostrzy. Ładunek, który wywołałby odchylenia uwidocznione na wykresie, musiałby mieć znak ujemny przy dodatnich wartościach prądu, dodatni zaś przy wartościach ujemnych prądu. Ładunek taki jest wytwarzany właśnie przez wyładowania z ostrza badanego, jak również może być wywołany przez wyładowania z ostrzy naturalnych, np. z igieł sosen stojących wokoło polany, na której zostały rozwieszony sondy.

Z rys. 4 widać, że w przypadku ujemnego prądu z ostrza, to znaczy dodatniego ładunku przestrzennego wokół ostrza, odchylenia od paraboli są większe niż w przypadku występowania dodatniego prądu z ostrza.

<sup>8</sup> Przy rozważaniach przyjęto pewne założenia dotyczące warunków występujących w układzie. Przy niewielkim stosunkowo oddaleniu ostrza od zestawu mierzącego gradient przy powierzchni ziemi usprawiedliwione wydaje się założenie, że w całym układzie panują te same warunki meteorologiczne, jak: ciśnienie, wilgotność, temperatura, opady. Można również przyjąć, że gdyby nie było zainstalowanego ostrza i obiektów terenowych, to gradient na poziomie ostrza, nazwany w dalszym ciągu tekstu jako natężenie pola elektrycznego występującego nad terenem pomiarowym, byłby w przybliżeniu jednakowy nad całym układem (odległości chmur są bowiem wielokrotnie większe od wymiarów układu).

rzonego przy powierzchni ziemi. C. W. Lutz [9] i W. C. Hutchinson [7] tłumaczyli tego rodzaju zjawiska występowaniem dużych gęstości ładunków przestrzennych w warstwie przyziemnej powietrza. Wydaje się, iż przypuszczenie to może być słuszne w przypadkach małego natężenia pola elektrycznego, wywołanego przez chmurę nad terenem pomiarowym, przy jednocześnie dużych gęstościach ładunku przestrzennego w pobliżu ziemi. Stan taki może się wytworzyć po nagłym zmniejszeniu pola wywołanego przez chmurę. Gdy w takim przypadku ładunek przestrzenny stwarza w warstwach przyziemnych odwrotny kierunek natężenia pola elektrycznego w stosunku do natężenia pola na wyższych wysokościach, to przy założeniu jednostajnej gęstości ładunku przestrzennego  $\rho$  i przy różnicy wysokości  $\Delta h$  między poziomem ostrza i poziomem zawieszenia sondy można odpowiednią różnicę natężenia pola elektrycznego określić na podstawie zależności

$$\Delta K = -4\pi\rho \cdot \Delta h \quad (3)$$

Można w przybliżeniu oszacować wpływ zakłócającego ładunku przestrzennego na mierzone natężenie pola przy powierzchni ziemi w czasie zmian quasistacjonarnych. Dla pomierzonej wartości  $J$  można na podstawie wzoru  $J=f(K)$  wyznaczyć natężenie pola elektrycznego  $K_u$  w miejscu zainstalowania sondy, odpowiadające stanom stacjonarnym. Wyznaczone  $K_u$  różni się od wartości  $K$  (zmierzonej równocześnie z prądem  $J$ ) o pewną wartość, która to różnica może być wywołana średnim, zakłócającym ładunkiem przestrzennym.

Oszacowana na tej podstawie wartość przeciwpola, występująca przy powierzchni ziemi o godz. 15<sup>h</sup>47<sup>m</sup>, wynosi orientacyjnie ok. 820 V/m. Gęstość ładunku, który wywołuje to przeciwpole przy założeniu jednostajnego rozkładu wyniosłaby wg zależności (3) ok. 0,12 CGSE/m<sup>3</sup>, co jest wartością niewielką wobec wartości (20 CGSE/m<sup>3</sup>), mierzonych w czasie trwania przeciwstawności przez Lutza. Należy się spodziewać, że gęstość ładunku nie jest jednostajna i w omawianym przypadku mogła wynosić przy powierzchni ziemi znacznie więcej, niżeli to wynikało z obliczeń.

Jednak przeciwstawność kierunku prądu z kierunkiem natężenia pola elektrycznego nie zawsze jest wywołana jedynie ładunkiem przestrzennym, rozłożonym w warstwach przyziemnych powietrza. Z wykresów  $K=f(t)$  i  $J=f(t)$  widać, że zmiany natężenia prądu są opóźnione w stosunku do zmian gradientu. Prawie przy każdej zmianie kierunku natężenia pola elektrycznego skutek tych opóźnień występowały bardzo wyraźnie, lecz stosunkowo krótkotrwałe przeciwstawności kierunków mierzonych wielkości. Wydaje się, że efekt opóźnień i przeciwstawności z nimi związanych należy przypisać lokalnym ładunkom przestrzennym, które występują



w pewnej odległości od ostrza, wpływając na wartość i przebieg prądu z ostrza.

Wyładowania z ostrzy mogą zmniejszyć natężenie pola elektrycznego przy ostrzu i przy powierzchni Ziemi nie tylko dzięki „ekranującemu“ działaniu ładunku przestrzennego, lecz także dzięki zwiększeniu przy wyładowaniach przewodności powietrza. Ten ostatni wpływ nie może jednak wywołać zjawisk przeciwstawności i opóźnień, które można natomiast przypisać przeciwpolom ładunku przestrzennego.

Na podstawie dotychczasowych pomiarów należy przypuszczać, że przy szybkich zmianach natężenia pola elektrycznego (występującego nad terenem pomiarowym) i przy znacznych jego wartościach zarówno efekty opóźnień prądu z ostrza w stosunku do gradientu jak i przeciwstawności z nimi związane są wywołane głównie ładunkiem przestrzennym, gromadzącym się przy ostrzu; natomiast przy powolnych zmianach gradientu (stany quasistacjonarne) i przy małych wartościach natężenia pola elektrycznego nad terenem pomiarowym efekt przeciwstawności jest spowodowany głównie ładunkiem przestrzennym, znajdującym się w warstwach przyziemnych powietrza. Trudno jest jednak wyciągnąć wnioski, jaką rolę w ostatnim przypadku odgrywa ładunek otaczający ostrze.

Omawiane problemy wymagają dalszego dokładnego badania eksperymentalnego. Warto może w tym miejscu zwrócić uwagę na hipotezę Arabadźiego [1], wg którego „Emitowany przez ostrze ładunek rozkłada się przy zwodzie wokół niego stosownie do pola elektrycznego i daje w stosunku do chmury pole przeciwne o symetrii obrotowej, mające istotne znaczenie przy działaniu zwołu“. Według tegoż autora można się spodziewać, że na zjawisko to mogą mieć wpływ takie czynniki, jak „wiatr wydmuchujący ładunki przestrzenne“. Arabadźi nie podawał w swojej pracy sprecyzowanych wyjaśnień i badań eksperymentalnych na potwierdzenie swojej hipotezy. Zwrócił on jednak uwagę na omawiane pomiary geofizyczne Gierasimowej, Lutza i innych, oświetlając je z nowego punktu widzenia, a mianowicie od strony zagadnień ochrony odgromowej. W związku z tymi zagadnieniami można przedstawić pewne dalsze sugestie związane z problemami „wybiórczości“ miejsca uderzenia piorunu, a w szczególności z problemem działania zwołu.

Zostało stwierdzone (Mc Eachron, Mc Morris [4], F. B. J. Schonland [14], [15], J. S. Stiekolnikow [17], T. W. Wormell [20] i inni), że w czasie zbliżania się wstępnego wyładowania pioruna do ziemi z ostrzy rozwijają się niewielkie, idące naprzeciw wyładowania. Wg F. B. Schonlanda [15], J. S. Stiekolnikowa [17] wartość ochronna zwołu polega na zdolności szybszego i dłuższego, niż przy obiektach chronionych, uformowania się przy zwodzie wyładowania oddolnego. Istotną rolę gra przy tym długość oddolnego wyładowania, które rozwija się do

punktu zetknięcia ze zbliżającym się wyładowaniem wstępnym pioruna. Wobec tego przy wyborze miejsca uderzenia pioruna gra rolę nie tylko rozkład pola elektrycznego przy czole posuwającego się w stronę ziemi wyładowania wstępnego, lecz również występują jednocześnie rozkład pola elektrycznego przy powierzchni ziemi. Wydaje się, że uderzenie pioruna nastąpić może z największym prawdopodobieństwem w to miejsce, skąd najpierw uformowało się i rozwinęło idące naprzeciw wyładowanie od ziemi.

Można przypuszczać, że ważną rolę przy „ostatecznym“ wyborze miejsca uderzenia pioruna grają wartości natężeń pola elektrycznego, powstającego przy samej powierzchni ziemi. Z punktu widzenia ochrony ogromowej należy rozróżnić wpływ wyładowań z ostry na natężenie pola elektrycznego zarówno przy zwodzie jak i przy obiektach chronionych (w naszym układzie — przy zainstalowanym ostrzu i przy powierzchni ziemi). W jednym i drugim przypadku przy zbliżaniu się wstępnego wyładowania pioruna wpływ ten zmniejsza wartości natężenia pola. Przy powierzchni ziemi jest on korzystny ze względu na utrudnienie formowania się wyładowania wstępnego oddolnego. Przy zwodzie natomiast, tj. w okolicy miejsca, w którym zależy nam, aby się wcześniej uformowało wyładowanie oddolne, jest on niekorzystny.

#### 6. OMÓWIENIE BŁĘDÓW PRZEPROWADZONYCH POMIARÓW

Przy pomiarze gradientu potencjału pola elektrycznego dla stanów quasistacjonarnych należy się spodziewać błędów wywołanych: a) wpływem wiatru na gęstość jonów w pobliżu sondy (R. Mühleisen [11]), b) niedoskonałości izolacji, c) innymi przyczynami (np. uchyby elektrometru, błędy odczytu elektrogramów).

Można ocenić iż błędy wywołane wpływem wiatru i opornością izolacji posiadały wartość mniejszą od 30% mierzonej wielkości potencjału. W porównaniu z powyższymi błędami można zaniedbać błędy wywołane innymi czynnikami i oszacować całkowity błąd względny pomiaru w stacjach quasistacjonarnych na wartość nie przekraczającą 30%. Bezwzględny błąd przy wartościach potencjału sondy bliskich zera wynosi dla czulszego układu w przybliżeniu 6 V, co odpowiada ok. 0,09 V/cm.

Błąd pojedynczego odczytu przy gwałtownych zmianach pola, związanych z wyładowaniami piorunowymi, może mieć znaczne wartości wskutek dużej bezwładności układu. Błąd ten jest niemożliwy do wyznaczenia bez dodatkowych pomiarów. Zgodnie z opinią J. Chalmersa [2] przy gwałtownych zmianach pola elektrycznego w czasie burzy pojedyncze pomiary gradientu przy pomocy klasycznych układów z sondami traktować można jedynie jako pomiary orientacyjne.



Błąd występujący przy pomiarze prądu z ostrza może wynikać głównie z bezwładności i niedokładności miernika oraz z pojemności i upływności układu pomiarowego. Oporność pojemnościowa oraz czynna izolacji układu była o kilka rzędów większa od oporności miernika; dlatego nawet przy szybkich zmianach prądu przy szacowaniu błędu można jej nie uwzględniać. Praktyczny czas ustalania wskazań galwanometru użytego do pomiaru prądu (przy zachowaniu oporności zewnętrznej za pomocą układu Ayertona nieco mniejszej od wartości krytycznej) był mniejszy od praktycznego czasu ustalania się wskazań układu do pomiaru gradientu i wynosił ok. 3 sek. Wskutek tego w przeprowadzonych pomiarach można dla stanów quasistacjonarnych zaniedbać bezwładność miernika. W stanach tych główną część błędu pomiaru stanowi błąd wynikający z niedokładności miernika, przy czym można przyjąć, że nie przekroczył on 5% mierzonej wartości.

Przy gwałtownych zmianach błąd pojedynczego pomiaru był znacznie większy i tak samo, jak w przypadku pola elektrycznego, nie można go wyznaczyć bez dodatkowych pomiarów. Wartość średnia wyników pomiarów dotyczących natężenia prądu, przy których występował ten sam gradient potencjału pola, nie jest obciążona dużym błędem. Przy odpowiednio dużej liczbie pomiarów błąd wynikły wskutek bezwładności układu i niejednoczesności odczytów, mający w dużej mierze charakter przypadkowy, został tu silnie ograniczony.

#### 7. KRYTYKA PRZEPROWADZONYCH POMIARÓW I WYMAGANIA DOTYCZĄCE DALSZYCH BADAŃ W WARUNKACH NATURALNYCH

Przy opisanych badaniach liczba pomiarów była zbyt mała. Nie przeprowadzono również jednoczesnych pomiarów takich wielkości, jak: ładunek przestrzenny, przewodność powietrza, czas życia oraz ruchliwość i liczba jonów lekkich i ciężkich, radioaktywność opadów, powietrza i gleby, liczba jąder kondensacji, zapylenie, opady. Z tych względów wykonane pomiary nie mogły zadowalająco wyjaśnić badanych zjawisk.

Dla wyjaśnienia wpływu wyładowań z ostrzy na rozkład pola elektrycznego przy powierzchni Ziemi w dalszych badaniach należałoby spełnić następujące postulaty:

1. Badania winny obejmować jednoczesne pomiary tych elementów elektryczno-meteorologicznych, które wyraźnie wpływają na rozpatrywane zjawiska.

2. Dalsze badania powinny być prowadzone za pomocą przyrządów umożliwiających jednoczesny pomiar mierzonych wielkości, posiadających przy tym jak najmniejszą bezwładność; serie pomiarowe powinny zapewniać dostatecznie dużą liczbę wyników na przeprowadzenie dokładnej analizy statystycznej.

3. Pomiary niektórych wielkości elektrycznych winny być przeprowadzone jednocześnie w różnych, odpowiednich punktach układu pomiarowego. Wskazane jest również, by badania te były dokonywane przy różnych prostych konfiguracjach terenowych tego układu.

#### WNIOSKI

1. Pomiary przeprowadzone w Świdrze potwierdziły obserwacje C. W. Lutz i W. C. Hutchinsona dotyczące występowania przeciwstawności kierunku prądu z wysuniętego nad powierzchnię Ziemi ostrza i kierunku gradientu potencjału pola elektrycznego mierzonego przy jej powierzchni. Oprócz tych efektów pomiary potwierdziły również występowanie opóźnienia się zmian prądu z ostrza względem odpowiednich zmian gradientu.

2. Rozważania nad interpretacją powyższych zjawisk prowadzą do wniosku, że prawdopodobnie w przypadku szybkich przebiegów opóźnienia te wywołuje głównie lokalne przeciwpole ładunku przestrzennego otaczającego ostrze, natomiast w przypadku zmian powolnych (quasistacjonarnych) o efekcie przeciwstawności decyduje głównie przeciwpole ładunku przestrzennego, rozłożonego w warstwach przyziemnych powietrza.

Całość pracy została wykonana w Zakładzie Wysokich Napięć Politechniki Warszawskiej. Kierownikowi Zakładu prof. drowi J. L. Jakubowskiemu pragnę na tym miejscu wyrazić podziękowanie za udzielone rady i wskazówki.

#### THE INFLUENCE OF POINT DISCHARGE CURRENTS ON THE EARTH'S ELECTRIC FIELD

##### Summary

Point discharge current, flowing through the point set up at height 19.2 m. above the ground, and electric field near the ground have been measured during the thunderstorms in Geophysical Observatory in Świder. The measurements showed that the changes of electric field were in an advance of the corresponding changes of point discharge current, and that during some long periods, lasting sometimes till 10 minutes, the current flowed in opposite direction to the direction of electric field measured simultaneously. This was in accordance with the observations published by C. W. Lutz (1940) and W. C. A. Hutchinson (1951), who attributed the above phenomena to space charge located in the layers of air near the ground. In the present article this interpretation has been extended.

Space charges can change the field not only near the ground, but also near the installed point. At fast changes the space charges, placed near the point, influence the changes of the point discharge current while their effect upon the field near the ground may be omitted. To these local charges could be referred the phenomena of the advancement of field changes ahead of the corresponding point current changes. In quasi-stationary states however the observed phenomena of the opposite direc-

tions of the measured field and current are brought about by the effect of space charge located in the layers of air near the ground.

Certain suggestions concerning the problems of lightning protection have been made. Influence of space charge on the electric field near the installed point (lightning rod), and near the ground contribute to the formation of upward streamers when the leader of lightning approaches the Earth.

At last a critical review of the measurements and some requirements about further investigations are given.

#### LITERATURA

1. В. Й. Арабаджи, Природа 1950 IV, с. 17.
2. Chalmers J. A., Atmospheric Electricity, Oxford 1949.
3. Chalmers J. A., Jour. of Atm. Terr. Phys., 1951.
4. Mc Eacheron, Mc Morris, Gen. Electr. Rev. 39, 495, 1936.
5. Я. И. Френкель, Теория явлений атмосферного электричества, Ленинград 1949.
6. М. Н. Герасимова, Изв. АН СССР, сер. геоф. 3—4, 1939, с. 627.
7. Hutchinson W. C., Quart. Journ. of Roy. Met. Soc., 1951, p. 627.
8. Jakubowski J. L., Arch. Elektr. II, zes. 1—2, 1953.
9. Lutz C. W., Beitr. f. Geoph. 47, 1941, s. 317.
10. Л. Лёб, Основные процессы электрических разрядов в газах (Перевод с английского) Москва 1950.
11. Mühleisen H., Zeitschr. f. Naturforsch. 6 a, 1951, s. 667.
12. Norinder H., Siksna R., Ark. f. Geofizik 16, 1953, s. 455.
13. Perry F. R., Webster S. H., Baguley T. W., Journ. of J. E. E. p. A., 1942, s. 201.
14. Schonland F. B. J., Proc. Roy. Soc., 1935.
15. Schonland F. B. J., The Flight of Thunderbolts, Oxford 1950.
16. Szpor St., Ochrona odgromowa, Warszawa 1953.
17. Й. С. Стекольников, Грозозащита промышленных сооружений и зданий, Москва 1951.
18. Whipple F. J., Scrase F. J., Met. Off. Geoph. Mem. 68, 1936.
19. Wormell T. W., Quart. J. of Roy. Met. Soc. 79, 1953, s. 3.
20. Wormell T. W., Quart. J. of Roy. Met. Soc. 1953, s. 474.



Stanisław MICHNOWSKI  
Institute of Geophysics  
of the Polish Academy of Sciences

## ELECTRIC FIELD VARIATIONS FOLLOWING LIGHTNING DISCHARGES MEASURED IN WARSAW AND ŚWIDER

### Abstract

A survey of electric field variations following lightning discharges observed in Warsaw and Świder is given and some influences on their forms are discussed. Local influences due to space charge produced by point discharges and splashing of the rain-drops were noticed as distinct in the region with high electric field intensities or with presence of rain.

Generally, the observed changes of character of recovery curves in relation to distance are similar to those obtained theoretically by Tamura and based on his model. This seems to confirm the conception of the transient character of recovery variations from electrostatic to current flow field distribution of thundercloud after lightning. The recovery times  $T'$  for conditions undisturbed by local influences are however shorter than in Tamura's calculations and do not correspond to the empirical relations reported by Smith. Considerable differences in the recovery time  $T'$  were distinguished for intracloud and cloud-earth discharges for observed heat thunderstorms. The average  $T'$  for cloud discharges was about 1.75 times shorter than the average  $T'$  for ground discharges occurring at the same distance from the flash (between 15–25 km). Some peculiar shapes of recovery curves are presented.

The recovery curves seem to be dependent on the stage of development of the thundercloud cells and the variable character of the cloud from one storm to another. The field variations after lightning, by which the recharging processes and electrical structure of the cloud may be manifested, need more attention and further study. Some preliminary remarks and suggestions are given.

## ZMIANY POLA ELEKTRYCZNEGO PO WYŁADOWANIACH ATMOSFERYCZNYCH OBSERWOWANYCH W WARSZAWIE I ŚWIDRZE

### Streszczenie

Podczas kilkunastu burz i ulew były wykonywane w Świdrze i Warszawie pomiary zmian pola elektrycznego za pomocą przyrządu o stałej czasu wskazań wynoszącej ok. 0,1 s. Jednocześnie prowadzono rejestrację prądu z ostrza oraz akustyczne i wizualne obserwacje wyładowań. Dodatkowo prowadzone były w Świdrze rejestracje ładunku przestrzennego, nasilenia opadu, kierunku i siły wiatru oraz innych elementów meteorologicznych. Układy pomiarowe zainstalowano w specjalnie wybranym rozkładzie przestrzennym na dwu wysokościach celem uchwycenia wpływu efektów lokalnych na przebieg zmian pola.

W artykule został podany przegląd rejestrowanych zmian pola po wyładowaniach elektrycznych. Starano się prześledzić dostępne dla obserwacji wpływy wywierane na przebieg zmian powrotu pola przez chmury burzowe i ich wyładowania oraz przez zakłócające efekty wizualne. W analizie posłużono się metodą zestawień odpowiednich parametrów charakteryzujących zmiany powrotu pola dla różnych warunków lokalnych i różnych odległości od wyładowań, rodzaju chmur, etc. Drugim możliwym podejściem było wykorzystanie porównań obserwowanych zmian powrotu pola ze zmianami wyprodukowanymi teoretycznie na podstawie przyjmowanych modeli chmur, przede wszystkim przepływowego modelu Tamury.

Jednoczesne pomiary kilku elementów w Świdrze potwierdziły wyraźnie występowanie silnych wpływów lokalnych pochodzących od czynników, jakie występują w warstwie przyziemnej powietrza, a co do działania, których nie ma jeszcze powszechnej zgody. Zostały stwierdzone duże wpływy wywołane ulewnym deszczem (rys. 12, 13) oraz bardzo wyraźny wpływ ładunków przestrzennych wytwarzanych przez wyładowania z ostrzy (rys. 7, 8, 10, 11). Oddziaływanie tych ładunków może być praktycznie pomijane przy niedużych wartościach gradientu potencjału. Uznano, iż spełnienie tego warunku daje praktycznie pomijalność również efektu elektrodowego. Różnicowanie lokalnych wpływów pozwoliło dać wskazówki co do właściwego wyboru miejsca obserwacji zmian powrotu pola przy badaniach elektrycznych właściwości chmur. Z tych i innych względów uznano za właściwe wybranie odległości między 12 i 25 km oraz wyłączenia okresów lub miejsc obserwacji z deszczem.

Rejestrowane różnice charakteru powrotu pola w zależności od odległości od wyładowania są na ogół podobne do odpowiednich zmian otrzymanych teoretycznie przez Tamurę na podstawie jego modelu (patrz rys. 14, 15, 16). Podobieństwo to przemawia za słuszością przyjętej przez Tamurę dotychczas kontrowersyjnej interpretacji zmian charakteru przebiegów powrotu pola w miarę oddalania się od wyładowania. Według tej interpretacji przebiegi powrotu pola odpowiadają przejściu rozkładu pola rozładowywanej chmury od początkowego rozkładu elektrostatycznego tuż po wyładowaniu, poprzez stany nieustalone do quasistacjonarnego rozkładu przepływowego dyktowanego właściwościami ośrodka. Czas  $T'$  powrotu pola do połowy amplitudy skoku  $E$  był jednakże znacznie krótszy niż w obliczeniach Tamury i nie odpowiadał empirycznej zależności podawanej przez Smitha. Również nie odpowiada teoretycznym krzywym Tamury wiele nietypowych (tj. nie zbliżonych do eksponentjalnych) form krzywych powrotu pola, które licznie występowały w Świdrze i Warszawie. Część z tych form nie była dotychczas przez nikogo omawiana (np. rys. 7, 8, 17) niektóre natomiast (np. rys. 19, 20) nie zyskały należytej uwagi.

Wobec spotykanych rozbieżności wydaje się konieczne wprowadzenie uzupełnień i nowych założeń do modelu przepływowego Tamury.

Interesujące spostrzeżenia przyniosły w Warszawie i Świdrze badania różnic czasu powrotu pola dla ujemnych i dodatnich skoków pola po wyładowaniach. Odpowiadające znakom skoków różnice szybkości powrotu pola obserwowano uprzednio jako raczej niewielkie. Dla wartości średnich rozpatrywanych dotychczas łącznie dla różnego rodzaju burz były one notowane w wysokości około 15%. Podobnej wielkości średnie różnice były obserwowane w Świdrze i Warszawie. Uderzająco duże różnice ujawniły się wówczas, gdy do porównań wzięto wyładowania z wyłączeniem burz frontalnych i intensywnych burz termicznych. Podczas paru burz termicznych średni czas  $T'$  był dla skoków ujemnych około 1,75 razy krótszy niż przeciętny czas  $T'$  dla skoków o znaku dodatnim. W jednym i drugim przypadku dotyczy to wyładowań z odległości pomiędzy 15 i 25 km.

Używając ogólnie znanej metody analizy znaku skoków pola w funkcji odległości od wyładowania, można było przypisać obserwowanym burzom cieplnym stosunkowo prostą strukturę o dodatnim tylko spolaryzowaniu chmur oraz przyjąć, że dla odległości przekraczających odległość odwrócenia znaku pola skokom o znaku dodatnim odpowiadają wyładowania doziemne, zaś o znaku ujemnym – wyładowania w chmurze. Otrzymane różnice wykazują wobec tego występowanie w obserwowanych burzach termicznych znacznie dłuższego czasu powrotu pola (o około 75%) dla wyładowań doziemnych niż dla wyładowań w chmurach i rozszerzają dotychczasowe w tej sprawie informacje. W dawnych pracach co prawda wskazywano na możliwość większego nieco czasu powrotu pola dla wyładowań doziemnych niż dla wyładowań w chmurach, lecz ogólnie występowania tego nie wykazano, poza paru pojedynczymi przypadkami indywidualnymi, w których dostępna była identyfikacja wizualna rodzaju wyładowań. W powojennych badaniach zmian pola nie spotyka się już na ten temat dalszych danych, co wydaje się raczej dziwne zważywszy znaczenie tego rodzaju spostrzeżeń.

Pomiary w Świdrze i Warszawie częściowo potwierdzają występowanie cykliczności w nasileniu częstości wyładowań w czasie burz termicznych. Wydaje się, iż w pewnych przypadkach możliwe staje się rozróżnienie maksymalnego nasilenia częstości wyładowań poszczególnych komór burzowych. Nie udało się prześledzić nawet przybliżonej wyraźnej zależności krzywych powrotu pola od stopnia rozwoju komór burzowych i od zmiennego charakteru poszczególnych burz. Mimo braku wystarczającej statystycznie liczby przypadków oraz braku możliwości dokładniejszej oceny występowania stopnia rozwoju poszczególnych komór (brak obserwacji radarowych i lokalizacji wyładowań) wydaje się jednak, że stosunek  $T'$  do częstości wyładowań nie jest w przybliżeniu wielkością stałą i zależy co najmniej od rodzaju burz. Badania odpowiednich zależności związanych z procesami regeneracji ładunków i z trudnymi do określenia własnościami struktury elektrycznej chmur wymagają daleko idących studiów. W sprawie rodzaju i zakresu wstępnych badań zostały sformułowane początkowe uwagi i sugestie.

Full text in the Supplement

Stanisław MICHNOWSKI  
Institute of Geophysics  
Polish Academy of Sciences

## OBSERVATIONS OF ELECTRIC FIELD VARIATIONS FOLLOWING LIGHTNING DISCHARGES

### Summary

Some properties of the electric field variations following lightning discharges, observed at Świder and Warsaw as well as at Bracknell, are briefly examined. In order to distinguish the local effects on the electric field, simultaneous observations of space charge, point discharge, wind and precipitation are also taken in to account. Excluding the cases of distinct local disturbances the recovery times  $T'$  are related to the estimated distance  $D$  of the flash and to the kind of discharges.

The values of  $T'$ , similarly to the results of Smith and Malan, were found to be much smaller than those calculated on the basis of the current flow models of Tamura and others, although in the observed clouds, at least of some thunderstorms over Świder, the altitudes of charge centres did not exceed the values presented in Tamura's model. The observed discrepancies between the theoretical and experimental values of  $T'$  are thus very difficult to explain without a modification of the basic assumptions of the mentioned models. For instance it appears to be necessary to introduce in the current-flow models the higher values of conductivity, whatever kind it may be, in the cloud than in its environment.

The properties of recovery curves were observed at Bracknell in the range of distances  $D$  larger than 100 km. For the distances exceeding at last approximately 40 km the values of recovery time  $T'$  were found to be at the average distinctly smaller for the negative jumps than those for the positive jumps of the electric field at approximately the same distances. In Świder and Warsaw additional visual observations and an analysis of field jumps enabled in some cases roughly to determine the kind of discharges responsible for the recorded recovery field variations. In some air-mass thunderstorms it was thus noticed that average values of  $T'$  for cloud discharges were distinctly shorter than the average  $T'$  for ground discharges occurring approximately at the same distance from the flash.

Further statistical studies and a wider range of simultaneous observations of thunderclouds and their discharges are required.

1. Introduction. To this day no satisfactory notions on segregation and accumulation of electric charges as well as their dissipation in thunderclouds were collected. Data on these and other processes were determined up to now mainly on the basis of observations of electric field variation after lightning discharges. Considering the numerous factors affecting the course of changes in the recovery of the field, their interpretation from a single item is rather difficult and often not sufficient to be conclusive. However, even simple observations of field recovery variation at one point seem to be worth of continuation



if only for comparison of results obtained for various thunderstorms, or to test of the adequacy of electrical thundercloud models used in theoretical considerations.

The aim of this paper is to present and to discuss briefly some of the results of observation of recovery field variations, using additional measurements, namely:

1. of few electrical and meteorological elements,
2. of the distance of discharges from the observation point.

Measurements were carried out in Warsaw and Świder. Moreover, a series of observations was made at Bracknell, complemented by results obtained from the British Spherics Stations (Cathode Ray Direction Finders).

2. Instrumentation and measurements. The electric field was measured by means of field mills. The actual adjustment time of the device used in Warsaw and Świder amounted to 0.3 sec, at maximal sensitivitiy — 3 V/m for one scale division. The adjustment time of the field mill at Bracknell amounted to 0.15 sec, at maximal sensitivitiy 0.1 V/m per scale division. The additional ring above the field mill head, fed by regulated compensating voltage, enabled to utilize maximal sensitivitiy in case of occurrence of considerable, but slowly varying potential gradient values. The range of observation of electric field jumps and recovery variations following lightning discharges could be therefore extended to the distances exceeding 100 km.

Additional measurements at Świder included: the point discharge current, the space charge, the speed and direction of the wind, as well as precipitation and other meteorological elements [10]. The field mill and the cage of the space-charge measurement apparatus were installed at low height above the earth's surface, while the point (needle) was placed at 23 m above ground. The arrangements were laid out in a clearing of the wooded area of the Observatory, at about 15 m distance from 10 m high trees.

The same field mill had been used previously in Warsaw at 24 m elevation, the discharge point being at 36 m height.

At Bracknell, the head of the field mill was placed at about 4 m height. Similarly as at Świder, the field mill indications were reduced at Bracknell to the flat ground surface. The simultaneous registration of spherics at Bracknell Central Station enabled comparison of the instant of sudden field changes with those corresponding to spherics which were evaluated by the network of CRDF. However, it was difficult in many cases to correlate practically the determined distances of discharges with the field jumps, produced by lightning discharges, recorded by the field mill. The obtained means of group situations of several discharges gave merely an approximate evaluation of average distance, recorded with a rather large error. The direction error for one station amounts to about 1° [5]. In some cases additional visualacoustic information was obtained from the network of meteorological stations situated within a 200 km radius.

3. Local influences. In order to distinguish secondary local influences prevailing at the observation station, from those of clouds and other factors, a simple experimental approach was used at Świder, involving measurements at two levels.

Field variations, measured close to the ground and indicated by point discharges at

23 metres above ground—similarly to previous observations — show that there are sometimes large concentrations of local space charge, which vary with time [10]. This local space charges are able to modify the course of recovery field variations. Example of such modification was observed distinctly in Świder at the jumps of the electric field from considerably negative to large positive values. In these cases (Fig. 1) the positive values return fast at first but slow down when approaching zero value. In the range of negative values the sequence is reversed. It appears that this effect of recovery deflection is caused by a space charge produced by point discharges before and after the change of field direction. The space charge formed after this change has the opposite sign to the charge produced before it. This opposite space charge reduces the field owing to neutralization of the space charge existing before lightning discharge. On decrease of the field to a magnitude below the critical value, at which the point discharge ceases, this neutralizing — recovery accelerating — influence ceases too, causing deflection of the curve. In Bracknell and Warsaw that kind of recovery form was indistinct and seldom observed. This suggests that the described recovery variation has a rather local character due to the configuration of the place of measurement (trees etc.).

The recordings made at Świder show, similarly to cases reported by Smith [13], considerable local modifications of the recovery field during heavy showers. The recovery times  $T'$  (defined as the time of recovery to half value of magnitude of field change caused by lightning) obtained in some cases of heavy rain at Świder were very short [10]. The shape of the first stage of the recovery curve observed then formed an almost straight line. This effect, ascribed by some authors to the splashing of raindrops on the ground [17], needs further confirmation. When rainfall was slight, the shape of recovery curves did not differ much from those usually observed for corresponding distances.

Another kind of influence of the space charge on recovery variations is shown by irregularities and fluctuations occurring sometimes at high electric field values. The observed cases are in agreement with results and suggestions of Smith [13].

The fluctuations (electrical agitation [6]) occur also at small values of the electric field. They often limit the range of possible observations of recovery field changes produced by very distant flashes.

In the following considerations, cases with distinct local disturbances were not taken into account.

4. Properties of the recovery field variations in relation to distance. It is remarkable that recovery time of the electric field after lightning depends on the distance

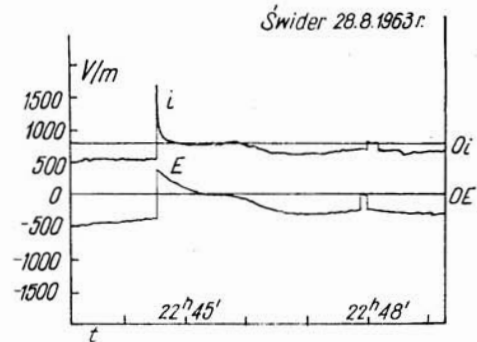


Fig. 1. An example of the shape of recovery field variation during a near thunderstorm at Świder:  $E$  — electric field,  $i$  — point discharge current



$D$  between the flash and the place of observation. In his analysis Y. Tamura [14] explains this dependence by the use of current flow interpretation of recovery variation in lieu of the electrostatic ones used previously. Theoretical recovery curves, calculated by Tamura on basis of his current-flow model of thundercloud, show a shortening of the recovery time with increase of distance and have shapes similar to the experimental curves observed earlier by T. W. Wormell [16]; Y. Tamura [14] and others.

L. Smith [13] noticed, however, in thunderstorms observed over Florida that the agreement between theory and experiment is only qualitative and pointed out that recovery times are shorter than those calculated by Tamura. Similar findings were given by P. J. Malan [9] for thunderstorms observed in South Africa (at distances  $D$  extending to 100 km). Further data about the properties of recovery curves in relation to the known large distance  $D$  seems to be desirable for various kinds of thunderclouds, eg. for clouds whose charge centres have lower altitudes than those over Florida and South Africa. In the precedent numerous observations of the electric field in temperate zones were most often lacking data regarding the location of the discharges (except rough estimates over short distances), or, if estimates of large distances  $D$  were performed [12], the recovery properties were not taken in account.

Studies of recovery time characteristics including the large distances  $D$  seem to be of interest in view of the controversial opinions about a basic parameters in the models of electric structure of thundercloud. Some of them, for instance the conductivity inside the cloud, the shielding layers at the boundary of the cloud, are assumed mainly on the ground of theoretical premises. Any farther factual information regarding the latter would be valuable owing to the present lack of direct experimental data which is evident despite the considerable measurement efforts made in the past two decades.

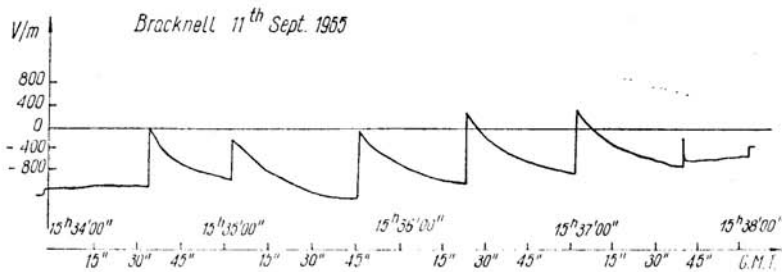


Fig. 2. Recovery field variation for a nearly thunderstorm at Bracknell

Let us look over some features of the behaviour of recovery times observed at Świder, Bracknell and in Warsaw.

Although the shapes of recovery field variations belong to various flashes, they tend to point to a change of character of the recovery curve with increasing distance from the flash. A typical example of the differences in, and the general character of, the shape is given in Fig. 2 and 3 for short and long distances, respectively. The former represents

recovery curves (of the mature stage of thundercloud) at distances of less than 5 km, the latter at distances 35 - 50 km exceeding considerably the distance between the observed lightning and the reversal point. The recorded differences in the character of field recovery are in general similar to those observed by Tamura [14], Smith [13], and are in agreement with the current flow theory used by Tamura. Some of the quantitative properties of recovery field variations do, however, not conform with predictions made on basis of Tamura's model, or other current flow models<sup>1</sup>, which use the common assumption about equal or smaller conductivity inside the cloud than in its environment.

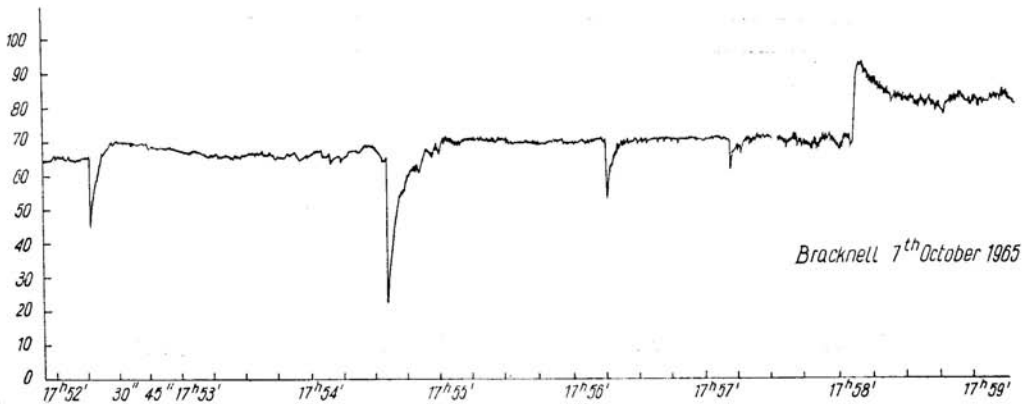


Fig. 3. Recovery field variations for a distant thunderstorm at Bracknell

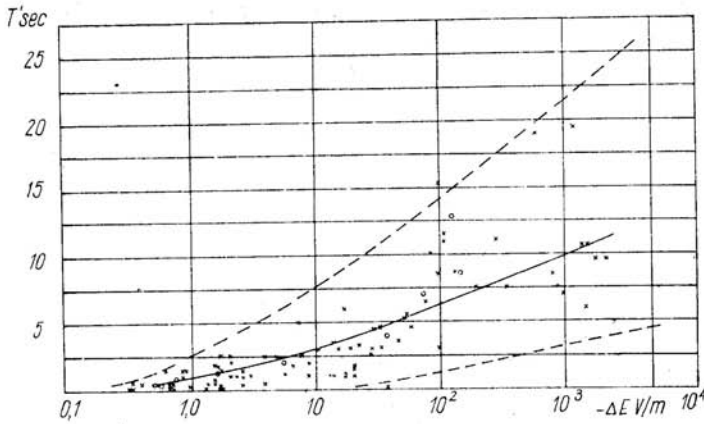


Fig. 4. The recovery time  $T'$  and magnitude of positive field changes  $\Delta E$

Fig. 4 and 5 give the values of time  $T'$  in relation to the magnitude of positive and negative  $\Delta E$  field changes. Wide scattering of points is there observed, though the continuous line, corresponding to mean values, illustrates the trends in  $T'$  variance, depending on the amplitude values of jump  $\Delta E$  and its sign.

<sup>1</sup> If the altitudes of their main dipole charge centers do not differ very much as it usually happens.



In table I, where the values of  $T'$  are given in relation to the distance  $D$ , it is seen also that  $T'$  diminishes considerably with distance for positive as well as negative  $\Delta E$  changes. The ratio of decrease is here, with relatively small distances (up to about 50 km), larger than for wider distances.

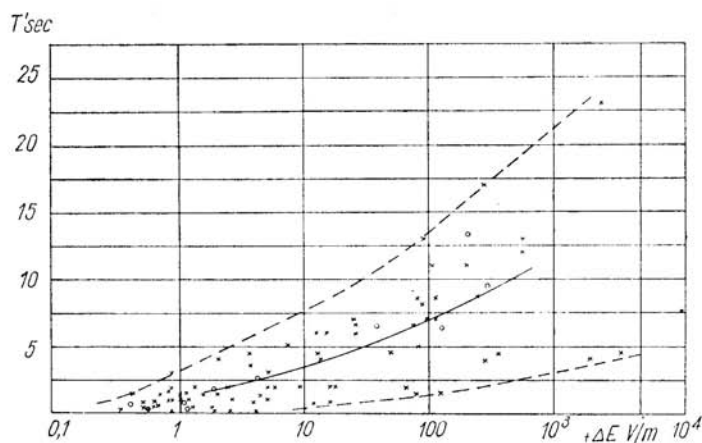


Fig. 5. The recovery time  $T'$  and magnitude of negative field changes  $\Delta E$

Table I

Variation of recovery time  $T'$  with distance at Bracknell for positive and negative field changes  $\Delta E$

Distance (km)	0 - 20	20 - 50	50 - 100	100 - 150	150 - 200
$T'$ (sec) (+)	11.5	6.5	2.6	1.9	0.98
$T'$ (sec) (-)	10	6.7	2.02	1.27	0.77

Generally speaking, at least for distances beyond approximately 16 km, the values of recovery time  $T'$ , and values of the relaxation time  $T^2$ , are found to be much smaller than those evaluated from the current-flow models of Tamura and others. It is characteristic that in some observed individual thunderstorms the discrepancies reached or even exceeded, the differences reported by Smith and Malan, although on an average they are somewhat smaller than those noted in Florida and South Africa. Thus, for instance at thermal thunderstorm<sup>3</sup> over Świder on 7 August 1963 the mean value of  $T'$  for distances of about 40 km was recorded 2.2 sec while Smith recorded at on average 2 - 3 sec and Tamura computed 10 sec. The average  $T'$  values, for all nonfrontal thunderstorms observed

<sup>2</sup> I.e. the time it takes the field to recover to 0.63 of  $\Delta E$  in the cases the often observed almost exponential forms of recovery curves.

<sup>3</sup> Of which the top level was estimated, on the basis of aerological soundings in Legionowo and synoptical situation, as not higher than 8 km.

over Świder in late summer and autumn, were larger than those of the August 7 Świder storm, but yet much smaller than Tamura's values, namely eg 8 sec observed for approximately 12 km and 13 sec calculated for corresponding distances.

It may be noticed that the values of mean electrical moment for discharges during the mentioned thunderstorms over Świder were about 40 C km, and at Bracknell — for all observed thunderstorms — about 100 C km, Fig. 6. Similarly as Smith, we do not

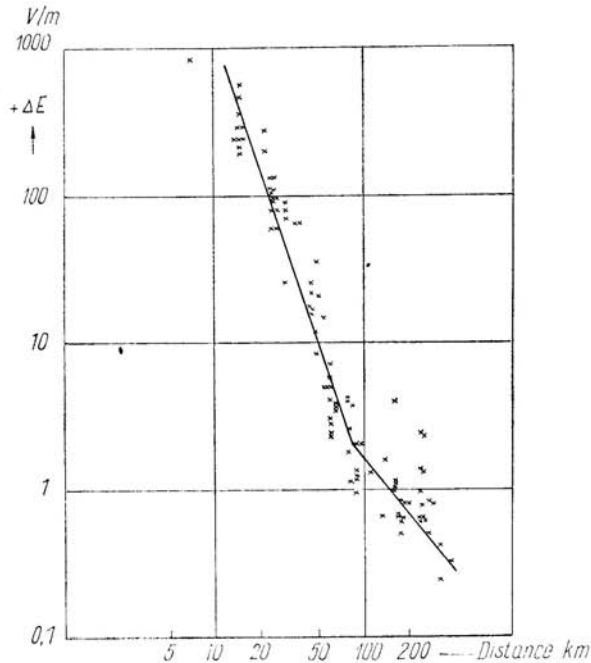


Fig. 6. The magnitude of positive field changes  $\Delta E$  in relation to the distance  $D$  at Bracknell

know the values of charge and the height of their centres in the observed clouds. Nevertheless it is possible now to assume that the altitude of the charge centers and corresponding values of conductivity, particularly in autumn thunderstorms at Świder, should not be higher than those accepted in Tamura's calculations. Considering that the time properties of recovery field variations depended mainly on the conductivity distribution in the medium, (e.g. conductivity of the cloud environment at the height of charge centers [14] or of the cloud top [11]) and conductivity of the cloud we might expect the observed recovery times to be rather larger than the corresponding values calculated from Tamura's model.

It is not the purpose of this paper to give the quantitative theoretical explanation for observed properties of recovery curves. However, it seems to be possible preliminarily to notice that the observed discrepancy may indicate the necessity of modification of the basic assumptions used in the mentioned current-flow models. For instance, neglecting

the differences in vertical distribution of conductivity in atmosphere for various regions, it seems necessary to assume the cloud conductivity, whatever kind it may be, higher than the conductivity in the cloud environment.

Convective turbulent redistribution of charge within a cloud after a lightning discharge may be introduced here as one of the important factors responsible for the short relaxation time of recovery field variations. The advisability of revision of the commonly used opinion [15, 4, 14, 7], that the conductivity values inside the cloud are smaller than or equal to those outside the cloud, is consistent with an offer additional support for the theoretical considerations of G. Freier [3], J. Latham and J. B. Mason [7], S. Colpate [2].

5. Recovery field variations in relation to the kind of discharges. Recently, the opinion is often put forth that recovery times are in general the same for both types of flashes, intra-cloud and cloud-ground discharges [3,9]. Earlier investigations (e.g. by Wormell [16]) had shown that there are differences in recovery time  $T'$  for positive and negative jumps of field.

Similarly, as it is seen in Fig. 4 and 5 as well as in Table I, observed recovery times for positive sudden field changes are on the average about 10% longer than the values for the respective negative jumps. Merely in the range of 20 - 50 km, the  $T'$  values for positive and negative  $\Delta E$  differ insignificantly from the values of  $T'$  for positive  $\Delta E$ , being distinctly smaller.

These data, however, can not indicate the differences in recovery time for different kinds of discharges, because positive as well as negative field changes can include flashes to the earth and intra-cloud or cloud-cloud discharges.

For distant thunderstorms, with the exclusion of frontal ones, differences in  $T'$  were observed at Świder more distinctly than the average  $T'$  differences evaluated for all thunderstorms. This fact drew our attention to the local air-mass storms, particularly to weak ones.

We did not always disposed enough visual and acoustical observations of the kind of discharge and therefore we tried to supplement these observations with the simple analysis of the sign of the sudden field changes in relation to their magnitude.

In some air-mass thunderstorms it was noticed that the ratio of the numbers of positive to negative field changes diminishes with the decrease of the magnitude  $\Delta E$  i.e. with increase of distance  $D$ ; beginning from with 125 V/m, the ratio remains almost constant with increase of distance. Neglecting in first approximation discharges of other types than cloud-ground and intra-cloud ones, it was possible to assume that the thunderclouds in the considered inter-mass storms have at an average a simple dipole structure and positive polarity. On this assumption we may treat the sign of field changes as a rough indication of the type of discharge.

Records in Warsaw and Świder show that for some distant air-mass thunderstorms the average recovery times  $T'$  for positive sudden field changes are distinctly larger than the average recovery time for negative changes, both at the same range of distance and observation time. The average time  $T'$  for positive changes was e.g. 7.8 sec. for the range



of  $\Delta E$  values between 250 V/m and 25 V/m, the average time  $T'$  for negative changes over the same  $\Delta E$  range was about 4.5 sec.

These data may indicate for air-mass thunderstorms observed in Świder considerably longer average recovery times for ground discharges than for intracloud discharges. This notice was corroborated by direct visual observation of the kind of discharges made later in Warsaw in 1968. In individual case it is, however, not possible to tell from examination of the recovery time whether the recovery variations were caused by a flash to earth or not. Nevertheless, differences between recovery curves for ground and intra-cloud discharges appear to be characteristic and should be the subject of further research with an extended complex range of observation.

6. Recovery field variations, kind of thunderstorm clouds and the stage of their development. The great dispersion of characteristic values of recovery field variations, for the same distances, may be caused by many factors related to the electric properties of clouds and their environment. When a given kind or an individual case of thunderstorm is studied, it is found that sudden jumps of the electric field and following them recovery variations differ also in lightning flashes of approximately equal distances  $D$ . In some cases the characteristic values of recovery variations, eg  $T'$ , appear then to be related to various development stages of the cloud.

In the first stage of the lightning activity, and especially in thunderstorms of low intensity, the recovery time  $T'$  was observed quite often much longer than the corresponding values for the mature stage of thundercell activity at approximately the same range of distance. Examples of exceptionally long recovery times  $T'$  (about 60 sec) represented by almost straight lines were observed in the case of flashes occurring after a long time  $T_1$  following the preceding discharge. In some individual cases of thunderstorms, the shorter is  $T_1$ , the shorter appears to be recovery time  $T'$ . The data collected so far are insufficient to prove the existence of general distinct correlations between  $T'$  and  $T_1$ , as well as even in a larger extent between the  $T'$  and the development stage of individual isolated thundercloud or thundercloud cells. Parameters of the physical processes occurring in thunderclouds and lightning discharges show considerable statistical dispersion; therefore, the magnitudes of characteristic data of recovery variations should also be examined statistically. The interrelations of the many factors involved in recovery processes make it, however, difficult to study successfully field variations after lightning discharges without supplementing it by a further extension of the range of observations.

7. Conclusions and preliminary suggestions. 1. Generally speaking, the character of observed recovery field variations in respect to distance is similar to the variations derived theoretically by Tamura from his current-flow model. Some values of characteristic parameters ( $T'$ ,  $T$ ) of recovery curves do not agree with the calculation made on the basis of Tamura's and other models; thus for instance, the recovery times are considerably shorter than those derived from calculations. It seems necessary to introduce in models of thundercloud electrical structure much higher electric conductivity values inside the cloud than those prevailing in its environment.

2. Considerable differences in recovery time  $T'$  were observed for intra-cloud and cloud-earth discharges particularly in autumn air-mass thunderstorms at Swider. The average  $T'$  for cloud discharges was, for some of these storms, about 1.75 times shorter than the average  $T'$  for ground discharges occurring at about the same distance from the flash (between 15 and 30 km).

3. Among the local effects to be considered in the observation of recovery field variation, most effective are the space charges produced by point discharges and the splashing of raindrops on the ground. With distant flashes the disturbances due to electric field fluctuations limit the range of observations.

4. The forms of recovery field variation appear to be dependent to some extent on the developmental stage of the thunderclouds.

Acknowledgement. The author wishes to express his best thanks to Prof. J. B. Mason for his remarks and the availed possibility of measurements in Bracknell with the help of records of the British Spherics Stations.

Manuscript received by Editor: February 21, 1969.

#### REFERENCES

1. Chalmers J. A., *On the conductivity of the air in thunderstorms*, Journ. Geoph. Res., **67**, (1964).
2. Colgate S. A., *The conductivity of Electrostatic Plumes and Electrostatic Turbulence in Insulating Fluids*, submitted on the IV Conference of Atmospheric Electricity, Tokyo, 1968.
3. Freier G. A., *Conductivity of the air in thunderstorms*, Journ. Geoph. Res., **67**, 4683, (1962).
4. Gunn R., *Diffusion charging of atmospheric droplets by ions and the resulting combination coefficients*, J. Meteorol. **11**, 1954.
5. Horner F., *The accuracy of the location of sources of atmospherics by radio direction finding*, Proceed. of IRE, Part III, **101**, (1954) 333 - 370.
6. Israël H., *Atmosphärische Elektrizität*, Leipzig, 1961.
7. Kasemir H. W. — *The Thundercloud*, in *Problems of Atmospheric and Space Electricity*, ed. S. C. Coroniti, Amsterdam, 1965.
8. Latham J., Mason B. J., *Electrical Charging of Hail Pellets in a Polarizing Electric Field*, Proc. Roy. Soc. A, **266**, (1962).
9. Malan D. J., *Physic of the Thunderstorm Electric Circuit*, Journ. of Franklin Institute, June 1967.
10. Michnowski St., *Zmiany pola elektrycznego chmur burzowych w warstwie przyziemnej powietrza w Świdrze i Warszawie*. Materiały i Prace Zakładu Geofizyki PAN, **25**, (1968).
11. Philips B. B., *Ionic Equilibrium and the Electrical Conductivity in Thunderclouds*, Monthly Weather Review, **95**, 12, (1967).
12. Pierce E. T., *Electrostatic Field Changes due to Lightning Discharges*, Quart. I. R. Met. Soc. **81**, (1955).
13. Smith L., *Electric field studies of Florida thunderstorms*, Rec. Adv. in Atm. El. ed. L. G. Smith, 1958.
14. Tamura Y., *An analysis of electric field after lightning discharges*, Journ. of Geom. a. Geoelectr., **6**, March, (1954).
15. Wilson C. T. R., *A theory of thundercloud electricity*, Proc. Roy. Soc. London A, **236**, (1956).
16. Wormell T. W., *The effect of thunderstorms and lightning discharges on the Earth's electric field*, Philos. Trans. A. **238**, (1939) 249.
17. Wormell T. W., Adkins C. J., *Effects of splashing of raindrops at the ground*, Rec. Adv. in Atm. El. ed. L. G. Smith, 1958.



OBSERWACJE ZMIAN POŁA ELEKTRYCZNEGO PO WYŁADOWANIACH  
ATMOSFERYCZNYCH

## Streszczenie

Przedstawiono i rozpatrzono niektóre właściwości krzywych powrotu pola elektrycznego po wyładowaniach atmosferycznych obserwowanych w Warszawie i Świdrze oraz w Bracknell. Wyniki obserwacji pola przeprowadzonych w Polsce zostały uzupełnione rezultatami jednoczesnych pomiarów ładunku przestrzennego, prądu z ostrza, nasilenia wiatru, opadu oraz wynikami wizualnych obserwacji wyładowań. Badania w Bracknell obejmowały oszacowanie odległości obserwowanych wyładowań uzyskane za pomocą brytyjskiej sieci radio-goniometrycznych stacji.

W celu wyeliminowania z dalszych rozważań przypadków zmian powrotu pola z wyraźnymi zakłóceniami miejscowymi rozpatrzono wpływy warunków meteorologicznych i elektrycznych występujących przy powierzchni ziemi (np. rys. 1). Najbardziej efektywne z nich wydają się być oddziaływania ładunków elektrycznych wytwarzanych przez wyładowania z ostrzy i rozbryzg kropel deszczu oraz wpływy turbulencyjnej wymiany powietrza, która przy dużych odległościach od wyładowań ogranicza zakres obserwacji.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że ogólny jakościowy charakter zmian pola po wyładowaniach (rys. 2, 3) jest zbliżony do charakteru zmian otrzymanego w analizie Tamury. Okazało się jednak, że wartości czasu powrotu pola  $T'$  — podobnie jak to miało miejsce w badaniach Smith'a i Malana — były znacznie mniejsze niż wartości obliczone na podstawie modelu Tamury. Dotyczy to i innych modeli przepływowych, w których przyjmowane były wartości przewodnictwa w chmurze równe lub mniejsze niż odpowiadające im wartości w otoczeniu chmury. Wyniki te są charakterystyczne z tego względu, że wysokości centrów ładunków w obserwowanych chmurach burzowych, przynajmniej podczas niektórych burz w Świdrze, były nie wyższe niż wysokości przyjęte w modelu Tamury. Wyjaśnienie obserwowanych różnic między teoretycznymi i eksperymentalnymi wartościami  $T'$  wymaga zasadniczej zmiany lub dużych modyfikacji podstawowych założeń przyjętych w wymienionych modelach. Na przykład wydaje się konieczne wprowadzenie do tych modeli dużo większych wartości przewodnictwa w chmurze niż w otoczeniu chmury.

Pomiary w Bracknell, dzięki zastosowaniu metody kompensacyjnej i przyrządu o dużej czułości, znacznie rozszerzyły możliwości obserwacji zmian powrotu pola powyżej 100 km. Stwierdzono, że w przypadku dużych odległości, począwszy od ok. 40 km, wartości czasu  $T'$  dla ujemnych skoków pola były wyraźnie mniejsze niż dla skoków dodatnich odpowiadających temu samemu przedziałowi odległości  $D$  (Tabl. 1). W Warszawie i Świdrze obserwacje różnic czasów  $T'$ , w zależności od znaku skoku pola, zostały uzupełnione danymi wizualnymi i w pewnych przypadkach analizą skoków pola. Uzyskane dodatkowe informacje pozwoliły orientacyjnie określić rodzaj wyładowania wywołującego zarejestrowane zmiany powrotu pola. Podczas niektórych burz, zwłaszcza burz wewnętrzmasowych, zanotowano, że przeciętne czasy  $T'$  dla wyładowań doziemnych były wyraźnie dłuższe niż dla wyładowań w chmurze przy tych samych w przybliżeniu odległościach.

Różnice te, jak i różnice własności zmian powrotu pola, zależne przypuszczalnie od rodzaju chmury burzowej i stopnia jej rozwoju, wymagają dalszych studiów oraz rozszerzenia jednoczesnych obserwacji chmury i jej wyładowań.

НАБЛЮДЕНИЯ НАД ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПОСЛЕ  
АТМОСФЕРНЫХ МОЛНИЙ

## Резюме

В настоящей статье рассматриваются некоторые свойства кривых восстановления электрического поля после молний, наблюдаемых в Варшаве и Обсерватории Свидер, а также в Бракнелль. Результаты проведенных в Польше наблюдений электрического поля были дополнены результатами

одновременных измерений пространственного заряда, тока из острия, скорости ветра, осадков и оптических наблюдений молний. Исследования в Бракнелль заключали оценку расстояния наблюдаемых молний, полученных на английской сети радиогониометрических станций.

С целью исключения из дальнейших рассуждений случаев изменений восстановления поля с чёткими местными помехами, рассмотрено влияние на эти изменения метеорологических и электрических условий вблизи поверхности Земли (рис. 1). Как кажется, самыми эффективными причинами помех являются воздействия электрических зарядов, возникающих вследствие разряднения острием, разбрызга капель дождя и турбулентного обмена воздуха, который при больших расстояниях от молний ограничивает предел наблюдений. На основании выполненных измерений установлено, что общий качественный характер изменений поля после молний (рис. 2, 3) близок к характеру изменений, полученного в работе Тамуры. Однако оказалось, что значения времени восстановления поля  $T'$  (подовно как и в исследованиях Смиса и Маляна) были значительно меньше, чем значения, рассчитанные на основе модели Тамуры. Это относится и к другим моделям, для которых предположено, что значения проводимости внутри грозового облака равны или меньше соответствующих значений вне облака. Эти результаты являются интересными, поскольку высоты центров разрядов в наблюдаемых грозовых облаках, по крайней мере во время некоторых гроз, зарегистрированных в Свидре, были меньшими чем предполагаемые в модели Тамуры. Чтобы объяснить наблюдаемое расхождение между теоретическими и полуленными из опыта значениями  $T'$ , нужно принципиально изменить или очень модифицировать основные предположения, принятые в выше указанных моделях. Например, кажется необходимым принять в этих моделях гораздо большие значения проводимости в облаке, чем вне облака.

Благодаря использованию компенсационной методы и прибора, обладающего большой чувствительностью, измерения в Бракнелль дали возможность увеличить район наблюдений восстановления поля до 100 км и больше.

Из таблицы I видно, что в случае больших расстояний, начиная с 40 км, значения времени  $T'$  для отрицательных изменений поля были определенно меньше, чем значения  $T'$  для положительных изменений в этом же интервале расстояний. Наблюдения разниц времени  $T'$  в зависимости от знака изменения поля, проведенные в Варшаве и Свидре, были дополнены визуальными данными и в некоторых случаях анализом изменений поля. Полученные дополнительные информации помогли ориентировочно определять тип молнии, вызывающей регистрируемые изменения восстановления поля. Во время некоторых бурь, особенно внутрениомасовых, отмечено, что средние значения времени  $T'$  для разряднений между облаками и Землей были значительно больше, чем для молний в грозовом облаке на приблизительно одинаковых расстояниях.

Эти разницы и разницы свойств изменений восстановления поля, которые зависят вероятно от рода грозового облака и степени его развития, требуют дальнейших исследований и расширения одновременных наблюдений над облаками и молнией.



Stanisław MICHNOWSKI  
Institute of Geophysics  
Polish Academy of Sciences  
Warszawa

## ELECTRIC FIELD VARIATIONS IN A MEDIUM WITH VARIABLE CONDUCTIVITY, PRODUCED BY A POINT CHARGE ABOVE A CONDUCTIVE PLANE

### Summary

The transient time variations of electric field in unhomogenous medium were examined theoretically. The general equations and their simplified solutions were derived for the case of a suddenly discharged pole embeded in a medium with exponentially variable conductivity. The pole was treated as a point charge situated above the highly conductive plane.

The results obtained differ from those calculated by Tamura and by Kasemir in spite of similar physical models used. This difference is caused mainly by new initial conditions adopted in the present analysis.

For the large distances from the place of observation to the discharged pole and for small values of time, the obtained simplified solution of general equations makes it possible to show analytically a decrease of recovery time of field variation with the growing distance, and to ascribe the behaviour of these variation to the effect of space charge formed in the medium. The decrease of recovery time in the range of great distances was observed experimentally and could not be explained analytically by any previous theory.

1. Introduction. The lower atmosphere is not electrically homogeneous. This fact, found experimentally, should be taken into account in theoretical models of the time-space distribution of the electric field in the atmosphere. The need for this is especially evident in studies on the slow changes of the field produced by thundercloud, and particularly, on the field changes observed at the earth's surface after lightning discharges.

Holzer and Saxon [7] introduced into the electric model of a thundercloud the assumption that the electric conductivity of the air in the lower atmosphere increases exponentially with height. Under this assumption they obtained the current-flow distribution of the field for the quasi-stationary state and noticed that it differs substantially from the electrostatic one. Tamura extended the application of variable conductivity distribution on the calculations of field changes in the nonstationary state after lightning. Kasemir [14] attempted to give a general theory of transient variation of field in inhomogeneous medium. According to the analysis of Tamura [24] and analogical theoretical conclusions given by Kasemir [14], the general character of the recovery field variation after lightning



results from the natural decay of the lightning charges and the screening effect of the space charge which forms because of the increase of conductivity with altitude.

Tamura explained some differences in the shape of recovery curves, his analysis, however, do not yield quantitative results, which are consistent with experimental data [24], [18], [20]. The inconsistency is very distinct especially at large distances  $r$ , from the observation place to the discharge and for this range it can be explained analytically by none of previous theories.

The present paper is an attempt to get a new general method for describing the time changes of the field after a discharge, for a simple model of thundercloud in the medium of variable conductivity. We do not intend to present now a broad numerical computation and to compare them with experiments. What we try now to illustrate by means of present analysis, is to show roughly an influence of the variable conductivity in the atmosphere on the transient recovery field variation observed at great distances.

2. General formulae describing the time-space distribution of the current-flow field in a unsteady state. We assume that the time changes of the electric field are so slow that we can treat the electric and magnetic fields as mutually independent. Moreover, in a relatively weakly ionized troposphere\* it seems reasonable to neglect the finite propagation velocity of the field change.

Average values of time constants involved, as well as the values of the time in which the field decreases to one half of the amplitude of the field jump after the discharge, are here of the order of seconds. Therefore, we can treat field strength  $E_k$  as the gradient of scalar potential  $\varphi$ . Using the notation accepted in theoretical physics [25] we write

$$E_k = -\varphi_{,k} \quad (2.1)$$

We start the general description of the current-flow field with the second Maxwell's equation:

$$\varepsilon_{klm} H_{m,l} = \frac{1}{c} \dot{D}_k + \frac{4\pi}{c} j_k \quad (2.2)$$

where  $D_k$  — vector of the dielectric displacement,  $H_k$  — vector of the magnetic field strength,  $j_k$  — vector of the conduction current density,  $c$  — the velocity of light,  $k = 1, 2, 3$  are the subscripts denoting space coordinates.

Provided that the medium is isotropic and has a dielectric constant  $\varepsilon$  independent of time, we can write

$$D_k = \varepsilon E_k. \quad (2.3)$$

Taking the divergence of the curl of vector  $H_k$  given by Eg. 2.2, we have

$$\varepsilon \dot{E}_{k,k} + 4\pi j_{k,k} = 0. \quad (2.4)$$

The second basic equation is the Gauss theorem:

$$\varepsilon E_{k,k} = 4\pi \rho. \quad (2.5)$$

\* The presence of free electrons in the air up to 50 km can be neglected.

From Eqs. 2.4 and 2.5 we obtain the basic relation in the form of the equation of continuity

$$\dot{\rho} + j_{k,k} = 0, \quad (2.6)$$

The space charge  $\rho$  can be treated as the sum of the source charge  $q$  and the space charge  $\rho_m$ , the latter being distributed in the medium of nonhomogeneous conductivity under the influence of electric field

$$\rho = q + \rho_m. \quad (2.7)$$

Now let us consider the medium in which the electric conductivity is constant in time but is a function of space. We can write, using Eq. 2.1:

$$j_k = \lambda E_k = -\lambda \varphi_{,k}. \quad (2.8)$$

Taking into account Eqs. 2.7 and 2.8 we can obtain from Eq. 2.5:

$$\varepsilon(-\varphi_{,kk}) = 4\pi\rho_m + 4\pi q \quad (2.9)$$

and

$$\rho_m = \frac{\varepsilon}{4\pi}(-\varphi_{,kk}) - q. \quad (2.10)$$

Substituting the expression for  $\rho$  from Eq. 2.7 to 2.6 and using Eq. 2.8 we have:

$$\frac{\varepsilon}{4\pi} \dot{\varphi}_{,kk} + \lambda \varphi_{,kk} + \lambda_{,k} \varphi_{,k} = -\dot{q}. \quad (2.11)$$

The above equation can be re-written in the form:

$$\boxed{\frac{\varepsilon}{4\pi} \dot{E}_{k,k} + \lambda E_{k,k} + \lambda_{,k} E_k = \dot{q}} \quad (2.12)$$

The last two equations are the basic formulae describing the space-time distribution of the electric field.

3. Formulae describing the time-space distribution of the current-flow field in the case of a point charge placed above a conducting plane. Let us consider a medium with the dielectric constant unchanging in time and space and with the conductivity constant in time but variable in space. We assume a coordinate system where the conducting plane corresponds to  $z=0$  and  $z$  axis passes through the point charge, see fig. 1.

On the basis of experimental estimates [5], [10], it was assumed the conductivity in the atmosphere to be distributed exponentially with altitude:

$$\lambda = \lambda_0 e^{2kz}. \quad (3.1)$$

The coordinates of  $q_1$  are:  $z=0$ ;  $y=0$ ;  $z=z_1$ . Then we may write as follows

$$\dot{q}_1 = I_1 \delta(x) \delta(y) \delta(z - z_1), \quad (3.2)$$

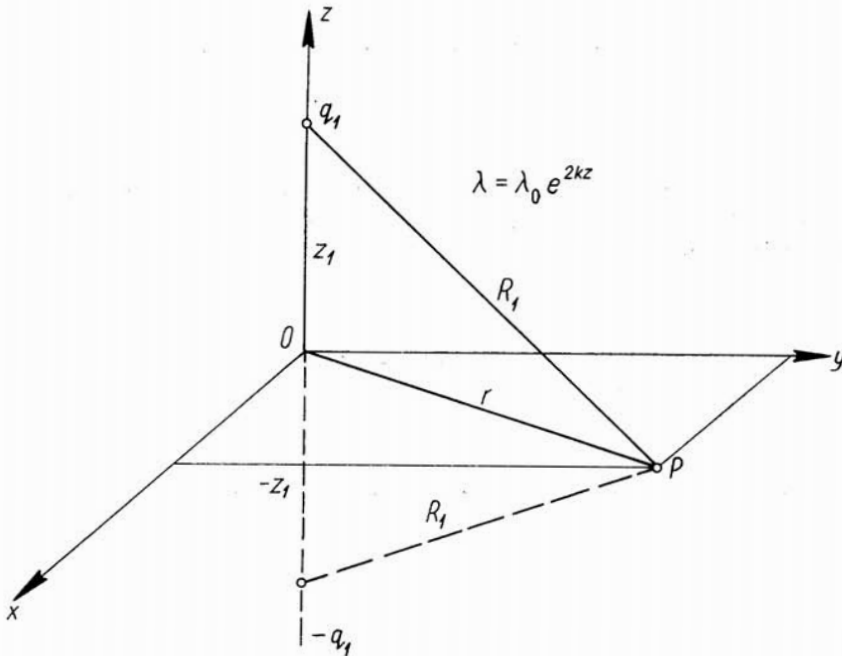


Fig. 1. A simplified monopolar model of thundercloud a point charge  $q_1$  above the conducting plane in a medium with exponentially variable conductivity

where  $I_1$  denotes the convective current accumulating free charge at given point and  $\delta$  is the Dirac function defined as:

$$\begin{aligned} \delta(x) &= \infty & \text{for } x=0, \\ \delta(x) &= 0 & \text{for } x \neq 0, \end{aligned} \tag{3.3}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx = 1.$$

In the steady state, the charge  $q_1$  can be expressed as follows (provided  $I_1$  as constant):

$$q_1 = I_1 \tau_1, \tag{3.4}$$

where  $\tau = \frac{1}{4\pi\lambda_1}$  for  $x=0; y=0; z=z_1$ .

Substituting  $q_1$  from Eq. 3.2 in place of  $q$  in Eq. 2.11 and using the assumption 3.1, we obtain after differentiation

$$\boxed{\frac{\epsilon}{4\pi\lambda} \dot{\varphi}_{,kk} + \varphi_{,kk} + 2k\varphi_{,z} = -\frac{I_1}{\lambda} \delta(x)\delta(y)\delta(z-z_1)} \tag{3.5}$$

Eq. 3.5 represents the mathematical model which allows to examine the time-space distribution of the field under the assumptions made. This distribution depends, of course,

on the boundary and initial conditions chosen and the properties of the source on the one hand, and on the spatial distribution of the dielectric constant and conductivity of the medium on the other.

Up to now, this equation has been solved in the simplified form

$$\frac{\varepsilon}{4\pi\lambda} \dot{\varphi}_{,kk} + \varphi_{,kk} + 2k\varphi_{,z} = 0, \quad (3.6)$$

which is the characteristic equation of the general Eq. 3.5. Assuming that

$$\varphi = \Phi_{(x,y,z)} e^{-t/T_c}, \quad (3.7)$$

one can transform Eq. 3.6 into

$$\frac{1}{T_c} \Phi_{,kk} - \frac{4\pi\lambda}{\varepsilon} (\Phi_{,kk} + 2k\Phi_{,z}) = 0. \quad (3.8)$$

This equation has been considered by Anderson and Freier [1] and Mann [16]. Anderson and Freier examined two specific cases: of  $T_c$  very long (i.e. the case in which the simplified equation corresponded to the stationary current-flow distribution) and of  $T_c$  very short (i.e. the case corresponding to the electrostatic distribution). The solution of Eq. 3.8 found by Mann in the form containing hypergeometrical series appears to be rather unpractical for our present needs, since the application of the boundary conditions involves serious difficulties. Therefore, we attempt to present another method for solving Eq. 3.5 in a more general form.

4. Solution of the steady-state equation. At first we search for the solution of Eq. 3.5 neglecting the first term (containing the derivative of the potential function with respect to time), i.e. for the solution of the steady-state equation:

$$\varphi_{,kk} + 2k\varphi_{,z} = -\frac{Ie^{-2kz}}{\lambda_0} \delta(z-z_1) \delta(x) \delta(y). \quad (4.1)$$

Introducing the cylindrical coordinate system and denoting function  $\varphi$  by  $\Psi$  in order to mark a distinction between the steady and unsteady states, we obtain

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + 2k \frac{\partial \Psi}{\partial z} = -\frac{Ie^{-2kz}}{\lambda_0} \delta(z-z_1) \delta(x) \delta(y). \quad (4.2)$$

Assuming that

$$\Psi_{(r,z)} = \int_0^\infty \alpha J_0(\alpha r) C_{(\alpha,z)} d\alpha \quad (4.3)$$

and substituting Eq. 4.3 into 4.2 we have.

$$\int_0^\infty \alpha J_0(\alpha r) \left\{ \frac{d^2 C}{dz^2} + 2k \frac{dC}{dz} - \alpha^2 C \right\} d\alpha = -\frac{Ie^{-2kz}}{\lambda_0} \delta(z-z_1) \delta(x) \delta(y). \quad (4.4)$$



The analogues method of solution has been applied by Paul and Banerjee [22]. Using the inverse transformation and making use of the Fourier-Bessel integral we obtain

$$\begin{aligned} \frac{d^2 C}{dz^2} + 2k \frac{dC}{dz} - \alpha^2 C &= \frac{-Ie^{-2kz}}{2\pi\lambda_0} \delta(z-z_1) \int_0^\infty \delta(x)\delta(y) r J_0(\alpha r) dr = \\ &= \frac{-Ie^{-2kz}}{2\pi\lambda_0} \delta(z-z_1) \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(y) J_0(\alpha \sqrt{x^2+y^2}) dy = \\ &= \frac{-Ie^{-2kz}}{2\pi\lambda_0} \delta(z-z_1) \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) J_0(\alpha x) dx = \frac{-Ie^{-2kz}}{2\pi\lambda_0} \delta(z-z_1) = \frac{-I}{4\pi^2\lambda_0} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\omega z_1 + (i\omega - 2k)z} d\omega, \end{aligned} \quad (4.5)$$

since for each function  $F(x)$  continuous in the interval  $-\infty \leq x \leq \infty$  there is:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} F(x) \delta(x) dx = F(0) \quad (4.6)$$

and since

$$\delta(z-z_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega(z-z_1)} d\omega. \quad (4.7)$$

Using the Laplace transform we solve the Eq. 4.5 and get the following expression [19]:

$$\begin{aligned} C(z, \alpha) &= \frac{1}{4\pi\lambda_0} \left[ \frac{e^{(z-z_1)\sqrt{k^2+\alpha^2}}}{\sqrt{k^2+\alpha^2}} - \frac{e^{-(z+z_1)(k-\sqrt{k^2+\alpha^2})}}{\sqrt{k^2+\alpha^2}} \right] = \\ &= \frac{Ie^{k(z-z_1)}}{4\pi\lambda_0} \left[ \frac{e^{(z-z_1)\sqrt{k^2+\alpha^2}}}{\sqrt{k^2+\alpha^2}} - \frac{e^{-(z+z_1)\sqrt{k^2+\alpha^2}}}{\sqrt{k^2+\alpha^2}} \right]. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Applying the Henkel transform we obtain:

$$\Psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha J_0(\alpha r) C(\alpha, z) d\alpha = \frac{Ie^{-k(z-z_1)}}{4\pi\lambda_0} \left[ \frac{e^{-k\sqrt{(z-z_1)^2+r^2}}}{\sqrt{(z-z_1)^2+r^2}} - \frac{e^{-k\sqrt{(z+z_1)^2+r^2}}}{\sqrt{(z+z_1)^2+r^2}} \right]. \quad (4.9)$$

This result is consistent with that of Holzer and Saxen [7] obtained by another method.

Denoting according to fig. 1.

$$\sqrt{(z-z_1)^2+r^2} = R_1, \quad \sqrt{(z+z_1)^2+r^2} = R'_1, \quad (4.10)$$

we can rewrite Eq. 4.9 in the form:

$$\Psi = \frac{Ie^{-k(z-z_1)}}{4\pi\lambda_0} \left[ \frac{e^{-kR_1}}{R_1} - \frac{e^{-kR'_1}}{R'_1} \right]. \quad (4.11)$$



The vertical component of the field strength for the steady-state conditions will be

$$\Psi_{,z} = \frac{I}{4\pi\lambda_0} e^{-k(z-z_1)} \left\{ \frac{e^{-kR_1}}{R_1^3} [-kR_1^2 - k(z-z_1)R_1 - (z-z_1)] + \right. \\ \left. - \frac{e^{-kR_1'}}{R_1'^3} [-kR_1'^2 - k(z+z_1)R_1' - (z+z_1)] \right\} \quad (4.12)$$

and for  $z=0$ ,

$$(\Psi_{,z})_{z=0} = \frac{I}{4\pi\lambda_0} e^{kz_1} \left\{ \frac{e^{-kR}}{R^3} [-kR^2 - kz_1R - z_1 + kR^2 - kz_1R - z_1] \right\} = \\ = \frac{-2Ie^{-k(R-z_1)}}{4\pi\lambda_0} \left[ \frac{kz_1}{R^2} - \frac{z_1}{R^3} \right]. \quad (4.13)$$

The above general solution for the steady-state conditions is identical with that obtained by Holzer for the areas where  $j_{k,k}=0$ .

5. The unsteady solution. We will apply the Laplace transform to the general equation 3.5, first with respect to time. The transform  $\hat{\varphi}$  is expressed by the equation:

$$\frac{\varepsilon}{4\pi\lambda} \Omega \hat{\varphi}_{,kk} - \frac{\varepsilon}{4\pi\lambda} \varphi_{,kk(t=0)} + \hat{\varphi}_{,kk} + 2k\hat{\varphi}_{,z} = \frac{-I}{\lambda_0 \Omega} \delta(x) \delta(y) \delta(z-z_1) e^{-2kz}, \quad (5.1)$$

where

$$\hat{\varphi} = \int_0^{\infty} \varphi e^{-\Omega t} d\Omega. \quad (5.2)$$

We may rewrite Eq. 5.1 as

$$\varphi_{,kk} + \frac{2k}{\frac{\varepsilon}{4\pi\lambda} \Omega + 1} \hat{\varphi}_{,z} = \frac{-I}{\Omega \lambda_0} \delta(x) \delta(y) \delta(z-z_1) \left[ \frac{e^{-2kz}}{\frac{\varepsilon}{4\pi\lambda} \Omega + 1} \right] + \\ + \frac{\varepsilon}{4\pi\lambda} \varphi_{,kk(t=0)} \left[ \frac{1}{\frac{\varepsilon}{4\pi\lambda} \Omega + 1} \right].$$

Let us denote

$$\tau = \tau_0 e^{-2kz} = \frac{\varepsilon}{4\pi\lambda} \quad (5.3)$$

and

$$\mu = \frac{k}{\frac{\varepsilon}{4\pi\lambda} \Omega + 1} = \frac{k}{\tau \Omega + 1}. \quad (5.4)$$

One may see that the value of  $\mu$  is not much dependent from  $z$  and in first approximation it can be treated as constant. Such assumption means that in our equation we neglect the term  $2 \frac{d\mu}{dz} \frac{d\varphi}{dz}$ .

Since

$$\frac{d\mu}{dz} = \frac{d}{dz} \left( \frac{k}{\Omega\tau_0 e^{-2kz} + 1} \right) = \frac{-2k^2 \Omega\tau_0 e^{-2kz}}{(\Omega\tau_0 e^{-2kz} + 1)^2},$$

so that for  $z \rightarrow \infty$   $\frac{d\mu}{dz} \rightarrow 0$ ,

$$z \rightarrow 0 \quad \frac{d\mu}{dz} \rightarrow \frac{2k^2 \tau_0 \Omega}{(\tau_0 \Omega + 1)^2} = \frac{2k^2}{\Omega\tau_0 \left(1 + \frac{1}{\Omega\tau_0}\right)^2} \approx 10^{-2}$$

and since  $\frac{d\Phi}{dz}$  is also small for great  $r$ , our simplification seems justified for  $k=0.1 \text{ km}^{-1}$  and  $\tau$  of the order of hundreds seconds. It can, however, introduce some deformations considering the character of time changes of the field, but we believe that the disturbing effects which follow from this assumption may gradually be eliminated by applying the method of consecutive approximations of numerical results.

Using the denotation (5.3) Eq. 5.1 becomes:

$$\hat{\varphi}_{,kk} + 2\mu \hat{\varphi}_{,z} = \frac{-4\pi\tau\mu I}{\varepsilon k \Omega} \delta(x) \delta(y) \delta(z - z_1) + \tau \frac{\mu}{k} \varphi_{,kk}(t=0). \quad (5.5)$$

We may find  $\varphi_{,kk}(t=0)$  assuming that at  $t=0$  there are the steady-state conditions. In such a case Eq. 4.1 becomes for the area outside the pole:

$$\varphi_{,kk} = \psi_{,kk} = \frac{-Ie^{-2kz}}{\lambda_0} \delta(z - z_1) \delta(x) \delta(y) - 2k\varphi_{,z} = \frac{\dot{q}}{\lambda_1} - 2k\varphi_{,z} = 4\pi\rho. \quad (5.6)$$

The first term  $\dot{q}/\lambda$ , represents the charge accumulating in the pole (i.e. in the place of charging), and the second  $-2k\psi_{,z}$ , represents the space charge distributed in the medium. We assume that at  $t=0$  the charge in the pole equals zero  $\dot{q}/\lambda=0$ . We assume then the following condition

$$\varphi_{,kk}(t=0) = -2k\varphi_{,z}(t=0) = -2k\psi_{,z} = -4\pi\rho_m. \quad (5.7)$$

which corresponds to the physical situation after the sudden discharging of the pole. The initial condition was not used in previous theories of Tamura in solution of their equations.

Substituting 5.7 into 5.5 we obtain

$$\boxed{\hat{\varphi}_{,kk} + 2\mu \hat{\varphi}_{,z} = \frac{-4\pi\tau\mu I}{\varepsilon k \Omega} \delta(x) \delta(y) \delta(z - z_1) - 2\tau\mu\psi_{,z}.} \quad (5.8)$$

The general solution of Eq. 5.8, at least in the form obtained in [19] is very inconvenient for analytical computations. In order to simplify it to the cases and ranges we are now interested in, we will introduce some additional assumptions.\*

\* It is possible to solve the Eq. 5.8 without simplifications using numerical methods and suitable computers.

We may assume that for large  $r$

$$r \gg z_1 \quad (5.9)$$

$$R_1 \approx R'_1 \approx r \quad (5.10)$$

and

$$\frac{z-z_1}{R_1^3} \approx \frac{z+z_1}{R_1^3} \approx 0. \quad (5.11)$$

Then we may write 4.12 as follows

$$\psi_{,z} = \frac{I}{4\pi\lambda_0} e^{-k(z-z_1)} \left\{ \frac{e^{-kr}}{r^2} [-k(z-z_1) + k(z+z_1)] \right\} = \frac{-2Ie^{-k(z-z_1)}e^{-kr}kz_1}{4\pi\lambda_0 r^2}. \quad (5.12)$$

We will then consider the function  $\psi_{,z}$  only for large distances, e.g. larger than  $R_0 = 50$  km.

Then

$$e^{kr}|_{R_0} = e^{-kR_0} - k(r-R_0)e^{-kR_0} + \dots \approx e^{-kR_0}[(1+kR_0) - kr] \approx A(B-kr), \quad (5.13)$$

where  $A = e^{-kR_0}$ ,  $B = 1 + kR_0$ .

Using 5.13 and 5.14 we rewrite 5.12 as follows

$$\psi_{,z} = \frac{-2Ie^{-k(z-z_1)}kz_1 A}{4\pi\lambda_0} \left( \frac{B}{r^2} - \frac{k}{r} \right). \quad (5.15)$$

For large  $r$ , e.g.  $r > R_0$ , we may neglect also the value of  $\frac{B}{r^2}$  and then

$$\psi_{,z} = \frac{2Ie^{-k(z-z_1)} Akz_1}{4\pi\lambda_0 r}. \quad (5.16)$$

Substituting the above into Eq. 5.8 we obtain

$$\hat{\varphi}_{,kk} + 2\mu\hat{\varphi}_{,z} = -\frac{4\pi I\mu\tau}{k\Omega} \delta(x)\delta(y)\delta(z-z_1) - \frac{2\mu\tau k 2Ie^{-k(z-z_1)} Akz_1}{4\pi\lambda_0 r}. \quad (5.17)$$

Using the remark that  $\mu$  can be treated in first approximation as constant and introducing the cylindrical coordinate system we obtain:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \hat{\varphi}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \hat{\varphi}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \hat{\varphi}}{\partial z^2} + 2\mu \frac{\partial \hat{\varphi}}{\partial z} &= \\ &= -\frac{4\pi I\mu\tau}{k\Omega} \delta(x)\delta(y)\delta(z-z_1) - 4I\mu\tau\tau_0 e^{-k(z-z_1)} Ak^2 z_1 \frac{1}{r}. \end{aligned} \quad (5.18)$$

Applying the Henkel transform

$$\hat{\varphi} = \int_0^\infty \beta J_0(\beta r) \bar{\varphi}(\beta, z, \Omega) d\beta \quad (5.19)$$

we obtain from 5.18

$$\int_0^{\infty} \left\{ \frac{d^2 \bar{\varphi}}{dz^2} + 2\mu \frac{d\bar{\varphi}}{dz} - \beta \bar{\varphi} \right\} \beta J_0(\beta r) d\beta = -\frac{4I\pi\mu\tau}{k\Omega} \delta(x) \delta(y) \delta(z-z_1) - 4I\mu z_1 \tau_0^2 e^{-3kz} e^{kz_1} A k^2 \frac{1}{r}. \quad (5.20)$$

Using the inverse Fourier-Bessel transform we have

$$\frac{d^2 \bar{\varphi}}{dz^2} + 2\mu \frac{d\bar{\varphi}}{dz} - \beta^2 \bar{\varphi} = \frac{4\pi I \tau \mu}{k\Omega} \int_0^{\infty} \delta(x) \delta(y) \delta(z-z_1) J_0(\beta r) r dr + -4I\mu\tau_0^2 e^{-3kz} e^{kz_1} A k^2 z_1 \int_0^{\infty} \frac{1}{r} J_0(\beta r) r dr. \quad (5.21)$$

We will now consider two cases:

1. We assume that at  $t=0$  the charge in the medium does not exist, i.e.  $\varphi_{,kk}=0$ , and the process of charging just begins. In this case we deal merely with second term on the right-hand side of Eq. 5.21.

2. We neglect the process of charging. In this case we deal merely with the decay of the charge  $\rho_m$  in the medium (outside of the pole), neglecting the first term on the right-hand.

We will then take solution of Eq. 5.21 as a superposition of both the above solutions.

Case 1. Our equation is reduced to:

$$\frac{d^2 \bar{\varphi}^I}{dz^2} + 2\mu \frac{d\bar{\varphi}^I}{dz} - \beta^2 \bar{\varphi}^I = -\frac{4\pi\mu\tau I}{k\Omega 2\pi} \delta(z-z_1) \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) \delta(y) J_0(\beta r) r dr. \quad (5.22)$$

Applying the procedure the same as in 4.5 we may obtain

$$\frac{d^2 \bar{\varphi}^I}{dz^2} + 2\mu \frac{d\bar{\varphi}^I}{dz} - \beta \bar{\varphi}^I = -\frac{2I\mu\tau}{k\Omega} \delta(z-z_1), \quad (5.23)$$

since  $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) \delta(y) J_0(\beta r) r dr = 1$ .

The Eq. 5.23 differs from the Eq. 4.5 by the factor  $\frac{\mu}{k\Omega}$  which is not much dependent on  $z$ . Assuming  $\mu = \text{const}$  we may transform the Eq. 5.23 and rewrite it to the form analogical to the eq. 4.11

$$(\hat{\varphi}^I) = \int_0^{\infty} \beta J_0(\beta r) \bar{\varphi}^I(\beta, z, \Omega) d\beta = \frac{I e^{-k(z-z_1)} \mu}{4\pi\lambda_0 k\Omega} \left[ \frac{e^{-kR_1}}{R_1} - \frac{e^{-kR_1'}}{R_1'} \right]. \quad (5.24)$$

From 5.24 we may already obtain:

$$(\varphi^I)_{,z} (z=0) = \frac{-2I\mu e^{-k(r-z_1)}}{4\pi\lambda_0 k\Omega} \left( \frac{kz_1}{r^2} - \frac{z_1}{r^3} \right). \quad (5.25)$$

We apply the inverse Laplace transformation of 5.25 with respect to time and using the denotation of  $\mu$ , we obtain

$$(\varphi^I)_{,z} (z=0) = -2I\tau_0 e^{-k(r-z_1)} \left[ \frac{kz_1}{r^2} - \frac{z_1}{r^2} \right] (1 - e^{-t/\tau}). \quad (5.26)$$

The above is the solution for the case of charging.

Case 2. The equation to be solved is reduced now to:

$$\frac{d^2 \bar{\varphi}^{II}}{dz^2} + 2\mu \frac{d\bar{\varphi}^{II}}{dz} - \beta^2 \bar{\varphi}^{II} = -4I\mu\tau_0^2 e^{kz_1} A k^2 z_1 e^{-3kz} \frac{1}{\beta} = f(\beta, z) \quad (5.27)$$

since

$$\int_0^\infty \frac{1}{r} J_0(\beta r) r dr = 1. \quad (5.28)$$

The solution of Eq. 5.27 is

$$\bar{\varphi}^{II} = \frac{4I\tau_0^2 k^2 \mu z_1 e^{kz_1} A}{\beta [\beta^2 + (6k\mu - 9k^2)]} [e^{-3kz} - e^{-(\mu - \sqrt{\mu^2 + \beta^2})z}] \quad (5.29)$$

whence

$$\bar{\varphi}_{,z}^{II} = \frac{-4I\tau_0^2 k^2 \mu z_1 e^{kz_1} A}{\beta [\beta^2 + (6k\mu - 9k^2)]} [-3ke^{-3kz} - (\mu - \sqrt{\mu^2 + \beta^2}) e^{-(\mu - \sqrt{\mu^2 + \beta^2})z}] \quad (5.29)$$

and

$$\bar{\varphi}_{,z}^{II} = \frac{-4I\tau_0^2 k^2 e^{kz_1} z_1 A}{\beta [\beta^2 + (6k\mu - 9k^2)]} [-3k - (\mu - \sqrt{\mu^2 + \beta^2})]. \quad (5.30)$$

We may transform the result 5.30 into:

$$(\varphi_{,z}^{II})_{z=0} = \frac{-4I\tau_0^2 k^2 e^{kz_1} z_1 A}{6k\beta} \left[ \frac{-3k\mu}{\mu+a} - \frac{\mu^2}{\mu+a} + \frac{\mu}{\mu+a} \sqrt{\mu^2 + \beta^2} \right], \quad (5.31)$$

where  $a = \frac{\beta^2 - 9k^2}{6k}$ .

Applying the inverse Laplace transform we obtain:

$$\begin{aligned} (\hat{\varphi}_{,z}^{II})_{z=0} &= \frac{-4I\tau_0^2 k^2 e^{kz_1} z_1 A}{6\beta k} \left\{ \mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{-3k\mu}{\mu+a} \right] - \mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{\mu^2}{\mu+a} \right] + \mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{\mu}{\mu+a} \sqrt{\mu^2 + \beta^2} \right] \right\} = \\ &= \frac{-4I\tau_0^2 k^2 e^{kz_1} z_1 A}{6\beta\tau} e^{-t/\tau} \left\{ 1 - \left[ \frac{1}{\beta} \int_0^{kt/\tau} J_0 \left( \frac{x}{a} \right) dx + \frac{\beta}{a} J_0 \left( \frac{kt}{a\tau} \right) \right] + \right. \\ &\quad \left. + e^{-\left( \frac{k}{a} \frac{t}{\tau} \right)} \left[ -1 + \frac{3k}{a} + \frac{1}{\beta} \left( 1 + \frac{\beta^2}{a^2} \right) \int_0^{kt/\tau} e^{x/a} J_0 \left( \frac{x}{a} \right) dx \right] \right\}. \quad (5.32) \end{aligned}$$



Let us denote [6] p. 680

$$U_1\left(\frac{kt}{\beta\tau}\right) = \int_0^{kt/\tau} J_0\left(\frac{x}{\beta}\right) dx = 2\beta \sum_{v=0}^{\infty} J_{(2v+1)}\left(\frac{kt}{\beta\tau}\right), \quad (5.33)$$

$$U_2\left(\frac{kt}{\beta\tau}\right) = \int_0^{kt/\tau} e^{x/a} J_0\left(\frac{x}{\beta}\right) dx. \quad (5.34)$$

The integrals 5.33 and 5.34 can easily be determined numerically by means of a computer.

In order to facilitate the interpretation, let us only consider the linear approximation of separate terms in 5.32, 5.33 and 5.34 (with respect to time  $t$ ), which is justified for small values of time, namely

$$\begin{aligned} U_2\left(\frac{kt}{\beta\tau}\right) &= \int_0^{kt/\tau} e^{x/a} J_0\left(\frac{x}{\beta}\right) dx = \int_0^{kt/\tau} \left[1 + \frac{x}{a} + \frac{x^2}{2!a^2} + \frac{x^3}{3!a^3} + \dots\right] J_0\left(\frac{x}{\beta}\right) dx = \\ &= 2\beta \sum_{v=0}^{\infty} J_{2v+1}\left(\frac{kt}{\beta\tau}\right) + \frac{\beta}{a} \int_0^{kt/\tau} \frac{d}{dx} \left[ x J_1\left(\frac{x}{\beta}\right) \right] dx = \\ &= 2\beta \sum_{v=0}^{\infty} J_{2v+1}\left(\frac{kt}{\beta\tau}\right) + \frac{\beta}{a} \frac{kt}{\tau} J_1\left(\frac{kt}{\beta\tau}\right). \end{aligned} \quad (5.35)$$

Using 5.33 and 5.35 we rewrite Eq. 5.32 in the form:

$$\begin{aligned} (\check{\varphi}_{,z}^{II})_{z=0} &= \frac{4I\tau_0^2 k^2 e^{kz_1} z_1 A}{6\beta\tau} e^{-t/\tau} \left\{ 1 - \frac{\beta}{a} J_0\left(\frac{kt}{\beta\tau}\right) - 2 \sum_{v=0}^{\infty} J_{2v+1}\left(\frac{kt}{\beta\tau}\right) + \right. \\ &+ \left[ \left(\frac{3k}{a} + 1\right) + 2 \left(1 + \frac{\beta^2}{a^2}\right) \sum_{v=0}^{\infty} J_{2v+1}\left(\frac{kt}{\beta\tau}\right) + \right. \\ &\left. \left. + \frac{1}{a} \left(1 + \frac{\beta^2}{a^2}\right) \frac{kt}{\tau} J_1\left(\frac{kt}{\beta\tau}\right) + \dots \right] e^{-\left(\frac{kt}{a\tau}\right)} \right\}. \end{aligned} \quad (5.36)$$

For short  $t$  we can also introduce the following approximation:

$$e^{-\left(\frac{kt}{a\tau}\right)} \approx 1 - \frac{kt}{a\tau} \quad (5.37)$$

and

$$\sum_{v=0}^{\infty} J_{2v+1}\left(\frac{kt}{\beta\tau}\right) \approx J_1\left(\frac{kt}{\beta\tau}\right). \quad (5.38)$$

In the first approximation degree we keep only the term containing  $t$  linearly. In such a case, we have

$$(\check{\varphi}_{,z}^{II})_{z=0} = \frac{4I\tau_0^2 k^2 e^{kz_1} z_1 A}{6\beta\tau} e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \left\{ 1 + \frac{3k-a}{a} e^{-\left(\frac{kt}{a\tau}\right)} - \frac{\beta}{a} J_0\left(\frac{kt}{\beta\tau}\right) + \right.$$

$$\begin{aligned}
& +2 \left[ \left( 1 + \frac{\beta^2}{a^2} \right) e^{-\left(\frac{kt}{a\tau}\right)} - 1 \right] J_1 \left( \frac{kt}{\beta\tau} \right) + \frac{1}{a} \left( 1 + \frac{\beta^2}{a^2} \right) e^{-\left(\frac{kt}{a\tau}\right)} \frac{kt}{\tau} J_1 \left( \frac{kt}{\beta\tau} \right) \Big\} = \\
& = \frac{4I\tau_0^2 k^2 e^{kz_1} z_1 A}{6\beta\tau} e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \left\{ 1 + \frac{\beta}{a} \left( 1 + \frac{kt}{4a\tau} \right) + \left( 1 - \frac{kt}{a\tau} \right) \left[ \left( \frac{3k}{a} - 1 \right) + \right. \right. \\
& \quad \left. \left. + 2 \left( 1 + \frac{\beta^2}{a^2} \right) \frac{kt}{4\beta\tau} + \left( \frac{kt}{a\tau} \right)^2 \frac{1}{4} \right] - 2 \frac{kt}{\beta\tau} \frac{1}{4} \right\} = \\
& = \frac{4I\tau_0^2 k^2 e^{kz_1} z_1 A}{6\tau\beta} e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \left\{ \left( \frac{\beta}{a} + \frac{3k}{a} \right) + \frac{kt}{a\tau} \left( 1 + \frac{\beta}{4a} + \frac{\beta^2}{4a^2} + \frac{3k}{a} \right) + \dots \right\}. \quad (5.39)
\end{aligned}$$

Using the inverse Henkel transform, we obtain:

$$\begin{aligned}
(\varphi_{,z}^{II})_{z=0} &= \int_0^\infty \beta J_0(\beta r) (\check{\varphi}_{,z}^{II})_{z=0} d\beta = \frac{4I\tau_0^2 k^2 e^{kz_1} z_1 A}{6\tau} e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \left\{ \int_0^\infty \left( \frac{3k}{a} + \frac{kt}{a\tau} \right) J_0(\beta r) d\beta + \right. \\
& + \int_0^\infty \frac{\beta}{a} I_0(\beta r) d\beta + \int_0^\infty \left( \frac{-3k^2}{a^2} \right) \frac{t}{\tau} J_0(\beta r) d\beta + \int_0^\infty \frac{\beta kt}{4a^2\tau} J_0(\beta r) d\beta + \left. \int_0^\infty \frac{\beta^2}{4a^2} \frac{kt}{a\tau} J_0(\beta r) d\beta \right\}. \quad (5.40)
\end{aligned}$$

Applying the solutions of above integrals, given separately [19], we may rewrite the Eq. 5.40 as follows:

$$\begin{aligned}
(\varphi_{,z}^{II})_{z=0} &= \frac{4I\tau_0^2 k^2 e^{kz_1} z_1 A}{6\tau} e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \left\{ \left( 3k + \frac{kt}{\tau} \right) \left[ -\pi H_{0(3kr)} \right] + \left[ -\frac{3}{2} k\pi 2N_{0(3kr)} + \dots \right] \right\} = \\
& = -2I \frac{\tau_0^2}{\tau} k^3 e^{kz_1} z_1 A e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \left\{ \left( \pi H_{0(3kr)} + \pi N_{0(3kr)} + \frac{t}{3\tau} H_{0(3kr)} + \dots \right) \right\}. \quad (5.41)
\end{aligned}$$

Using  $\tau = \tau_0$  for  $z=0$  and the notation

$$M = H_{0(3kr)} + N_{0(3kr)} \quad (5.42)$$

we may rewrite the obtained solution of the case 2 in the following form:

$$(\varphi_{,z}^{II})_{z=0} = -2I\tau_0 \pi k^3 e^{kz_1} z_1 A M e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \left\{ 1 + \frac{H_{0(3kr)}}{M} \frac{t}{3\tau} + \dots \right\}. \quad (5.43)$$

The general simplified solution will be a superposition of the Eq. 5.26 and Eq. 5.43

$$\begin{aligned}
(\varphi_{,z})_{z=0} &= (\varphi_{,z}^I)_{z=0} + (\varphi_{,z}^{II})_{z=0} = -\frac{2Ie^{-k(r-z_1)}}{4\pi\lambda_0} \left( \frac{kz_1}{r^2} - \frac{z_1}{r^3} \right) (1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)}) + \\
& - 2I\tau_0 \pi k^3 e^{kz_1} z_1 A M e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \left( 1 + \frac{H_{0(3kr)}}{M} \frac{t}{3\tau} + \dots \right). \quad (5.44)
\end{aligned}$$

Let us denote\*

$$E = (\varphi_{,z})_{z=0}, \quad (5.45)$$

$$E_s = (\varphi_{,z}^I) = -2I\tau_0 e^{-k(r-z_1)} \left( \frac{kz_1}{r^2} - \frac{z_1}{r^3} \right), \quad (5.46)$$

$$E_\rho = (\varphi_{,z}^{II}) = -2I\tau_0 \pi k^3 e^{kz_1} AM. \quad (5.47)$$

We rewrite the Eq. 5.50 in the following form:

$$E = E_s \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} \right) + E_\rho \left( 1 + \frac{H_0(3kr)}{M} \frac{t}{3\tau_0} + \dots \right) = E_s \left\{ 1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} \left[ \left( 1 - \frac{E_\rho}{E_s} \right) + \frac{E_\rho}{E_s} \frac{H_0(3kr)}{M} \frac{t}{3\tau_0} + \dots \right] \right\} = E_s - (E_s - E_\rho) - E_\rho \frac{H_0(3kr)}{M} \frac{t}{3\tau_0} e^{-\frac{t}{\tau_0}} - \dots \quad (5.48)$$

The expressions 5.48 describe in first approximation the field variations at  $z=0$  in function of distance  $r$  and time  $t$ . This rough solution concerns the independent on the distance. State after sudden discharge of the pole for the range of large  $r$  and small  $t$ .

6. Discussion and remarks. The linearity of the equations derived makes it possible to use the monopolar model, as a basis to investigate the behaviour of the field, produced by thunderclouds, consisting of more than one charge center. In such case, the general solution will be a superposition of the solutions for each pole.

Fig. 2 drawn after Illingworth [9] presents the measured recovery times of field variation\*\* as function of the amplitude of sudden field change,  $\Delta E$ , produced by lightning. Some values of amplitude  $\Delta E$  were recalculated here from the values of  $r$ , under the assumption that the lightning moment is equal 110 C·km on an average. The reviewed last data show a considerable decrease of the recovery time  $T_{1/2}$  as function of the amplitude of sudden field change  $\Delta E$ , i.e., as a function of distance as well.

This decrease has not been explained analitically by any of the present theories including the analysis of Tamura [26] and Kasemir [14]. Ereier [4], Anderson et al. [2] came to the conclusion that at  $z=0$ , contrary to the analysis of Tamura, in the case of monopolar physical model with variable conductivity it is not possible to have other shape of recovery variation than exponential form, with relaxation time determined by the conductivity at the place of observation. They refute to some extent the Tamura theoretical treatment.

The comparison of the experimental results from fig. 2 with the theoretical values of recovery time as function of  $\Delta E$ , shows a large discrepancy between the experimental values of  $T_{1/2}$  and those calculated after Tamura. Especially, for the small values of  $\Delta E$ , i.e. for the large distances  $r$ , the measured values of  $T_{1/2}$  are much smaller than the calculated ones and show a considerable decrease with distance. On the contrary, the theoretical values of Tamura remain almost constant for this range of  $r$ , (at an average for  $r > 30$  km), as it was indicated by calculations of Illingworth and Wormell [8] and

\* according to the convention used in atmospheric electricity the electric field is positive during the fair weather it means that here  $E = d\varphi/dz$  although in physics we use commonly  $E = -d\varphi/dz$ .

\*\* defined as the time after the discharge for the field to recover to 1/2 of its initial amplitude  $\Delta E$ .

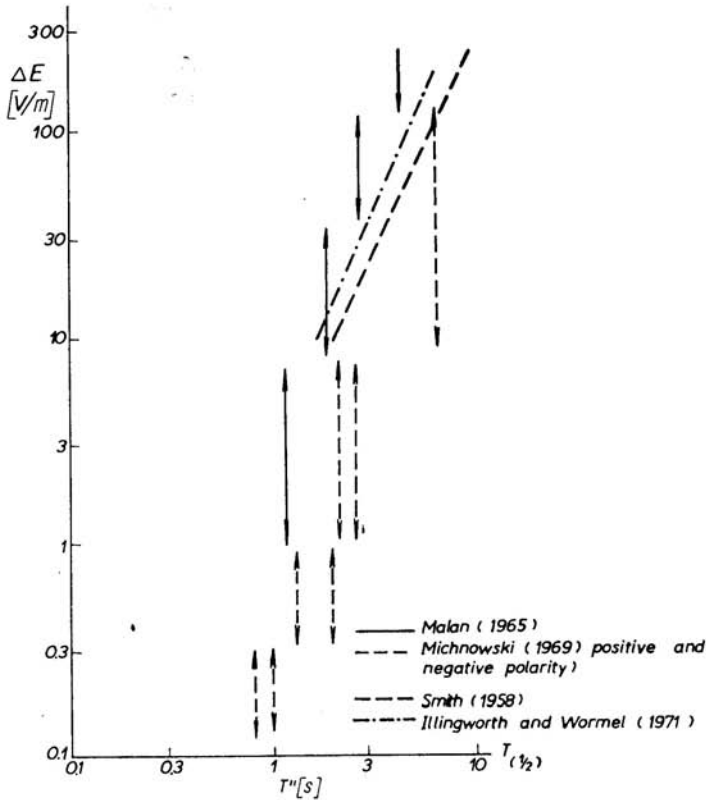


Fig. 2. A comparison of the experimental results drawn after Illingworth [9]; Malan [20], Michnowski [18] (positive and negative polarity), Smith [24], Illingworth [9]

Michnowski [19]. Similar discrepancy we obtain when computing the values of  $T_{1/2}$  according to Kasemir equations [14]. Such contradiction of results concerns also the theories which assume the exponential form of recovery curves, with time constant independent from distance, e.g. to the values given by Wilson-Wormell [28], Freier [4], Philips [23].

Let us consider Eq. 5.48. In this simplified solution for the range of great distances  $r$  and small times  $t$ , we have three components. First of them,  $E_s$ , presents the electric field in stationary state which corresponds either to the steady state before the discharge of the pole or to that which will be reached after the discharge in time tending to the infinity. Initial value of the second exponential component, Eq. is

$$E_q = \Delta E = E_s - E_\rho, \tag{6.1}$$

where  $E_q$  stands for the field produced by the space charge distributed in the medium due to its inhomogeneity. This component decreases exponentially with time constant.

$$y = E_\rho \frac{H_0(3kr)}{H_0(3kr) + N_0(3kr)} \frac{t}{3\tau_0} \tag{6.2}$$



Its role is illustrated in fig. 3 which shows an example of electric field variation after discharge of the negative pole. The curve for this transient state was calculated using Eq. 5.48 for the following parameters:  $r=60$  km,  $z_1=5$  km,  $k=0,11$  km<sup>-1</sup>,  $I\tau_0=20$  C,  $\lambda_0=4\cdot 10^4$  ESU.

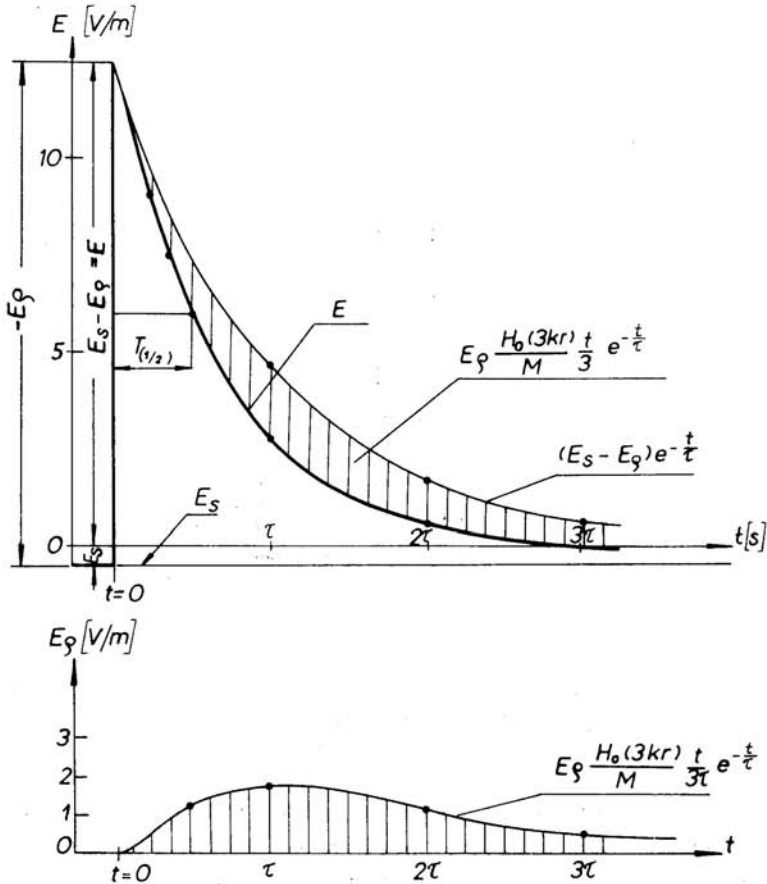


Fig. 3. An example of transient variation of electric field, produced by sudden discharge of the negative pole at the distance of 60 km. The curve was calculated for the following parameters:  $z_1=5$  km,  $k=0,11$  km<sup>-1</sup>,  $I_1\tau=20$  C,  $\lambda_0=4\cdot 10^4$  ESU

From fig. 3 and Eq. 5.48 we see that the third component causes a distinct decrease in the time  $T_{1/2}$  which would not be given by the first two exponential components alone. Moreover, we may notice that the ratio of the maximum value of third component to the initial value of both remaining components increases with distance  $r$ . Therefore, we may expect that the time  $T_{1/2}$  will decrease with an increase of distance  $r$ .

For a more detailed comparison of the present analysis with the experimental results it would be necessary to add the approximations of the higher orders in Eq. 5.48 and on the other hand to choose the adequate parameters in the adopted physical models.



Anyhow, the calculated values of  $T_{1/2}$  and their decrease with distance for the large  $r$  are more consistent with the experiment than the values obtained on the basis of previous theories. Besides, the derived relations suggest an explanation of some other properties of the recovery variations observed at the points located at large distances, e.g. deviations of the shape of recovery curves from the exponential formes.

The additional advantage of the present analysis is a possibility extendit to for the models with continuously distributed charges in pole and their various time changes.

**Acknowledgements.** The author wishes to thank prof. R. Teisseyre, dr A. Legatowicz and prof. J. Osiowski for their advices how to overcome mathematical difficulties in this work. The author is indebted to dr Kasemir for discussing this paper, as well as to late prof. H. Israël for his valuable suggestions.

#### APPENDIX

##### List of symbols:

- $a$  — expression denoted by formula (5.31);
- $C(z, \alpha)$  — function given by formula (4.8);
- $C_0$  — Euler constant,  $C_0 = 0,5777215\dots$ ;
- $\varepsilon$  — dielectric constant;
- $\varepsilon_{kim}$  — antisymmetrical tensor of rank zero;
- $E_k$  — vector of electric field strength;
- $E_z$  — electric field strength at  $z=0$  for steady state;
- $E_p$  — electric field at  $z=0$  produced by  $\rho_m$ ;
- $D_k$  — vector of dielectric displacement;
- $\delta$  — function of Dirac;
- $\Delta E$  — initial amplitude of sudden field change produced by the discharge of the pole;
- $\varphi$  — potential function;
- $\varphi_{,k}$  — potential gradient of function  $\varphi$ ;
- $\varphi_{,kk}$  — laplacian of function  $\varphi$ ;
- $\varphi^I$  — potential function in the case of charging;
- $\varphi^{II}$  — potential function in the case of decay of  $\rho_m$  without charging;
- $\hat{\varphi}; \bar{\varphi}$  — Laplace and Henkel transform of potential function;

- $\hat{\varphi}^I; \bar{\varphi}^I$  — Laplace and Henkel transform of potential function;
- $\hat{\varphi}^{II}; \bar{\varphi}^{II}$  — Laplace and Henkel transform of potential function;
- $\Phi$  — potential function used by Anderson et al. [1]; dependent from the coordinates  $x, y, z$ ;
- $H_0$  — Struve function of zero order;
- $H_k$  — vector of magnetic field strength;
- $I_1$  — strength of charging current source;
- $j_k$  — vector of conduction current density;
- $j_{k,k}$  — divergence of conduction current density;
- $J_0$  — Bessel function of zero order;
- $J_\nu$  — Bessel function of  $\nu$  order;
- $k$  — coefficient of exponential increase of conductivity in the atmosphere;
- $\mathcal{L}^{-1}$  — symbol of inverse Laplace transformation;
- $\lambda$  — electrical conductivity of the medium;
- $\lambda_0$  — electrical conductivity at  $z=0$ ;
- $\mu$  — value denoted by formula 5.4;
- $N_0$  — Neuman function of zero order;
- $q_1$  — electric charge in the pole;
- $\dot{q}_1$  — time derivate of  $q_1$ ;
- $\psi; \psi_k; \psi_{,kk}$  — potential function, potential

	gradient and laplacian for the steady state;	$T_{1/2}$ — time taken in seconds after the discharge for the field to recover to 1/2 of its initial amplitude $E$ ;
$\hat{\psi}; \bar{\psi}$ —	transform of Laplace and Henkel for the steady state potential function;	$\tau$ — relaxation time of the air (see formula 5.3);
$r$ —	distance in cylindrical coordinates defined in fig. 1;	$\tau_1$ — relaxation time for the pole at the height $z=z_1$ ;
$R_1$ —	distance of given point of observation to the pole;	$\tau_0$ — relaxation time of the air at the height $z=0$ ;
$R'_1$ —	distance of given point of observation to the mirror image of the pole;	$x, y$ — coordinates at the conductive plate;
$\rho$ —	space charge density;	$z$ — height.
$\rho_m$ —	density of space charge distributed in the medium;	

Manuscript received by Editor: May 31, 1973

## REFERENCES

1. Anderson F. I., Freier G. D., *Interaction of the thunderstorm with a conducting atmosphere*, J. Geoph. Res. 74 (29), 5390 - 5396, 1969.
2. Anderson F. I., Freier G. D., Lin C. C., Tam F. M., *The electric field change during a tornado compared with others severe storms*, J. Geoph. Res., 71, 4279 - 4288, 1966.
3. Bateman H., *Tables of Integral Transforms*, McGraw-Hill Book Comp. Inc., 1954.
4. Freier G. D., *A theoretical Study of the Conductivity of Air in Thunderstorms*, J. Geoph. Res., 68, 4941 - 4947, 1963.
5. Gish O. H., *Evaluation and Interpretation of the Columnar Resistance of the Atmosphere*, Terr. Magn. Atmosph. Electr., 44, 154 - 168, 1944.
6. Gradštejn I. S., Ryzik I. M., *Tablicy integralov, summ, rjadov i proizvedenij*, Moskva 1962.
7. Holzer R. E., Saxon D. S., *Distribution of Electric Conduction Currents in the Vicinity of Thunderstorms*, J. Geop. Res., 57, 207 - 216, 1952.
8. Illingworth A. I., Wormell T. W., *Electric field recovery after lightning*, Nature, Physical Sciences, vol. 229, Febr. 15 1971.
9. Illingworth A. I., *The variation of the electric field after lightning and the conductivity within thunderclouds*, submitted to the Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1971.
10. Israël H., *Atmosphärische Elektrizität*, Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig, Leipzig 1957, 1961.
11. Israël H., *Probleme der Gewitterforschung*, Westdeutschandverlag — Köln und Opladen, 1964.
12. Jahnke E., Emde F., *Tablicy funkcij s formulami i krivymi*, Perv, s nemeckogo, Moskva 1949.
13. Imjanitov J. M., *A thundercloud*, Planetary Electrodynamics, ed. Coroniti S. C. and Hughes J., Gordon and Breach, London, Paris, New York, p. 401 - 426, 1969.
14. Kasemir H., *On the theory of the atmospheric electric current flow*, IV. Fort Monmouth, N. J.
15. Lebidiew N. N., *Funkcje specjalne i ich zastosowania*, PWN, Warszawa 1957.
16. Mann E. J. Jr., *Interaction of a thunderstorm with a Conducting Atmosphere*, J. Geoph. Res., 75, no 9, 1697 - 1698, 1970.
17. Margenau H., Murphy G. M., *Matematyka w fizyce i chemii*, PWN, Warszawa 1956.
18. Michnowski S., *Some observations of electric field variations following lightning discharges*, Planetary Electrodynamics ed. Coroniti S. C. and Hughes J., Gordon and Breach, New York, London, Paris p. 51 - 54, 1969.
19. Michnowski S., *Badania zmian pola elektrycznego występujących po wyladowaniach atmosferycznych*, Materiały i Prace IG PAN, in press.

20. Malan D. J., *Physics of the thunderstorm electric circuit*, J. Franklin Inst., 526 - 539, June, 1967.
21. Osiowski J., *Zarys rachunku operatorowego*, Wyd. Nauk. Techn. Warszawa 1965.
22. Paul M. K., Buddhadeb Banerjee, *Electrical Potential due to a Point Source upon Models of Continuously Varying Conductivity*, Pure a. Appl. Geoph., vol. 70, p. 218 - 237, 1970/III.
23. Philips B. B., *Ionic equilibrium and the electrical conductivity in thunderclouds*, Monthly Weather Rev., 95, Dec. 1967.
24. Smith L., *Electric field studies of Florida thunderstorms*, Recent Advances in Atmospheric Electricity, ed. L. G. Smith, 299 - 307, Pergamon Press, New York 1958.
25. Sufczyński M., Teisseyre R., Werle J., *Elektrodynamika teoretyczna*, PWN, Warszawa 1953.
26. Tamura Y., *An Analysis of Electric Field after Lightning Discharges*, J. Geomagn. a. Geoelectr., vol. 6, no 1, 1954.
27. Watson G. N., *A treatise on the theory of Bessel functions*, Cambridge 1962.
28. Wormell T. W., *Atmospheric Electricity; Some recent trends and problems*, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 79, 3, 1953.

## ZMIANY POLA ELEKTRYCZNEGO W OŚRODKU O ZMIENNYM PRZEWODNICTWIE W PRZYPADKU ROZŁADOWYWANIA BIEGUNA POŁOŻONEGO PONAD PŁASZCZYZNĄ PRZEWODZĄCĄ

### Streszczenie

W artykule przeprowadzono analizę teoretyczną zmian pola w ośrodku niejednorodnym dla stanów niestabilnych w przypadku nagle rozładowywanego bieguna umieszczonego ponad płaszczyznę przewodzącą. Układ powyższy odpowiada biegunowi chmury burzowej rozładowywanemu przez wyładowanie atmosferyczne. Dla tego modelu z ośrodkiem o przewodnictwie rosnącym wykładniczo z wysokością zostały otrzymane uproszczone rozwiązania równań, wyprowadzonych dla ogólnego przypadku.

Dla dużych odległości wyładowania od punktu badanego i dla krótkich czasów początkowego przebiegu niestabilnego zostało wykazane na drodze analitycznej malenie czasu powrotu pola w funkcji wzrostu odległości.

Efekt ten, stwierdzony uprzednio eksperymentalnie dla wyładowań atmosferycznych, nie mógł być wyjaśniony w zakresie dużych odległości przy pomocy żadnej z dotychczasowych teorii. Przyjęcie odmiennych niż w analizie Tamury warunków początkowych pozwoliło przypisać zachowanie się zmian powrotu pola decydującemu, w tym zakresie odległości, wpływowi ładunków przestrzennych, formowanych w niejednorodnym ośrodku przez elektryczne pole wzbudzające. Przedstawione ujęcie teoretyczne umożliwia dalsze badania teoretyczne niestabilnych elektrycznych pól przepływowych po wyładowaniach źródeł rozciągniętych przestrzennie i zmiennych w czasie.

## ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ В СЛУЧАЕ МГНОВЕННОГО РАЗРЯДА ПОЛЮСА ПОМЕЩЕННОГО НАД ПРОВОДЯЩЕЙ ПЛОСКОСТЬЮ

### Резюме

В данной статье проведен теоретический анализ нестационарных изменений электрического поля в неоднородной среде в случае мгновенного разряда точечного источника, помещенного над проводящей плоскостью. Это соответствует модели разряда грозового облака с помощью молниевых разрядов.

Найлено общее уравнение и решение для случая среды, проводимость которой растет экспоненциально с увеличением высоты. Получено частное решение для случая больших расстояний разрядов от пункта наблюдения и одновременно для малых времен начального нестационарного



изменения. Для этих случаев показано аналитически, что время возврата поля уменьшается как функция расстояния.

Этот эффект, обнаруженный ранее экспериментально для атмосферных разрядов, не объяснялся для больших расстояний никакой известной теорией.

Другие чем в анализе Тамуры, начальные условия позволили приписать поведение изменений возврата поля влиянию генерированных электрическим полем в неоднородной среде пространственных зарядов.

Это влияние оказывается решающим для точек, лежащих на больших расстояниях.

Представленный теоретический метод дает возможность дальнейших аналитических исследований нестационарных электрических полей после разряда пространственных и переменных во времени источников.

SOME RESULTS OF THE MEASUREMENTS OF RADIOACTIVE,  
ATMOSPHERIC ELECTRICITY AND METEOROLOGICAL PARAMETERS  
AT THE GEOPHYSICAL OBSERVATORY AT ŚWIDER

Stanisław MICHNOWSKI\*, Jerzy PENSKO\*\*, Bogdan GWIAZDOWSKI\*\*\*

Abstract

Measurements methods of the gamma background radiation and artificial radioactive fallout from the atmosphere are described. The measurements results are given together with the values of meteorological and atmospheric electricity parameters. The measurements were carried out on the ground of the Geophysical Observatory at Świder in 1970–1972.

A preliminary examination of the measurements results shows that an average daily gamma background radiation is at Świder almost constant during the whole year (approximately level of  $2.7 \mu\text{R/h}$ ) with the exception of periods of heavy rainfall and snow.

In the samples of radioactive fallout taken at the find of March and the beginning of April 1972 fresh fission products were found. They originated from an atmospheric nuclear explosion carried out on 19 March 1972 in the People's Republic of China. The multiple increase of the radioactive fallout, connected with this explosion, only slightly disturbed the gamma background radiation. The values of conductivity, however, increased significantly in spite of a grater concentration of condensation nuclei observed at that time.

The relationships between atmospheric electricity parameters, the condensation nuclei and intensity of radioactive exposure dose rates are discussed. These relations are modified by the complex influence of meteorological factors and ground conditions.

---

\*Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Warsaw.

\*\*Institute of Nuclear Research, Świerk near Warsaw.

\*\*\*Central Laboratory of Radiological Protection, Warsaw.



# WSTĘPNE WYNIKI POMIARÓW RADIOAKTYWNYCH, ATMOSFERYCZNO-ELEKTRYCZNYCH I METEOROLOGICZNYCH PROWADZONYCH W OBSERWATORIUM GEOFIZYCZNYM W ŚWIDRZE

## Streszczenie

W pracy opisano metody pomiarów, ziemskiego tła promieniowania gamma i opadu promieniotwórczego z atmosfery. Podano wyniki tych pomiarów wraz z elementami meteorologicznymi i elektryczno-atmosferycznymi. Pomiary wykonywano w latach 1970-1972 w Obserwatorium Geofizycznym IGF PAN w Świdrze w ramach trójstronnej współpracy pomiędzy Instytutem Geofizyki, Instytutem Badań Jądrowych w Świerku i Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej.

Na podstawie wstępnego rozpatrzenia wyników pomiarowych można stwierdzić, że średnie dzienne tło promieniowania gamma w Świdrze jest prawie stałe w ciągu roku ( $2.7 \mu\text{R/h}$ ), z wyjątkiem okresów silnego deszczu i występowania pokrywy śnieżnej.

W próbkach opadu promieniotwórczego zebranych na przełomie marca i kwietnia 1972 r. zaobserwowano świeże produkty rozszczepienia, pochodzące od eksplozji jądrowej dokonanej w atmosferze w Azji Środkowej na terenie Chińskiej Republiki Ludowej, dnia 19 marca 1972 r. Wielokrotne podwyższenie opadu promieniotwórczego związane z eksplozją nieznacznie tylko wpłynęło na zmianę tła promieniowania gamma. Podwyższyły się jednak wyraźnie wartości przewodnictwa, pomimo obserwowanych większych niż uprzednio stężeń jąder kondensacji.

Rola elementów elektrycznych (stężeń jonów i przewodnictwa) jako wskaźnika zanieczyszczeń substancjami radioaktywnymi lub jądrami kondensacji może być w pewnych sytuacjach ograniczona. Wynika to ze względu na przeciwny kierunek oddziaływań tych zanieczyszczeń na koncentrację jonów oraz na różnego rodzaju ich modyfikacje meteorologiczne. Elementy elektryczne najczęściej okazują się jednak wrażliwym wskaźnikiem jednego z tych zanieczyszczeń, przy znajomości drugiego lub braku jego zmian.

Full text in the Supplement

**I KRAJOWE SYMPOZJUM NAUKOWE  
WPŁYW ROZWIĄZAŃ MATERIAŁOWO-KONSTRUKCYJNYCH  
W BUDOWNICTWIE NA ZDROWIE CZŁOWIEKA  
Warszawa, 18-19 listopada 1980**

---

doc. dr Stanisław Michnowski, dr Stanisław Warzecha  
Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk  
Warszawa

2.3

mgr Andrzej Wajdewicz  
Politechnika Warszawska

**WPŁYW ROZWIĄZAŃ MATERIAŁOWO-KONSTRUKCYJNYCH  
NA JONIZACJĘ POWIETRZA  
POMIESZCZEŃ MIESZKALNYCH**

**Streszczenie**

Omówiono jonizację powietrza jako istotny parametr jakości mikrośrodowiska pomieszczeń mieszkalnych. Na podstawie badań własnych przedstawiono koncentrację jonów i aerozolu w powietrzu mieszkań nowego budownictwa, na tle odpowiednich koncentracji w miejskim powietrzu zewnętrznym oraz w powietrzu obszarów o stałym zanieczyszczeniu. Stwierdzono występowania wyraźnych zależności stanu zjonizowania powietrza od ścian betonowych, wykładzin z tworzyw sztucznych, ogrzewania i urządzeń wewnętrznych. Przedyskutowano wielkość tych efektów i ich ewentualny wpływ na jakość powietrza mieszkań. Przedstawiono potrzeby badań i kontroli jonizacji powietrza z punktu widzenia jej oddziaływania na zdrowie mieszkańców. Podano w związku z tym wstępne uwagi i wnioski dotyczące nowych rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych w budownictwie mieszkaniowym.

**EFFECT OF BUILDING MATERIALS AND STRUCTURES  
UPON AIR-IONIZATION IN FLATS**

**Abstract**

The air ionization is discussed as an essential quality parameter of the micro-environment of flats. On the basis of the authors' own investigations, the concentration is presented of ions and aerosol in air of flats in new buildings, against the background of corresponding concentrations in the outside urban air, and in the air

of regions of low contamination. The occurrence has been found of clear dependences of air ionization upon the concrete walls, plastics lining, heating and internal equipment. The magnitude of these effects is discussed and their possible influence upon the air quality in flats. The necessity is indicated of examining and checking the air ionization from the viewpoint of its effect upon the inhabitants' health. In this connection, preliminary remarks have been made and conclusions have been drawn, concerning new solutions with respect to materials and structures in residential building.

Full text in the Supplement

**I KRAJOWE SYMPOZJUM NAUKOWE  
WPŁYW ROZWIĄZAŃ MATERIAŁOWO-KONSTRUKCYJNYCH  
W BUDOWNICTWIE NA ZDROWIE CZŁOWIEKA  
Warszawa, 18-19 listopada 1980**

---

doc. dr inż. Henryk Korniewicz  
Centralny Instytut Ochrony Pracy  
Warszawa

2.4

mgr Jan Maria Kowalski  
Instytut Przemysłu Organicznego  
Warszawa

doc. dr Stanisław Michnowski  
Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk  
Warszawa

**WPŁYW ROZWIĄZAŃ MATERIAŁOWO-KONSTRUKCYJNYCH  
NA ZAGROŻENIE ZDROWIA  
PRZEZ ELEKTRYCZNOŚĆ STATYCZNA**

Streszczenie

Bryła budynku praktycznie nie przepuszcza do wnętrz mieszkalnych naturalnych pól elektrycznych, występujących w wolnej przestrzeni a mogących mieć wpływ m.in. na synchronizację rytmów biologicznych i oczyszczanie powietrza z naładowanych elektrycznie aerozoli. Z drugiej strony tworzywa sztuczne, stosowane w mieszkaniach na obudowy i wykładziny, silnie elektryzują się stwarzając zagrożenie dla zdrowia, a nawet życia mieszkańców. Mogą powodować pożary i wybuchy, bolesne rozładowanie elektrostatyczne i długotrwałe oddziaływanie na mieszkańców silnych pól elektrostatycznych, zmieniających naturalny rozkład ładunków elektrycznych w ciele ludzkim. Zagadnienia te są problemem ogólnoswiatowym, nie w pełni rozpoznanym, który w kraju powinien znaleźć wyraz w badaniach podstawowych i ściśle użytkowych. W tym zakresie zgłaszano szereg postulatów, zwracając szczególną uwagę na konieczność wprowadzenia ochrony antystatycznej w istniejących budynkach i na opracowanie technologii produkcji tworzyw sztucznych o ograniczonej elektryzacji. Podano również wyniki badań elektryczności statycznej w budynkach mieszkalnych, w których zastosowano różne tworzywa sztuczne.



## **EFFECT OF BUILDING MATERIALS AND STRUCTURES UPON HEALTH HAZARD FROM STATIC ELECTRICITY**

### **A b s t r a c t**

The body of a building does not practically let through into the residential interior of a building, the natural electric fields that occur in free space, and may have an effect, among other things upon the synchronization of biological rhythms and purification of the air from the electrically charged aerosols. On the other hand, plastics used in flats for fitmens and lining, become intensely electrified and constitute a danger to the inhabitants' health and even life. They may cause fires and explosions, painful electrostatic discharges and sustained effect upon inhabitants of strong electric fields that change the natural distributions of electric charges in the human body. These are world-wide problems not yet fully known, which in this country should find their expression in both fundamental and strictly functional research. Many requirements have been made in this respect, special attention being paid to the necessity for introducing antistatic protection in the existing buildings, and for developing the production technology of plastics with limited electrification. The results are also given of studies on static electricity in residential buildings, wherein different plastics have been applied.

Full text in the Supplement

PARTLY INSULATED WIRE ANTENNA FOR ELECTRIC FIELD  
AND AIR-EARTH CURRENT MEASUREMENTS IN THE FREE ATMOSPHERE

Jerzy BERLIŃSKI

Institute of Electronics, Warsaw Technical University, Warszawa

Stanisław MICHNOWSKI

Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Warszawa

A b s t r a c t

A model of partly insulated antenna for free-atmospheric electric field and air-earth current measurements is discussed. The method of measurement is briefly outlined. The effects of insulator of part of antenna on the electric field and current distribution as well as the effects of induction interaction between the upper and lower antenna are preliminary analyzed.

The results of the test soundings and estimated measurement errors are presented.

Full text in the Supplement

A CASE OF THUNDERSTORM SYSTEM DEVELOPMENT  
INFERRED FROM LIGHTNING DISTRIBUTION

Stanisław MICHNOWSKI<sup>\*)</sup>, Sven ISRAELSSON<sup>\*\*)</sup>, Jan PARFINIEWICZ<sup>\*\*\*)</sup>,  
Mohammed Ali ENAYTOLLAH<sup>\*\*\*)</sup>, Edward PIŠLER<sup>\*\*\*)</sup>

A b s t r a c t

Evolution of thunderstorms in a mesoscale convection system (MCS) developed over southern Sweden on May 18, 1982, has been outlined on the basis of space-temporal lightning distribution and routine meteorological observations. Four stages of development were distinguished: initial, mature, decay, and reminiscent stage with dispersed activity. The transition time between initial and mature stage was preceded by a period of almost exclusively positive flashes following the formation of a group of convective clouds. Aggregation of these clouds in one organized unit was associated with later change in the character of lightning activity. After a break, the c-g flashes appeared rapidly, almost simultaneously over the whole length of two narrow bands stretched along the edge of the cloud aggregation typical for the mesoscale convective system (MCS). More than half an hour later, these flashes faded away, also almost simultaneously along the deep convection core at the edge of the formed MCS element. During the mature

---

<sup>\*)</sup> Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Warszawa.

<sup>\*\*)</sup> Institute of High Voltage Research, Uppsala University, Uppsala, Sweden.

<sup>\*\*\*)</sup> Institute of Meteorology and Water Management, Warszawa.

stage of the system, all these flashes were negative and relatively frequent. Their signal strength was weak, in narrow range of amplitude values. The frequency of flashes fluctuated in time fairly regularly. The elongated bands of lightning flashes have been very slowly moving in the direction almost opposite to the relatively fast movement of the front. In the mature and decay stages, stratiform rain clouds without lightning developed downwind the edge. Lightning activity continued outside the decaying MS element.

Temporal changes of lightning frequency exhibit a characteristic periodicity, with a very pronounced period of about 30 minutes, nearly the same for all stages of the MCS evolution.

The signal strength of separate positive c-g discharges is much larger than that of positive and negative c-g discharges grouped in clusters. A single flash in cluster is quite often composed of a few return strokes, while separate flashes usually contain only one stroke. In our case, in contrast to the observations reported elsewhere, a higher percentage of double strokes in the flash was recorded for positive discharges than for negative ones. In clusters, only the negative flashes are sometimes composed of more than two strokes; we observed 3, 4, 5 and in one case even 7 strokes.

It seems evident that lightning data may bring valuable complementary information about MCS; their contribution might be greater if the recording technique is improved and relations of lightning formation and properties to meteorological processes within a thundercloud are better known.

## 1. Introduction

Rapid development of lightning location facilities has extended the application of monitored space-temporal lightning distribution both in research and in practical utilization. Considerable progress in the detection of cloud-to-ground lightning dis-

charges and their location has been made when broad-band magnetic direction finders have been introduced (Krider et al., 1980; Krider, 1982). An automatic set of such goniometers allows a continuous monitoring of the place and time of lightning flashes over large areas on a synoptic scale (Pisler, 1980; Israelsson et al., 1985). On this scale, the automatic lightning location system (LLS) may be of great use in detection and tracking of thunderstorms and in thunderstorm warning systems (Orville, 1983; Bosart and Sanders, 1986).

As has been observed (Israelsson et al., 1983), the LLS data can illustrate the space structure of convection in a synoptic scale, mesoscale or a fairly limited cloud scale. Unfortunately, our understanding of subsynoptic phenomena, as well as scale interactions, is rather limited. An improvement of overall knowledge of the smaller scales is required if we want to improve the reliability of short term forecasting of severe mesoscale phenomena.

Lightning phenomenology with the use of LLS over fairly limited areas has already been described by various authors (Maier and Krider, 1982; Peckham et al., 1984; Christensen and Israelson, 1987; etc.). However, the data on the lightning phenomenology of individual storm systems are still scarce.

Especially large paucity of observations concerns the formation stage of convective storms and their transition into highly organized mesoscale structures. Applying the lightning detection for this purpose, we may expect to get some additional details, which are not given, or hardly available by other methods.

This report presents a preliminary study of temporal-space distribution of c-g lightning discharges observed by means of LLS on May 18, 1982 over southern Sweden, using the routine meteorological data records available.

## 2. The method and accuracy of the c-g lightning location

The lightning location data were obtained in Sweden by a triangulation of return stroke azimuth angles determined by magnetic direction finders (DF) (see Krider et al., 1980). Each DF station



senses the electromagnetic field radiated by lightning by means of two orthogonal magnetic loop antennae and one electric flat plate antenna. Broad band gated antennae make it possible to get the preserved shape and polarity of the wave form reduced. The voltage of the signal produced by each loop is proportional to the lightning magnetic field derivative multiplied by the cosine of the angle between the loop and the direction of propagation of the incoming signal. The direction of the lightning flash was indicated by the ratio of the signals on the two orthogonal loops. The electronic instrument was designed so as to respond only to those field wave forms which are characteristic to electromagnetic signals emitted by the ground part of lightning channel (Kridner, 1982). The recorded time, angle, signal amplitude and the number of strokes per flash were transmitted from each DF station to the main station with the position analyser unit (PA). There, the individual lightning locations were computed automatically and stored with the corresponding data on cassette magnetic tape. A set of such stations constituted a lightning location system (LLS). Such a system allowed continuous, automatic observation, in real time, of the place and time of the lightning flashes together with their polarity, signal strength and multiplicity (Pisler, 1980).

The detection network in May 1982 consisted of three DF stations, at the following geographical positions:

Uppsala (DF and PA) -  $58.88^{\circ}\text{N}$  ,  $17.593^{\circ}\text{E}$  ;

Vitemölla (DF) -  $55.70^{\circ}\text{N}$  ,  $14.20^{\circ}\text{E}$  ;

Satenäs (DF) -  $58.44^{\circ}\text{N}$  ,  $12.69^{\circ}\text{E}$  .

The application of the system to a study of the space distribution of ground discharges on the mesoscale or in individual thunderstorms is limited by the magnitude of location errors. The error depends on where the observed lightning is located and on random and site errors in the direction finding stations. In the LLS used in Uppsala the smallest error, resulting from the relative position of the observed area to the configuration of the net of stations, is around the center of the network of stations. The thunderstorm system of May 18, 1982 was observed in this area.

Taking into consideration the relatively small random error of the set estimated by Enaytollah and Michnowski (1983), and assuming that a systematic error for flashes concentrated on a rather small area does not change much, it seemed possible to undertake an attempt of observing the distribution of lightning in thunderstorms in optimal position. However, the systematic error turned out to be so large that it was impossible to achieve a lightning location within one thunderstorm with an accuracy better than  $\pm 10$  km without additional corrections. The results we obtained could be used only to provide an approximate distribution of ground discharges on a relatively large scale (Michnowski et al., 1984).

Extensive studies on errors of the system applied were done by Schütte (1984), Schütte et al. (1986) and Pišler and Schütte (1985). As a result, corrections for the site errors were leaving the residual error at a value corresponding to a bearing error of  $\pm 2^\circ$ . Because of the small size of a thundercloud as compared to the size of the location network and because of the smooth shape of the error corrections as a function of azimuth, this residual error will only shift the clusters, but it will not change their internal structure significantly. Taking the random error values of  $1/2^\circ$ , obtained for the network used, the average scattering of the recorded locations of the flashes in relation to the real position should be about 3.8 km if all stations participated in the triangulation procedure, and about 2.7 km if only two nearest stations, in Satenäs and Vitemöla, were used. These roughly estimated values apply only if the thunderstorm is in the optimal position from the point of view of errors.

An analysis of the distribution of individual lightning flashes or their groups that could correspond to a thunderstorm, even after correction of data, is still a rough approximation. Nevertheless, with the use of corrected data it is possible to show some crude features in the distribution of flashes attributed to anticipated thunderstorms or thunderstorms independently detected by radar or satellite.

As a first approximation we tried to distinguish how the flashes placed within their close groups and outside were related to each other. We defined a group of flashes as a cluster if the maximum distance between each pair of them was smaller than 10 km and if the time separation between them was less than 15 minutes. In reality, the flashes collected according to this definition will not always be situated exactly within the area of cluster indicated on the map of distribution (e.g. by stippled lines in Fig. 7). On the other hand, some flashes not included in the area of cluster could in fact belong to it. There might also appear intra-cloud flashes or very weak c-g flashes disregarded by the detection system. Consequently, considering the errors of location, the clusters of flashes indicated by LLS should correspond in a rather crude approximation to real lightning distribution produced by individual thunderclouds. The above definition of a cluster, chosen to some extent arbitrarily, was only a working definition. Sometimes, the criteria for including a flash into the cluster appeared to be not adequate, e.g. in clusters  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  described later. The flashes occurring there at the same period of time over an elongated band of cloud formed a group of clusters or one elongated unit instead of the shape used in our analysis. The approximations applied seem generally sufficient for introductory identification of thunderstorms or horizontally extended thunderclouds but should be taken with great caution for the identification of smaller units.

Acceptance of the c-g flashes by LLS depended on a combination of the following factors: radiation pulse amplitude distribution, propagation damping and receiving threshold. The corresponding value of detection efficiency was estimated at about 80 % for the area under consideration on May 18, 1982 (Schütte et al., 1986).

At the present moment we are not fully convinced that all discharges distinguished by the LLS as c-g positive discharges are really positive. Some of them, especially at large distances, may come from intercloud flashes; however, in the first approximation



we can assume that the indications in the region concerned are mostly correct.

**3. Synoptic background for the occurrence of strong convection with thunderclouds**

The area of our special interest, indicated by the rectangle in the middle of Fig. 1, is a fragment of Scandinavia. Taking into

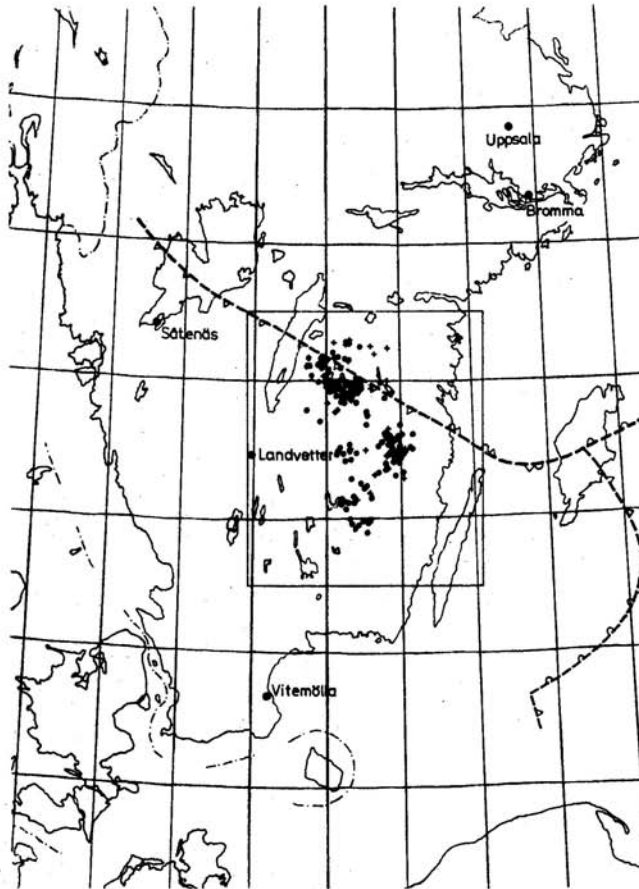


Fig. 1. The area with observed thunderstorms in the rectangle fragment of Scandinavia. Black points denote the places of negative lightning flashes, crosses - of positive flashes. Lines of fronts correspond to 12<sup>h</sup> GMT. LLS goniometric stations were located in: Uppsala, Sätenäs and Vitemölla. The aerological sounding was made at Bromma, Landvetter and Sundsvall (outside the map).

account space and time scale, the convection phenomena observed there can be related to the so called  $\beta$  mesoscale.

The initial situation will be related to 00<sup>h</sup> GMT on May 18, 1982. The southern Scandinavia was then in the region of lower pressure with a frontal system. According to an analysis of the Offenbach regional meteorological center, a cold front line with developing wave was separating the warm air over the Baltic from the occlusion extending northwest of the considered region. This analysis was corroborated by the warm wedge overhead, as seen on the 850 hPa map at 09<sup>h</sup> GMT (Fig. 2). The main mass of warm air extends over the Baltic, being separated at the lower surface

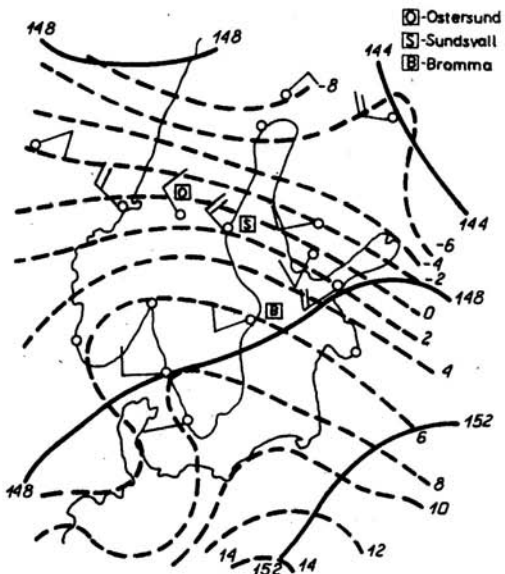


Fig. 2. The temperature ---, wind  $\circ$  and geopotential — distributions of the 850 hPa level at 09<sup>h</sup> GMT on May 18, 1982.

by a folded system of fronts. Thus, the initial situation indicates that in the south Scandinavia region under study, a relatively cold air mass prevails at the bottom and a cold wedge is forced upward.

Vertical sounding profiles of stations Sundsvall, Bromma and Landsvetter also exhibit characteristic features (Fig. 3).

The sounding at Sundsvall is typical for fresh, cold air mass pouring from the north at the bottom part of the atmosphere.

The sounding at Bromma could be regarded as typical for warm air, while that at

Landsvetter represents a relatively old, transient cold mass covered in the middle atmosphere by portion of warmer air of westerly advection. This situation is related to 00<sup>h</sup> GMT.

The pressure depression at the Earth's surface passes through the saddle point at the 850 hPa level (Fig. 4) in the vicinity of



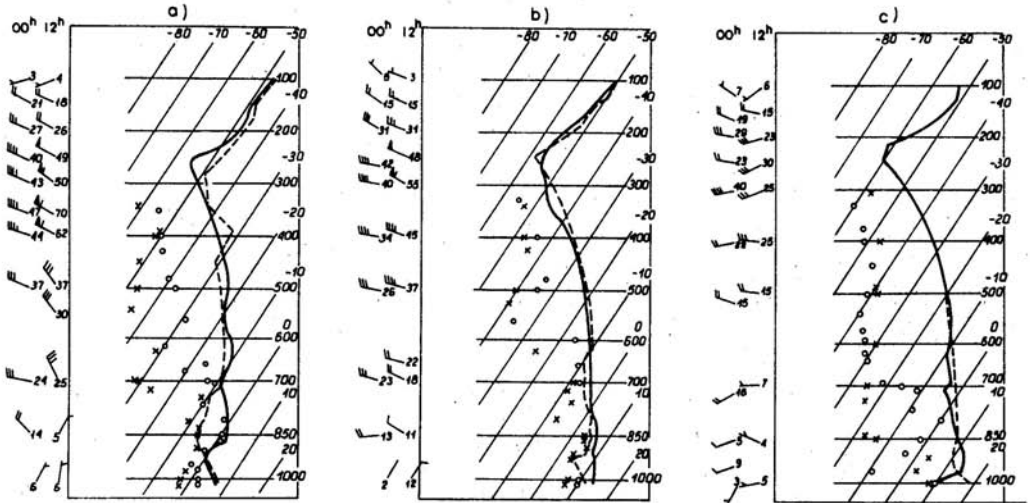


Fig. 3. Vertical profiles of temperature at 00<sup>h</sup> — and 12<sup>h</sup> GMT ---- on May 18 over Sundsvall (a), Bromma (b) and Landvetter (c). o depicts dew point at 00<sup>h</sup>, x - dew point at 12<sup>h</sup>.

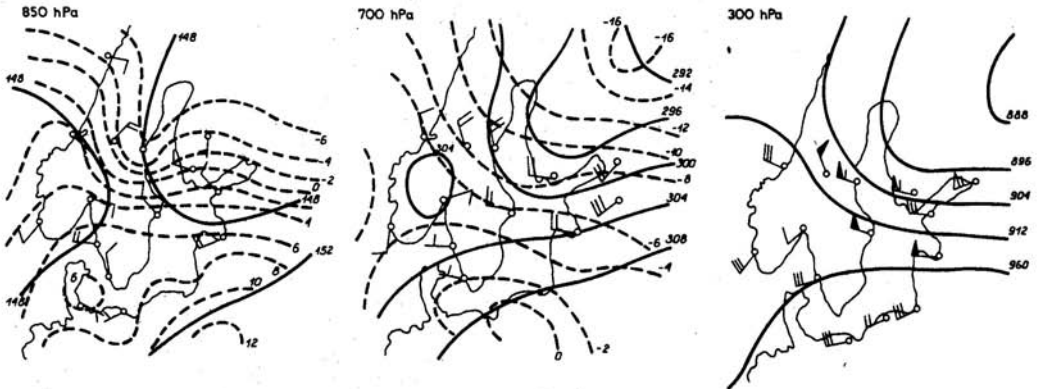


Fig. 4. The temperature ---- and geopotential — distributions at 12<sup>h</sup> GMT on May 18 on the 850 hPa (a), 700 hPa (b) and 300 hPa (c) levels.

Ostersund. At the 700 hPa (Fig. 4) a northwesterly jet, characteristic for a slipping of warm air mass over the North Baltic, is relatively well marked. In south-eastern part of the region this

jet turns into a westerly one with a southerly component, running parallel to the 700 hPa isotherm due to thermal wind principle. The field of apparently increased velocity, typical of the jet stream, appears around the 300 hPa level, reaching 60-70 kt. in the divergence region (Fig. 4).

Throughout 12 hours, from 00 to 12 GMT, on May 18, 1982, the distribution of velocity and pressure field in the studied region changed significantly, which produced a distinct change in the thermal field distribution. The most characteristic changes are seen in upper charts. At the 850 hPa level (Fig. 4) one observes a marked increase of geopotential by 3 dkm in Ostersund, resulting in a junction of higher pressure regions to form a N-S higher pressure line. At the same time, a slight, relatively small but well-marked depression, forming cyclonic circulation has developed over western Norway and the Baltic. The saddle point, lying on the higher pressure line, moved slightly southwards. On the eastern coast of Sweden, from Sundsvall to Bromma, one sees a well developed thermal trough, indicating a strong advection of cooler air in this region. A characteristic anticyclone forms in the 700 hPa level over the southern part of the Scandinavian Mountains. On its north-eastern side, the jet acquires a southerly component, and further to the south it turns east with a westerly component (Fig. 4). On the 300 hPa level the jet markedly branches off. One branch runs from the Norway Sea, being - according to the 12<sup>h</sup> GMT data - stronger, and the other, south-westerly, runs over the southernmost regions of Scandinavia. The convergence of the jets takes place somewhat north of the region of our interest.

The surface synoptic chart presenting pressure field analysis on mean sea level, wind vectors observations and temperature distribution is shown in Fig. 5. Isobars are drawn by 1 hPa, thus allowing to see the convergence zones. Two low centers, corresponding to the old front system and the active cold front, are marked.

The spatial scheme of the pressure field that makes provisions for macro (quasigeostrophic) circulation over the studied region (at 12<sup>h</sup> GMT) is shown in Fig. 6; the movement of the cold

front projected on the Earth's surface in mesoscale is also shown in Fig. 7a,b,c,d.

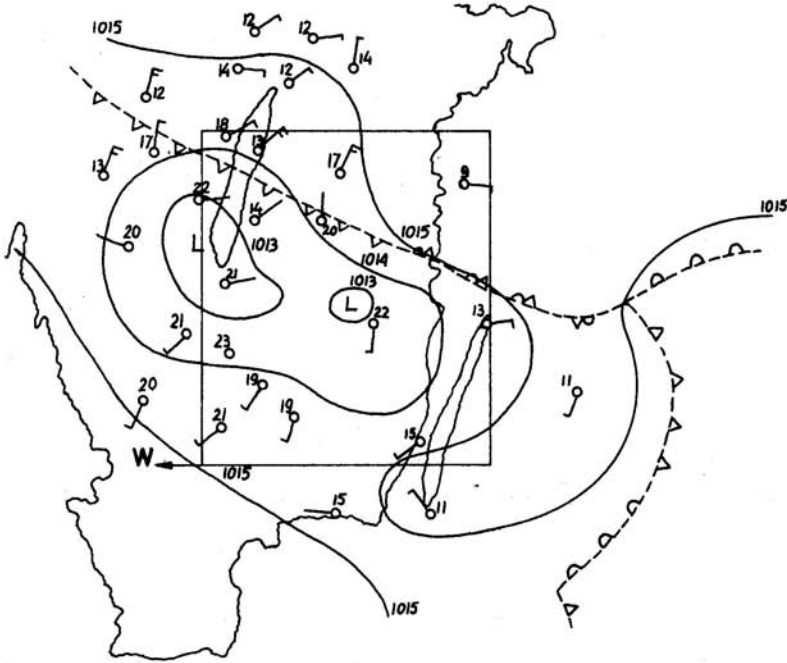


Fig. 5. The surface synoptic chart presenting pressure field analysis on mean sea level, wind vectors and temperature distribution.

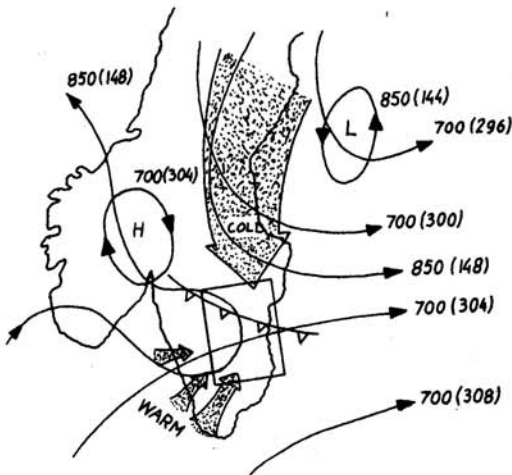


Fig. 6. The spatial scheme of pressure field that makes provision for macro-quasigeostrophic circulation at 12<sup>h</sup> GMT. Geopotential contours correspond to the pressure level.



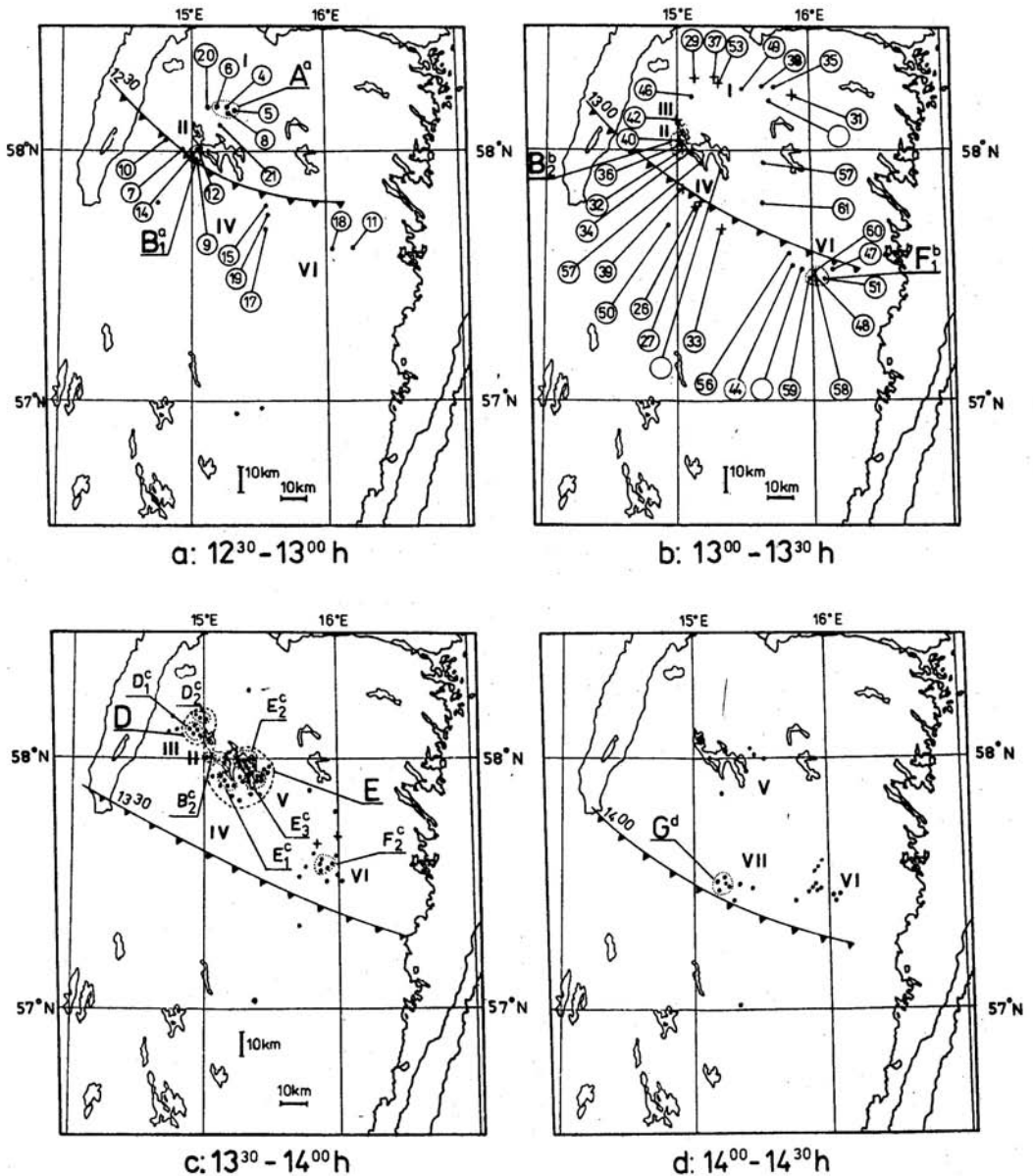
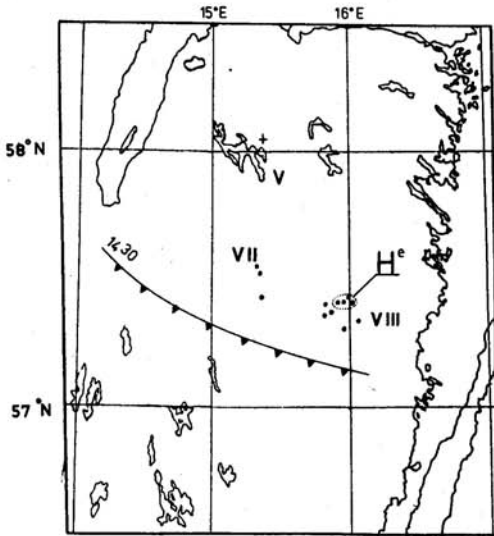
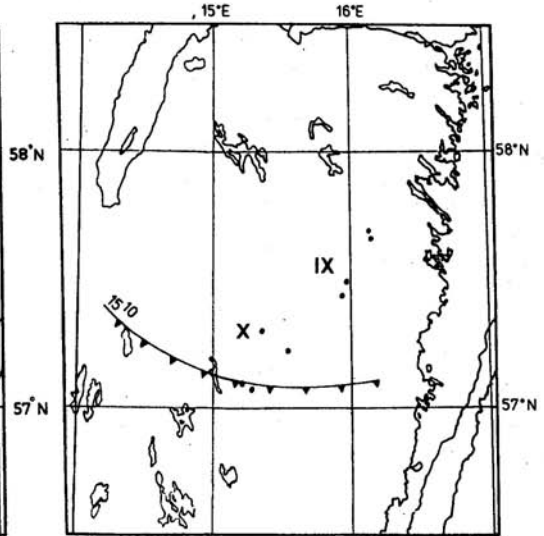


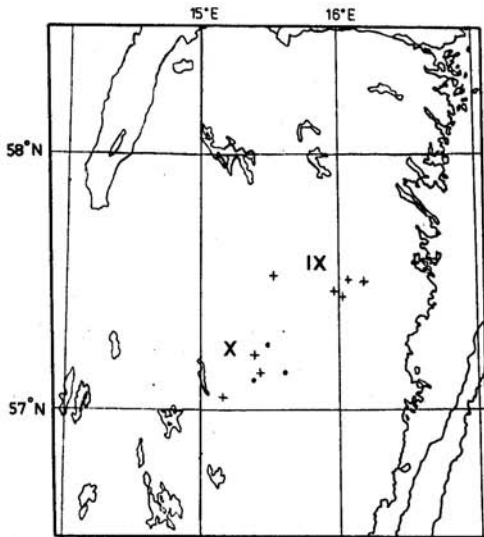
Fig. 7. Approximate space distributions of c-g discharges in half-hour intervals. Negative flashes are indicated by points, positive - by crosses. Clusters, surrounded by stippled lines are indicated by block letters; small letters in their upper right show the corresponding periods, the numbers in the lower right



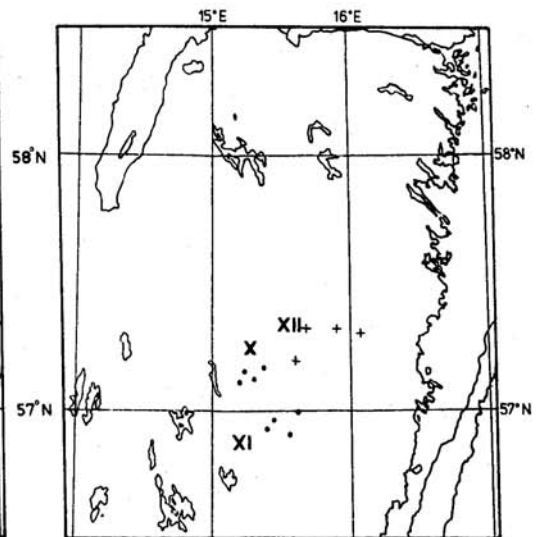
e: 14<sup>30</sup> - 15<sup>00</sup> h



f: 15<sup>00</sup> - 15<sup>30</sup> h



g: 15<sup>30</sup> - 16<sup>00</sup> h



h: 16<sup>00</sup> - 17<sup>00</sup> h

side denote a time sequence of clusters situated almost at the same place. Large thunderstorm areas are surrounded by dashed lines. Roman numbers indicate regions of lightning activity mentioned in the text.



Analysing the temperature profiles we see that, while at Bromma the advection of cooler air occurred at all levels of the lower troposphere, at Sundsvall the cooling took place mainly in the 900-700 hPa layer and nearly no changes of values and gradient of temperature were observed in the overground layer. The most interesting situation was at Landvetter, where the inversion of advection, with warmer air at the bottom and cooler air higher up, was observed.

To sum up, let us list the characteristic features of the thermal, wind and pressure structure accompanying the development of convection:

1. Weak-gradient initial situation, in which three mass types, characteristic of an old occlusion front, are present; the upper jet convergence in the initial phase was weak.

2. Evolution of the pressure field, which, exhibiting relatively small changes in the saddle region, shows a substantial change in the circulation regime on both sides of the saddle. As a result of the formation of the higher pressure line (hPl) and a local anticyclone at the 850 and 700 hPa levels, the processes on the eastern side of the hPl became blocked (isolated). On the 500 hPa chart (not shown here) and the 300 hPa chart (Fig. 4) this gives rise to an extended "hollow" in the geopotential field isohypses; in this hollow, when the differences in the value of geopotential are small, the region of higher pressure at the 700 hPa level is accompanied by depression in the upper levels.

Though aerological data to document the evolution of the field between the main synoptic observation hours 00<sup>h</sup>, 06<sup>h</sup>, 12<sup>h</sup>, 18<sup>h</sup> GMT are missing, we can infer from the surface information that the essential change in the pressure field took place between 09<sup>h</sup> and 12<sup>h</sup> GMT. It turns out that additional information in this matter is provided by observations of time-space distribution of lightning discharges which will be discussed later on.

3. In the lower troposphere, the initial macrocirculation regime and the subsequent rapid local circulation changes in the vicinity of the considered region, result in an inflow of a rela-

tively warmer, moist air at the bottom from south west, thus favouring a strong instability in this particular region.

4. In the region of enhanced instability, there is a relatively strong change in the direction and velocity of wind with height and strong convergence of jet stream at the 300 hPa levels.

4. Space-temporal distribution of c-g lightning flashes in relation to meteorological conditions

In the situation outlined above, the development of convection was indicated and followed by observing the changes of the cloud-to-ground lightning distribution recorded by LLS and by the available meteorological data.

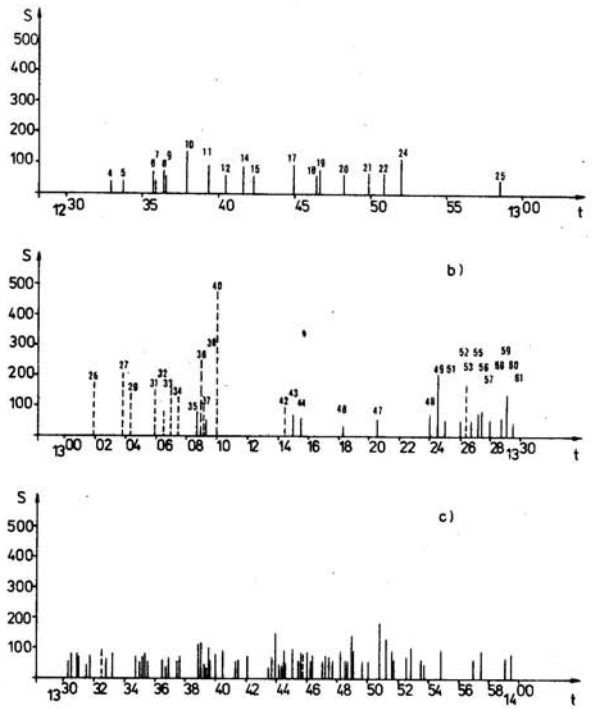


Fig. 8. Time sequence of recorded ground flashes of Fig. 7a,b,c in local time. Dashed lines represent field strength amplitudes of positive flashes; continuous lines - those of negative flashes. (Values of field strength are normalized to 100 km).

#### 4.1. Lightning location data and their presentation

The space distribution of the recorded lightning flashes and their polarity is presented in Fig. 7 at half hour intervals. Every individual flash determined by LLS is marked by successive number index which makes it possible to identify the time of their occurrence. Their time sequence for the first period of activity is illustrated in Fig. 8. The polarity and the signal strength (as usually normalized to 100 km) of the corresponding flashes are also shown.

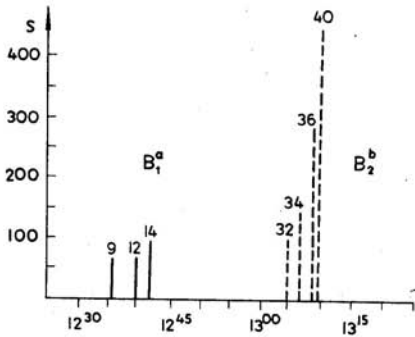


Fig. 9. Examples of temporal distribution of c-g lightning clusters  $B_1$  and  $B_2$ , located almost at the same place but shifted in time.

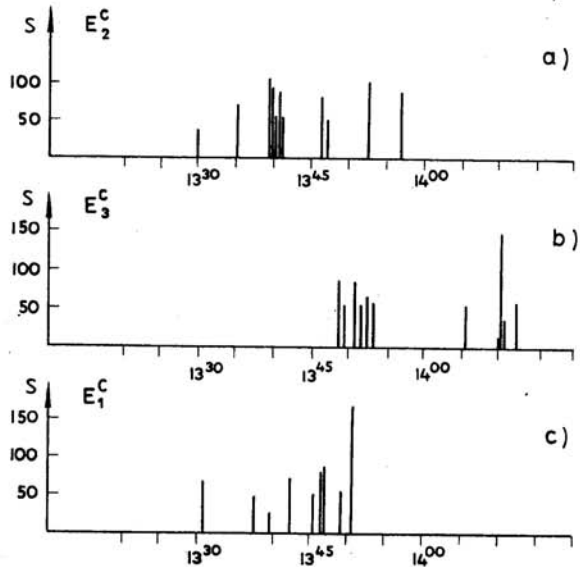


Fig. 10. Example of temporal distribution of individual flashes in associated clusters  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ .

Figure 9 presents examples of time distribution of flashes which belong to clusters  $B_1$  and  $B_2$  indicated in Figure 7a, b. The dashed lines show the values of amplitude of the normalized signal strength of positive discharges, the thin lines - of negative ones. Examples of time position of individual flashes in associated clusters of active large thunderstorm E are shown in Fig. 10.

Figure 11 illustrates time of occurrence, place and duration of the lightning activity in individual clusters and their surrounding or in regions identified by Roman numbers in Fig. 7.

The total duration of lightning activity, from the first noticed lightning - to the last one, amounts to about  $04^{\text{h}}33^{\text{m}}$ ; average lightning rate is  $1.2 \text{ min}^{-1}$  (excluding very weak activity in the last stage  $\delta$ ).

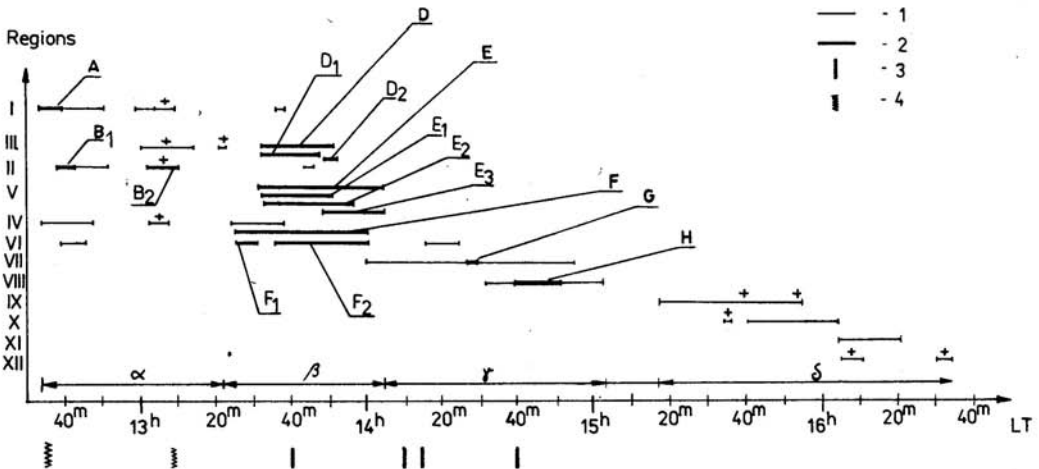


Fig. 11. Time of occurrence and duration of lightning activity in individual clusters and their close vicinity or in regions identified by Roman numbers in Fig. 7. 1 - Duration of lightning activity, 2 - duration of clusters, 3 - time of radar display, 4 - time of satellite imagery. Block letters denote the thunderstorms; block letters with number at the lower right side denote individual clusters. Crosses indicate the occurrence of positive discharges. Symbols  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  present, respectively, the developing mature, decay and final stage of the MCS evolution.



#### 4.2. Changes in the distribution of c-g lightning flashes

Looking at Figures 7 and 11 it is possible to distinguish the following four stages of temporal evolution of the observed c-g lightning activity:

$\alpha$  developing stage; preliminary dispersion of individual flashes and their relatively small, short living, clusters A, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, D<sub>1</sub>;

$\beta$  mature stage; appearance and development of large clusters D<sub>2</sub>, E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, E<sub>3</sub>, F, acting jointly for a longer time;

$\gamma$  decay stage; dispersed, individual and cluster activity and its decay;

$\delta$  final stage; after a longer break the occurrence of not organized, weak activity without clusters.

From synoptic analysis we can infer that the main change in the pressure field over southern Scandinavia took place between 09<sup>h</sup> and 12<sup>h</sup> GMT, i.e., 08<sup>h</sup> and 11<sup>h</sup> LT as used by LLS. On the other hand, cloud-to-ground flashes started from 12<sup>h</sup>30<sup>m</sup> LT and appeared with a characteristic delay of about 3 hours. In such a period of time, the wind field might adapt itself to the pressure field and form the advection of air masses of different thermodynamical properties at different levels, as shown by our former considerations.

Before the deep convection has developed over the observed area, the surface was receiving a considerable amount of solar heating. Simultaneously, the cold front, bringing fresh, cold air has approached from the north, preceding the lightning activity. The position of the front lines given in Fig. 7 is a very rough approximation. In fact, within the considered area of wind shear, a regular front shaped as a line is not very likely. We should rather expect a strong mixing and heterogeneity of air masses at different height levels.

Lightning activity began on the east side of large lake Vättern behind the cold front line (Fig. 7a). The orographic situation produced differences in ground temperatures. The first c-g

lightning, marked by index 4, appeared at 12<sup>h</sup>30<sup>m</sup> LT in the post-frontal region between Miölby and lake Sommen. This first negative discharge was followed by negative flashes. The cluster formed by them, labelled A, corresponds to a convective cloud which has most probably played an important role of triggering the development of following thunderclouds over regions I, II and III (Fig. 7a). After a break, the activity expanded in the form of separated flashes located around and outside the area covered previously by the cloud with cluster A and the area of the cold lake (Fig. 7b).

Next flashes appeared at 12<sup>h</sup>40<sup>m</sup> LT in the front area. At the beginning, all discharges were negative with a relatively small signal strength. On the south side of lake Sommen (region II) small cluster B was formed. Discharges belonging to both thunderstorms, A and B<sub>1</sub>, quickly ceased. This was followed by the outbreak of a new, quite intensive lightning activity (Fig. 11). Strangely enough, almost all flashes in the broad south-north area carried positive charges to the earth. All positive flashes, whether separated or grouped in cluster B<sub>2</sub>, had very large signal strengths (Fig. 8b). The flashes of B<sub>2</sub> were placed close to the site of previous cluster B<sub>1</sub> and were stretched along, or near to, a line in front of the lake shore. Besides, as can be seen from Fig. 8b, the flashes observed from 13<sup>h</sup>00<sup>m</sup> to 13<sup>h</sup>15<sup>m</sup> LT over the whole mesoscale area were almost exclusively positive. This episode ceased abruptly almost at the same time everywhere and no larger lightning activity has been observed in the following 12 minutes.

The space and time scale of the appearance of positive c-g discharges suggests the domination of other factors responsible for this episode, besides surface temperature differentiation, orographic influences or internal factors involved in the development of individual thunderclouds. It seems that such positive lightning activity might have been a precursor or indicator of changes in circulation on a scale larger than that of individual clouds separately.

New activity with almost all negative c-g discharges was initiated just after 13<sup>h</sup>15<sup>m</sup> LT in the prefrontal area, where a new cluster, F<sub>1</sub><sup>b</sup>, was formed. After its decay, an explosive increase of negative flashes occurred in regions labelled D, E and F in Fig. 7c. This rapid change, simultaneous for all these regions, may mean an essential transition into a new form of development of thunderstorms.

The negative c-g flashes began to appear in elongated groups along, or near to, a line shaped at first as a semicircle and later on as a line striking SW. The distribution of elongated groups of flashes is seen more distinctly if we present it in 15-minute intervals instead of half-hour ones (Fig. 7c). Nevertheless, the elongated form of clusters corresponding to thunderstorms D, E, F can be seen in 30-minute distribution of Fig. 7c. Meanwhile, the hypothetical front has propagated southeasterly, whereas the thunderstorms with intensive activity persisted almost in the same place.

As compared to the previous and later stages, the recorded flashes were very frequent, but average amplitudes of their signal strength were much smaller (Fig. 17). This suggests that such frequent and weak discharges could be produced by vivid but shallower convection organized in the mature stage of the MCS development.

The shape and position of the elongated lightning group (containing cluster E<sub>1</sub>) exhibit characteristic features. This group is separated by moderate distance from the northeasterly located main band of discharges. This distribution in bands seems to be a distinctive feature, as compared to random distribution typical in other clusters. One could also notice the time sequence of the appearance of subclusters and their displacement during the development of a large storm system. We may notice that the lightning activity propagation does not merely follow the direction of the cold front movement. The front propagates southwesterly, while the slow movement of convective phenomena was almost opposite in north-west direction with noticeable south-east component roughly perpendicular to the front direction. The lightning area remained



backward relative to the front propagation. The precise time resolution of lightning observations made it possible to follow - in short time scale - the sequences of individual flashes and to find out that c-g flashes in cluster  $E_1$  and  $D_1$  occurred almost simultaneously, and earlier than those in cluster  $F_2$ , being placed along the NW-SE line. Another remarkable feature of convective activity propagation is that after the decay of clusters  $E_1$  and  $E_2$ , next cluster  $E_3$  were formed on the north-east side of  $E_1$ , that is in opposite direction to the front movement.

Looking over the time distributions of c-g flashes in individual clusters it is sometimes possible to find a period of characteristic short series of flashes, regularly one after another, seen e.g. in Fig. 10. Such regular sequence might suggest a steady stage in the development of the cloud.

The large thunderstorms, with a group of clusters, developed in stage  $\beta$ , exhibit the most intensive c-g lightning activity in the observed convection system evolution. This stage began and stopped rather abruptly without being preceded or followed by a number of individual separate flashes. It is only after the decay of cluster  $F_2$ , that a weak, dispersed activity appeared over region VI. Apparent groups of close flashes in this region were not included into clusters because the time criterion was not fulfilled for them.

After the intensive lightning activity concentrated in clusters stretched along the line of deep convection and after the subsequent cease, a new period of activity was observed (Fig. 11). It was characterized by domination of dispersed flashes with only two clusters, G and H (Fig. 7d). Flashes in cluster H were located over a small lake, not shown in Fig. 7d.

It is evident that large changes of active places or clusters in an unstable area do not result from the motion of thunderclouds but correspond to successive growth of new storms.

No positive flashes were recorded at that time, except of one, separate, unusually powerful positive flash which occurred in the area of previous cluster  $E_3^c$  about 45 minutes after its last flash.



The activity died at 15<sup>h</sup>00<sup>m</sup> LT over the whole area.

After about half an hour of entire silence, a new stage of lightning activity developed. In this period, marked by  $\delta$  in Fig. 11, only separate flashes, quite distant from each other, were recorded. At first, separate, negative c-g flashes appeared in region IX, where a number of positive flashes occurred in this stage as well. During this time, the lightning activity began to propagate south-easterly, approximately along the Väjö-Västervik line, from region IX to X and XI, and finally it turned back to region XII, adjoining region IX placed at the south-east: a few positive discharges in region XII were followed by a total decay of activity.

The south-east direction is transverse to the direction along which the large thunderstorms were formed in stage  $\beta$ . In this respect the activity in the last stage seems to be similar to the activity in preliminary stage  $\alpha$ . There is also a similarity in the propagation of lightning activity in the preliminary and the last stages, contrary to the mature stage  $\beta$  in which mesoscale convective phenomena were strong enough to dominate over the influences of cold front circulation.

#### *4.3. Radar and satellite data in the first stage of c-g lightning activity*

The location of lightning flashes recorded by LLS was roughly consistent with radar and satellite data. The available range of these data generally illustrate the evolution of clouds in the first stages of lightning activity.

Figures 12a,b,c,d exhibit the radar PPI contours of the precipitation echoes at 12<sup>h</sup>00<sup>m</sup>; 12<sup>h</sup>40<sup>m</sup>; 13<sup>h</sup>10<sup>m</sup> and 13<sup>h</sup>40<sup>m</sup> of local time. Major lakes and the seashore are outlined in the background of the maps.

The first two radar maps depict the clouds in incipient stages of development of convective activity. At 12<sup>h</sup>00<sup>m</sup> LT (Fig. 12a) the radar reflectivity contours show the position and height of the initial rain cloud north of lake Sommen. This cloud initi-

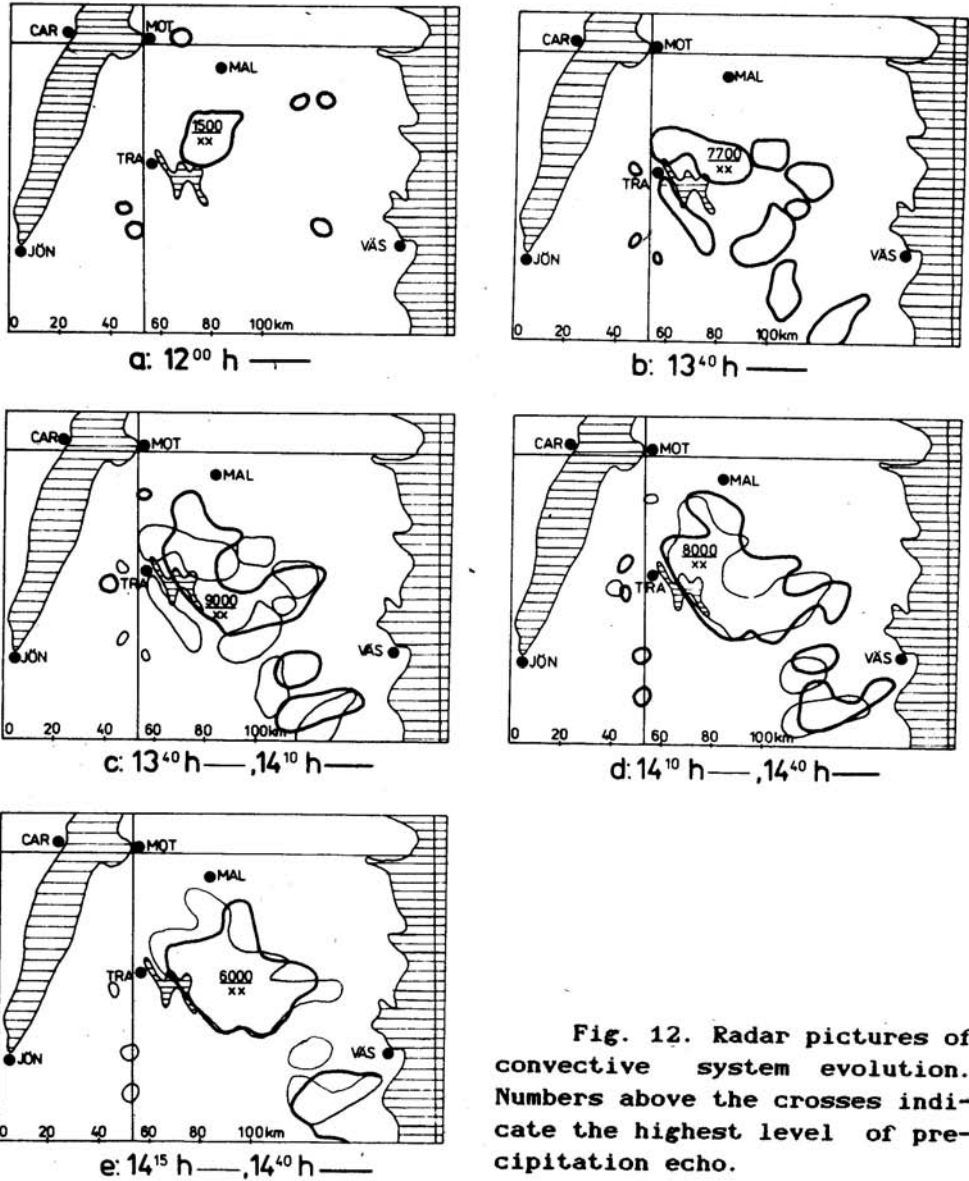


Fig. 12. Radar pictures of convective system evolution. Numbers above the crosses indicate the highest level of precipitation echo.

ated the convective activity. At 12<sup>h00</sup>m LT its precipitation echo was broadly spread but not highly developed (1500 m). Half hour later the first negative c-g flashes, part of which appeared in the previously mentioned cluster A, corresponded to the northern part of this primordial cloud. The initial deep convection built

up there. Besides, the echo of a few very small dispersed clouds was noticed at the south-east and west side of the main cloud. At 13<sup>h</sup>40<sup>m</sup> (Fig. 12b) there appeared radar echoes of large clouds formed along, or near to, the circular upward line on both sides of the previous initial cloud. Two separate larger contours appeared south-east of those clouds.

Dispersed individual flashes were associated with individual small clouds, not all of which are visible in Fig. 12a. In one of such clouds, on the south-east side of the lake, a series of negative c-g discharges developed; part of them formed cluster B<sub>1</sub> in the region labeled II.

After a small break, the positive lightning activity, with a remarkable cluster B<sub>2</sub> of positive flashes, rapidly began to be active in the vicinity of previous cluster B<sub>1</sub> near the lake.

The height of the clouds responsible for these positive flashes was small. The Cb clouds reached their maximum height approximately at 14<sup>h</sup>10<sup>m</sup> LT (Fig. 12d), when the radar echo reached a height of 9000 m, while between 13<sup>h</sup>00<sup>m</sup> and 13<sup>h</sup>15<sup>m</sup> the cloud radar echo height was less than 7700 m measured at 13<sup>h</sup>40<sup>m</sup>. If the vertical development of thunderclouds were assumed to be monotonous, the positive flashes would correspond to the height interval of 4500-5500 m. The vertical development of thunderclouds could be considerably suppressed by the presence of the previously mentioned wind shear in the lower troposphere and the real cloud height would be probably much lower. The satellite image of these clouds at 13<sup>h</sup>10<sup>m</sup> LT is more likely to correspond to the decaying stage of the cloud associated with B<sub>2</sub>.

After about half hour the radar reflectivity contours of two clouds, or cells, could be noticed near the site of cluster B<sub>2</sub> (Fig. 12b,c). The first one, c<sub>1</sub>, placed nearby in the south-west direction, had an elongated reflectivity contour stretched south westerly; the other one, c<sub>2</sub>, in the north-west, had an expanding echo contour of the previous initial cloud. At the north edge of the elongated cloud, as it was seen from Fig. 7b, cluster B<sub>2</sub> was placed. After its decay and the following gap, a rapid burst of



negative c-g discharges was observed. Frequent discharges began to occur along this cloud; part of them was gathered in cluster  $E_1$ , which does not reflect the tendency of elongated distribution according to our cluster criteria.

The discharges in this peculiar stage were associated with flashes occurring almost simultaneously on the south-east edge of the main core of the second evolving cloud (Fig. 7c). Cluster  $E_2$  belongs to these discharges. Different clusters from different clouds (cells) were labelled with the same letter E, in spite of the distance between them and differences in their life span; we suppose that they are associated to form one unit operating as a whole. Later evolution of these clouds corroborated this assumption. A remarkable fact is that frequent flashes, characterized by small amplitude of signal strength, were spread over both sides of clouds  $c_1$  and  $c_2$ , united into one structure of MCS. Later these clouds will be sometimes called cells.

Considering the space and time distance between cluster  $B_2$  and these clouds it seems reasonable to suggest that the observed appearance of the intensive lightning activity of these clouds was affected by the decay of a nearby low cloud which previously generated cluster  $B_2$ . This concerns, first of all, the peculiar cloud  $c_1$  and the edge of the main mass of clouds (Fig. 12c), which developed predominantly from  $c_2$ .

A characteristic change in the aggregation of these clouds has developed quickly, during about half hour. Fig. 12c shows the conglomeration of individual clouds into one main cloud with core reflectivity contour in the shape of a crescent seen at 14<sup>h</sup>10<sup>m</sup> LT. In the meantime, the top of the radar echo increased from 7700 to 9000 m.

The location of flashes and their clusters roughly corresponded to the echoes of the main block of clouds, of the elongated cloud associated with the block, and of the still separated clouds to the south-east of the main cloud block. Lightning activity associated with cluster  $D_1$  continued at the north side of the main cloud. Flashes of cluster  $E_1$  were stretched along the elon-



gated cloud, which remained separate and has not much changed its position until its disappearance before 14<sup>h</sup>10<sup>m</sup> LT. Between this cloud and the edge of the main cloud, an echo band free from precipitation was indicated also by radar. This band can be recognized in the distribution of lightning locations presented in Fig. 7c. It is possible to distinguish there two lightning groups in the area of large thunderstorm system E: the first one is along the separated cloud with cluster  $E_1$  and the other one lies along the edge of the main cloud ensemble with cluster  $E_2$  and later with  $E_3$  (Fig. 12c). This distribution, associated with two groups of negative flashes on both sides of the band without precipitation, cannot be accidental. The lightning group with  $E_2$  on the edge of the main cloud was followed by formation of  $E_3$  and of surrounding flashes. Group  $E_3$  appeared after the decay of the counterpart activity of group  $E_1$ .

During this time, the main cloud expanded in the stratiform cloud area, without flashes, formed behind the deep convective core at the edge of the main mass of the cloud. This stratiform area seems to be associated with the previous vigorous convection acting along the mentioned narrow core. The convective edge of clouds, indicated by radar and LLS, was transverse to the direction of the inflow of warm and moist air from the south-east, envisaged by the synoptical analysis in the midlevel (Fig. 6). The expanding area of the cloud system moved very slowly north-eastwards. According to the next radar picture, a gradual subsidence of the highest cloud was noticed (Fig. 12d). The lightning activity on the edge began to die out. After 14<sup>h</sup>40<sup>m</sup> LT only a few flashes occurred to the north-east of lake Sommen.

Surprisingly enough, the distribution of these flashes corresponded to the previous biline distribution; two of the flashes were placed along the previously mentioned edge line (Fig. 7d). The other three flashes were located parallel to this line but in front of it, about 9 km in the direction of the movement of the system, at a distance similar to the average displacement between flashes in cluster  $E_1$  and corresponding flashes in cluster  $E_2$ . The

two lines along which the flashes were distributed are shifted by about 10 km to NE, keeping almost the same distance between each other. The time of appearance of all these flashes, between 14<sup>h</sup>10<sup>m</sup> and 14<sup>h</sup>16<sup>m</sup> LT, was by about 30 minutes later than the time of the highest activity of clusters D<sub>1</sub>, E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>. The last flash at 14<sup>h</sup>50<sup>m</sup> LT appeared at about the same space and time distance from the group of the previous five flashes. This all seems to mean that the cloud system kept itself as an organized entity which almost did not move in relation to the earth surface, or moved very slowly, with a velocity approximately equal to the vector sum of the advection flow of lower cool air from the north and warm air inflow from the south-east.

In our case, the time fluctuations of lightning activity in a narrow edge area of this moving system are of rather regular, cyclic character, as will be shown in the next subsection.

The decay of the lightning activity stretched along the edge of the cloud system probably reflects a transition from a highly organized circulation structure of deep convection into a stratiform structure of the later stage of the cloud system. During this transition, the previously mentioned group of a few negative discharges of very small signal strength, followed by a positive flash of enormous signal, was observed. Assuming in first approximation that the top of the highest precipitation echo decreased linearly, we estimated the height of the cloud which might produce the last positive c-g discharge. Using the heights of the echo at 14<sup>h</sup>40<sup>m</sup> and 14<sup>h</sup>10<sup>m</sup> LT we noticed that at the time of the discharge the maximal height of the echo tops was about 5.5 km. This height does not differ from that estimated for the period of positive c-g discharges at the beginning of the convective system evolution. This time in the decaying stage of penetrative convection, the number of such discharges was small. In the decay stage the main role began to be played by the remaining stratiform clouds, the subsidence of which is characteristic of the decay of the whole convective system.

The study of the evolution of convective system in this stage



should be made with the use of the precipitation tracers rather than the lightning tracers we used.

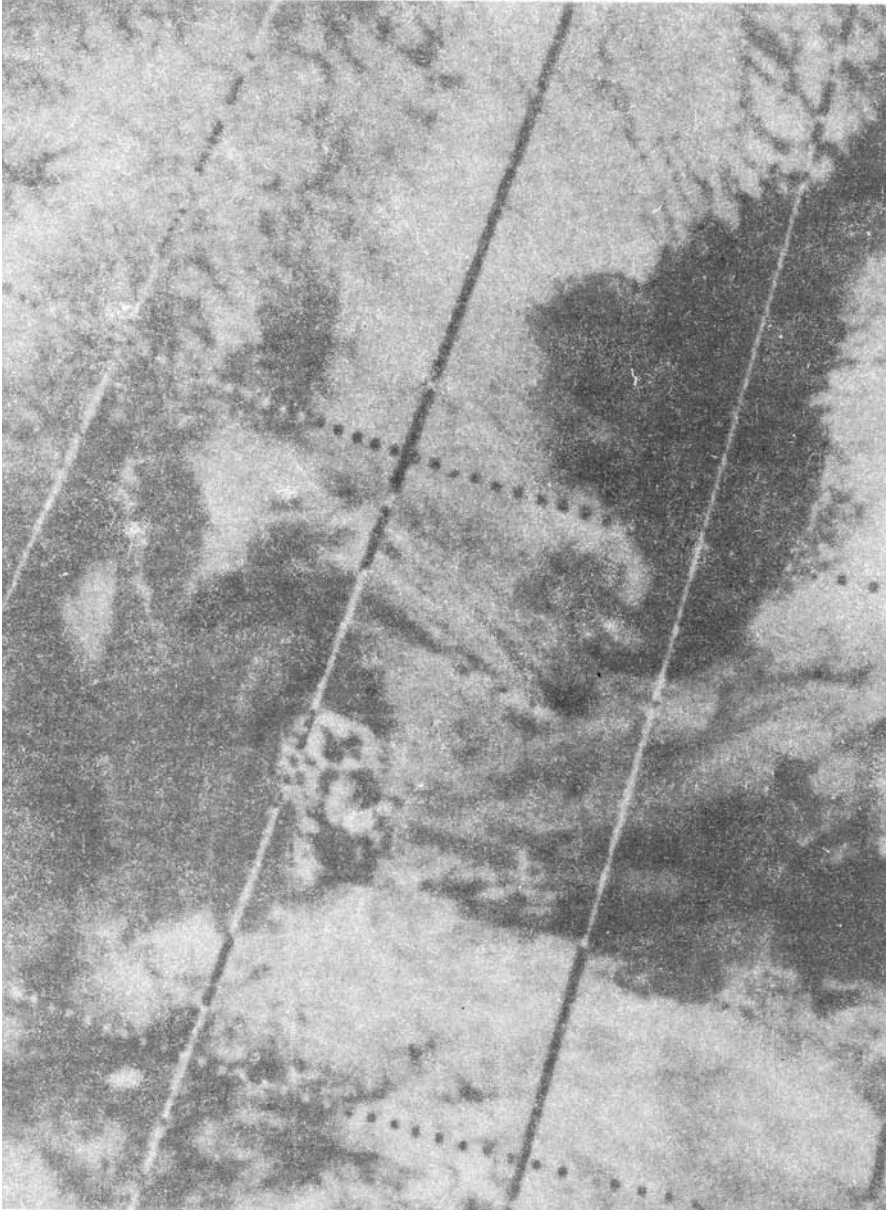


Fig. 13a. Satellite image of May 18, 1982. Mod. VIS 5, rise  $12^{\text{h}}22^{\text{m}}00^{\text{s}}$  GMT, fade  $12^{\text{h}}35^{\text{m}}10^{\text{s}}$  GMT (from NOAA 7TW).



**Fig. 13b. Satellite image of May 18, 1982. Mod. IR, picture time 13<sup>h</sup>09<sup>m</sup> LT, satellite no. 7, orbit no. 4645 (from University of Dundee Electronics Laboratory, Scotland).**



Similar evolution, but in a much weaker form, has been observed in separated clouds to the south-east of the main complex. Comparing the radar reflectivity patterns of these clouds it can be seen that they distinctly tended to merge with the main complex, expanding and shifting themselves towards NW. Cloud-ground lightning activity corresponding to these clouds was dispersed in space and time, forming, however, a long living and active cluster F. In the last radar display available we see that the edges of the main cloud system and of the separate clouds in question formed an almost straight line and the shape of their precipitation echo became more elongated towards NW. Unfortunately, without further data on reflectivity contours, it is not possible to show how far all these processes were developed before the decay of the whole system.

Satellite images of the area under consideration are shown in Fig. 13a,b. Fig. 13a represents the early stage of the convection development, prior to the high lightning activity. The second image corresponds to the period when cluster  $B_2$  has ceased to be active and before  $F_1$  began to be formed. It is possible to see the edge of the low clouds which corresponds to the front line and the top of clouds in the place roughly corresponding to region V and  $F_1$ . This means that cluster  $B_2$  originated from a cloud that was of rather small vertical extent. This is in accordance with the radar observations which gave grounds for believing that clouds placed in the south-east side of the lake were not highly developed at that time, reaching an altitude of about 5500 m.

Unfortunately, satellite pictures taken, e.g., 30 minutes and 60 minutes later are not available now, so the clouds with clusters of flashes in their most active stage and decay stage cannot be traced on them.

#### 4.4. *Cloud-ground discharge frequency*

Thunderstorm activity, illustrated by the frequency of c-g discharges, shows a specific pulsation of the convection system observed, which development manifested itself by variation of the

recorded frequency of flashes. A periodicity in changes of the lightning activity over the whole area under consideration can be seen in Fig. 14a, which presents the time variation of the total number of the recorded flashes at 2-minute intervals. Some cyclic increases and decreases of lightning frequency are to be noticed. They correspond to characteristic stages of convection development presented in Fig. 11.

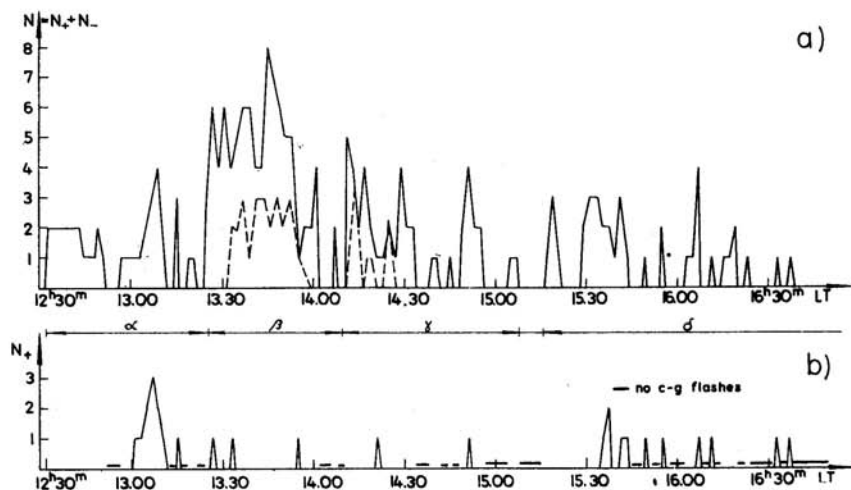


Fig. 14. Time variation of frequency of c-g flashes: numbers of discharges per 2 min. periods. Continuous lines represent: a) negative and positive flashes, b) positive flashes. Dashed lines represent the frequency of flashes grouped in clusters.  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  same as in Fig. 11.

The average frequency in periods  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  amounted to 0.75, 1.91, 0.9, 0.45 flashes per minute, respectively. These values show that the convective system observed in northern latitudes on May 18, 1982 was a very weak one in comparison to those usually observed in midlatitudes and especially in tropical regions. The heterogeneous conditions over Sweden due to the interplay of the contrasting effects of warm ocean (bay strom) and the cold north make it possible to observe a rich variety of thunderstorm devel-

opment patterns. The case analysed here makes it possible to see the development processes on a small space and time scale, which makes some features of their evolution easier to observe.

In the developing stage  $\alpha$ , shortly after an almost steady lightning activity and its subsequent small decrease, the activity changes evidently. Exclusively positive flashes appeared over a large area. The decay of this short, peculiar period was followed by the next pause and a rapid large increase of flashing rate produced by a new structure of thunderstorms. After reaching its maximum, the activity died for a short time, to appear again over the neighbouring region, being now less expanded than previously. Lightning frequency in this period,  $\gamma$ , began to decrease gradually and all activity died for more than half an hour. Period  $\delta$  of the weakest activity, stretched in further postfrontal area, exhibits again almost steady level of average flashing rate for a relatively long time. In this period the fluctuations observed reflected the cyclic appearance and decay of small, dispersed thunderstorms.

In Fig. 14a fluctuations of the rate of c-g flashes belonging to clusters are presented by dashed line. A rather regular periodicity of these flashes is to be noticed in the stage of the highest activity of the system.

Using fast Fourier analysis it is possible to get average periods of time variations for the changes in lightning flash activity presented in Fig. 14a. The smoothed results are shown in Fig. 15. We can note slow variations, with a period longer than 10 minutes and with maximum amplitudes for periods of 30 minutes or longer. A relatively fast time fluctuations of the lightning flash

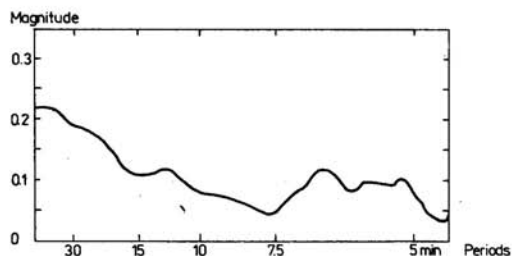


Fig. 15. Result of fast Fourier analysis of lightning frequency time variation.



activity, with periods of 4-7 minutes, seem to indicate a time regularity of the processes leading to the electrification or charge dissipation in the clouds. It would be worthwhile to compare the mentioned periods with the periodicity of rainfall rate fluctuations over the considered area. However, these problems are beyond the scope of the present report.

#### *4.4. Suggestions concerning the formation of the convection system observed*

The cloud system under consideration displays some features observed elsewhere, e.g., by Houze (1985) and Bluestein (1985) in USA; Browning and Hill (1984) in Great Britain; or by Zipser (1985) in tropic regions. Those authors have applied the term mesoscale convective system for an aggregation of convective storms organized in a system which is characterized by a narrow line or sometimes circular band of deep convection area, accompanied with a wide and long stratiform cloud area, identifiable by radar or infrared satellite imagery.

This definition encompasses our case and different types of mesoscale aggregations of convective storms, e.g., cloud clusters, mesoscale complexes and squall lines. Various mechanisms like fronts, external forcing, symmetric instability, gravity waves, subsidence propagation, etc., may be responsible for such organization of clouds into a convective system (Klemp, 1985).

Our case seems to exhibit some characteristic properties of a mesoscale convective system developed in the northern latitudes. The spectacular phenomena observed are very complex and deserve a detailed study. Unfortunately, more meteorological data, with space and time resolution appropriate to mesoscale observations, are needed even if we only want to make a preliminary conceptual model of these phenomena. Also, the lack of detailed surface data makes it difficult to present a consistent picture of the processes observed. Although the obtained data are not sufficient for a conclusive interpretation, we find it possible to make some preliminary suggestions.



In the developing stage, large role has to be played by the boundary layer controlled by shallow cold front from the northwest and by surface conditions. The enhanced instability of the air created conditions favourable for the development of cumulus clouds in the area under consideration. At 10<sup>h</sup> LT, cumulus clouds (1/8) with a base at 1000 m were noticed in the moist air between lake Sommen and Nassjo. Their number has been increasing to reach 4/8 - 6/8 Cu and Cb at 11<sup>h</sup> LT (aircraft observations, Bergens, 1982). Initial cells have rained into unsaturated air, shower cells have probably begun to cluster into more vigorous convective clouds within their convergence zone. At 12<sup>h00m</sup> LT, in addition to small precipitation echo contours of such separate clouds, a widely spread precipitation echo was displayed in this area by radar. This primordial cloud was most likely to initiate a further evolution of the whole group of clouds within the MCS. The large area of rain indicated by radar might have generated a mesoscale downdraft maintained by the evaporation of rain. The initial cooling has created cold air which spread at low levels, thus producing convergence and allowing moist convective cells to grow around. Formation of a group of clouds, precipitation echo of which occurred along, or near the circle with decaying rain cloud in the centre, was probably shifted by the wind towards the southeast. The first flashes in the rapidly developed cluster A were not preceded by a sequence of separate weak flashes. Separate individual flashes (also negative) occurred later, being dispersed over the area under consideration. The group of discharges in the first cluster of the main cloud was located in the site of the previous echo contour of the primordial cloud. The later flashes dispersed around this cloud indicated an expansion of the developing clouds, shown in the second radar display as well (Fig. 12b). The structure of the MCS element presented at that time a little more than a loosely defined cluster of individual convective clouds (cells). Later on, two of them developed an intensive lightning activity and began to play dominant role. These were: c<sub>2</sub> or the main cloud with cluster A, formed in place of the primordial cloud; and elon-

gated cloud  $c_1$  with cluster  $B_1$ , formed a few minutes later than cluster A.

Negative c-g flashes observed after the decay of cluster A were spread out beyond the clouds placed around the centre, already free from precipitation echo. Before 13<sup>h</sup>30<sup>m</sup> LT the c-g discharges were mostly located on the outer edge, or entirely outside the reflectivity contours of these clouds, as displayed at 13<sup>h</sup>40<sup>m</sup> LT. This shift is attributable to the influence of attractive forces acting on these clouds, pushing them towards clouds  $c_1$  and  $c_2$  in which deeper convection has been manifested by intensive lightning activity. For the clouds around the above-mentioned circle, this force was sufficiently strong to counteract the force of wind acting in opposite direction. The two clouds at the southwest side of the said cluster of clouds, being displaced too far away, were probably beyond the effective attraction.

The exceptional position and role of the elongated cloud, which remained as a separate cloud at nearly the same place, was manifested by intensive lightning activity in the form of positive cluster  $B_2$ . This activity appeared there during the previously mentioned episode of exclusively positive c-g discharges observed during longer time over the large area under consideration. The positive discharges have usually a very long channel within the cloud (Beasley, 1985). This feature could concern the clouds  $c_1$  and  $c_2$  in which the cloud discharges might much dominate over the c-g flashes, like usually in squall line clouds (Mazur and Rust, 1983). This episode seems to show that other factors than the local or internal ones must have been engaged in the evolution of the cloud into the organized MCS. The mesoscale factors have been active in the same time over large area.

The cloud attributed to cluster  $B_2$  influenced the development of the surrounding clouds in which the initiation of a new stage of lightning activity was observed.

The c-g discharges of negative polarity appeared rapidly, stretching over the whole length of cloud  $c_1$ . As compared to the previous ones, they were relatively very frequent but their signal

field strengths were small. At the same time, similar discharges appeared on the other side of the band without precipitation, i.e. on the edge of the south-east side of the second main cloud  $C_2$  (Fig. 12c). This associated activity was located along the edge of the main group of agglomerated clouds, at an average distance of 10 km.

Assuming that this activity was initiated under the influence of the downdrafts of the preceding cloud attributable to cluster  $B_2$ , it was possible to expect a subsidence propagation of the deep convection cells with lightning activity along cloud  $c_1$  and the edge of the main cloud  $c_2$ . Such an explanation (warm bulb initiation) was suggested by Moncrieff and Miller (1976) for the formation of squall lines in Venezuela. In reality, however, the c-g flashes of these two clouds occurred in narrow bands almost at once along the whole length of cloud  $c_1$  and the counterpart edge of the main cloud block. This was indicated by the location of subsequent flashes in the bands. Random time distribution was found along the whole length of  $c_1$ , and the corresponding edge of  $c_2$ .

This fact seems to contradict the supposition that thunderstorms D, E, F represent usual multicellular thunderstorms. Also contrary to this opinion might be the very slow movement of these clouds in the direction opposite to that of the relatively fast propagation of the front.

It seems possible to expect a local two dimensional circulation in the plane of vertical cross-section perpendicular to the elongated deep convection line (DCL). For this plane, Fig. 16 shows a tentative sketch of the conditions which might have initiated the development of local mesoscale circulation. The double line arrows indicate, on the left and right side of the outline, the wind components in plane perpendicular to DCL. The velocities, illustrated by the length of arrows, were drawn from the observed wind distribution (Fig. 3). The left profile, taken from Landvetter, covers the height up to 100 hPa; the right one, from Bromma, includes only the lower troposphere. Both correspond to the 13<sup>h</sup> LT.



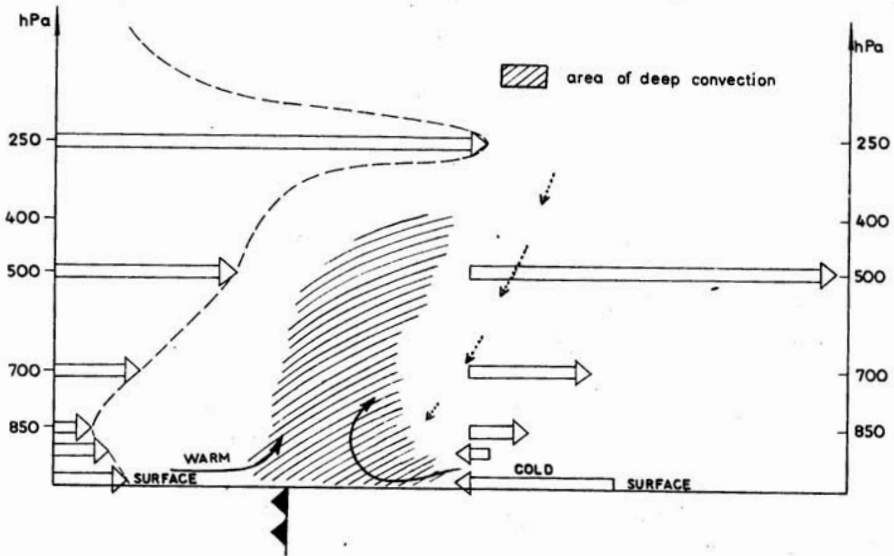


Fig. 16. The preliminary conceptual sketch of mesoscale circulation in the initial stage of the MCS evolution. The outline corresponds to the cross-section perpendicular to the thunderstorm line.

Vertical motion components were derived from these profiles by applying the continuity equation. The values, presented by stippled arrows, are estimated as a function of height for the higher tropospheric air levels in the area of thunderstorm line. They correspond to synoptical background of the situation before the formation of MCS showing on a transfer of momentum from the macroscale jet in the higher troposphere to the lower troposphere; the corresponding mesoscale descent motion follows the surface cold front propagation.

An inflow ahead of convective edge of the cloud ensemble was at all altitudes. The main jump updraft was fed with warm boundary layer air and forced by the progression of the cold low level air from the opposite side. The supposed jump updraft and lower part of the expected overturning updraft is illustrated by black arrows. In reality, we have a three dimensional picture with fairly strong,



especially between 650 and 200 hPa, wind component parallel to the deep convection line.

The rudimentary sketch in Fig. 16 is a first suggestion concerning the mesoscale circulation at 13<sup>h</sup> LT before the appearance of positive discharges episode. To be able to propose a conceptual model for this stage and for the stages of further evolution of the MCS, it would be necessary to have more data with proper space-time resolution and to apply advanced theoretical analysis. Some problems related to that item will be approached in a separate report.

#### 6. Signal strength and multiplicity of c-g discharges

Besides position, time of occurrence and polarity of c-g lightning discharges, the LLS system has also provided the values of signal strength and the number of return strokes of the corresponding flashes. These data can give some additional information on the lightning activity of the convection system observed and are also of some practical importance. In Figures 17a,b the time variations of multiplicity and of amplitude of field strength of first stroke are presented. The continuous line connects the points representing mean values for 2-minute intervals.

The data presented show that the large amplitudes of field strength (given usually in arbitrary units) tended to occur at the beginning and at the end of individual periods of activity. It is also remarkable that the largest values of field strength normalized to 100 km were most often associated with single, separate flashes which can be attributed to single, rather small, thunderclouds shown on radar precipitation echo. In clouds of stronger lightning activity, large amplitudes occurred occasionally in the first flashes, and more frequently in the last ones. This is especially true in the case of positive discharges.

Present observations have shown a rather new pattern of lightning activity. In the observed evolution of convection system a period happened, in which the flashes recorded in a considerably large mesoscale area, almost simultaneously changed their polarity.

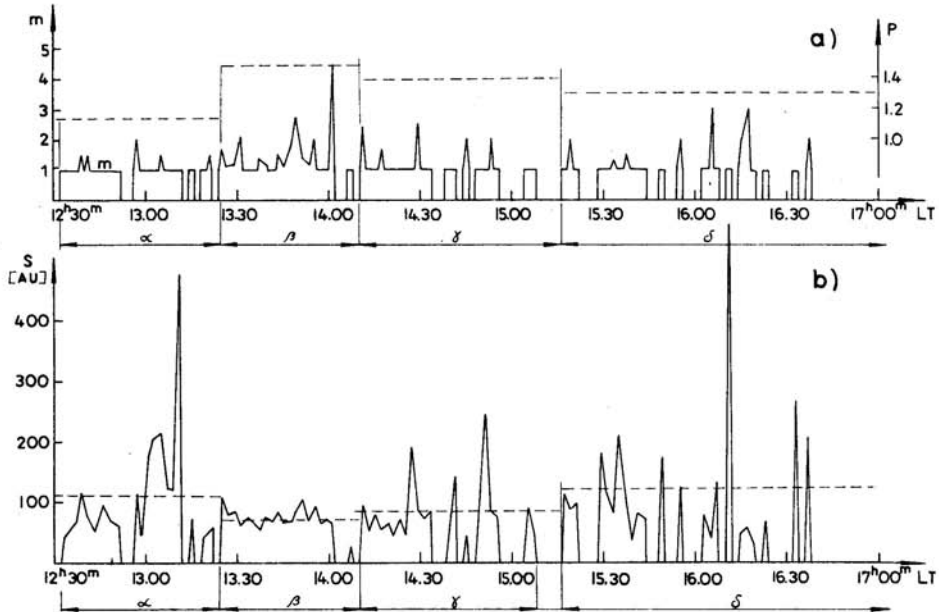


Fig. 17. Time variation of multiplicity and signal strength of flashes (mean values per two minute periods): a) multiplicity,  $m$ ; mean number of strokes per flash for different stages,  $p$ ; dashed lines present mean values of strokes per flash,  $m$ , for different stages; b) signal strength of the first return stroke normalized to 100 km, dashed lines present mean values of normalized signal strength for different stages.

The flashes began to be only positive and dispersed. During this time, however, one group of positive discharges, which were close together in space and time, appeared as a cluster. The flashes were most likely to belong to one cloud.

After a break, we observed the enhancement of activity in the mature stage (Fig. 11), when the amplitudes of almost all negative flashes were small in comparison to those of single flashes in the preceding stage. A few positive flashes recorded in this area during this time had a small amplitude of signal strength as well. Another characteristic features of lightning activity in the mature stage was the small differentiation of signal amplitude values. An amplitude much exceeding the average value for negative

flashes was observed only once. This flash occurred north of lake Sommen after a subsequent cease following the mature stage of activity. Small regular fluctuations of signal strength values, seen in Fig. 14, belong to the flashes in the area of cluster F, active this time during the decay of MCS lightning activity (Fig. 7d).

Very large negative amplitudes of signal strength were also noticed in a separate single flash which occurred at the edge of the cloud mass at 14<sup>h</sup>30<sup>m</sup> LT, i.e., a long time after the activity in this area has decayed.

The large amplitudes in the last stage  $\delta$  were again associated with positive separate flashes (Fig. 14b). One of them was of extremely large signal amplitude, more than six times larger than an average signal field strength in the mature stage of frequent discharges.

These features are of scientific as well as practical importance. Formation of positive discharges with so large amplitudes had to depend on the stage of development of internal processes in clouds, including the poorly known electrification processes (Fuguy, 1982). On the other hand, the occurrence of a large number of such discharges seems to be affected by environmental factors, regulated by the evolution of general convection in the mesoscale range. It is possible to expect that the studies of the interaction of processes on both scales can give useful information about the electrical structure of clouds producing such discharges and be of help in the diagnosis and forecasting of the MCS evolution. It is known (Brook et al., 1982; Ishi et al., 1984; Beasley, 1985) that positive flashes tend to exhibit higher peak current and larger continuing current than negative ones. Thus, they increase the hazard for flying objects, power grids and transmission facilities. The susceptible level of lightning protection of constructions of this type is to be taken into consideration in the presence of such unexpected, extraordinary flashes. Besides, the possibilities of location and timing of such flashes (Jacobson, 1982) should be known for flight safety of smaller aircraft, etc.

These requirements concern also the multiplicity of strokes



in an individual flash. This property of lightning discharges is also related to the electrical structure of a cloud and to lightning protection problems. It can be seen that multiplicity corresponding to the flashes gathered in clusters was larger than the multiplicity corresponding to flashes dispersed in separate places. This behaviour appeared most evidently during the time of activity in stage  $\beta$  at 13<sup>h</sup>20<sup>m</sup>-14<sup>h</sup>10<sup>m</sup> LT. The highest number of strokes was noticed in the lightning which occurred at the end of this period in cluster F. This flash exhibited 7 strokes, which was the highest number of strokes noticed by the LLS in one flash on May 18, 1982.

In the group of last discharges, during the decay of stage  $\delta$ , three positive flashes consisted of two strokes. The flashes were tightly grouped (Fig. 7h), but they were not included into clusters because of their strong scattering. In addition to other factors, this may be due to the localization error, which was a bit larger, as this area was outside the area of the best accuracy of the LLS. However, one of the last positive discharges, placed separately, had two strokes, which is inconsistent with the suggested pattern.

To get a better insight into the observed phenomena, let us examine the following figures. Figure 18 presents a histogram of frequency of all and of positive c-g flashes as a function of the field strength amplitude. The multiplicity of strokes in individual flashes is also indicated. The distribution of the number of return strokes in the flash versus the amplitude of the field strength shows that multiple flashes are almost absent at values higher than 250 AU. The only exception at 570 AU corresponded to the positive discharge in the last decaying phase, which was preceded by another positive discharge. A characteristic feature is that the majority of multiple discharges had the signal strength smaller than 100 AU. It can be seen that the multiplicity of return strokes in single flashes from low clouds and of large signal amplitude is much smaller than the multiplicity of discharges of small amplitude during violent increase of electric activity. A



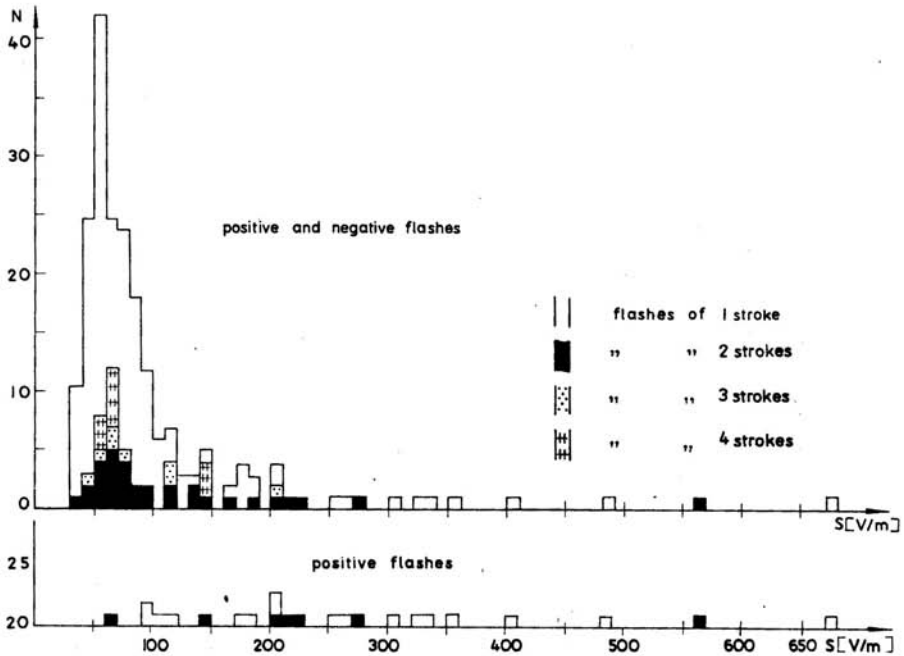


Fig. 18. Histograms of frequency of c-g flashes, their multiplicity and polarity as a function of the field strength of the signal. Numbers of flashes with 1 and 2 strokes are imaged by columns from the horizontal axis up. Numbers of flashes with 3 or 4 strokes are imaged incrementally by columns placed above the columns of 2 or 3 strokes.

fairly pronounced variety of multiplicities appears in the flashes in such cases.

Figure 19 indicates the percentage of the occurrence of multiple flashes according to their kind. The diagram shows that the probability of multiple strokes is greater in flashes of clusters than in all, separated and clustered, flashes. It is interesting to note that the percentage of double strokes for positive flashes in the total number of positive flashes observed is larger than analogical percentage for negative discharges.

The obtained LLS data on space temporal distribution of lightning events and their properties would be more useful in an analysis of the evolution of a mesoscale thunderstorm system if we

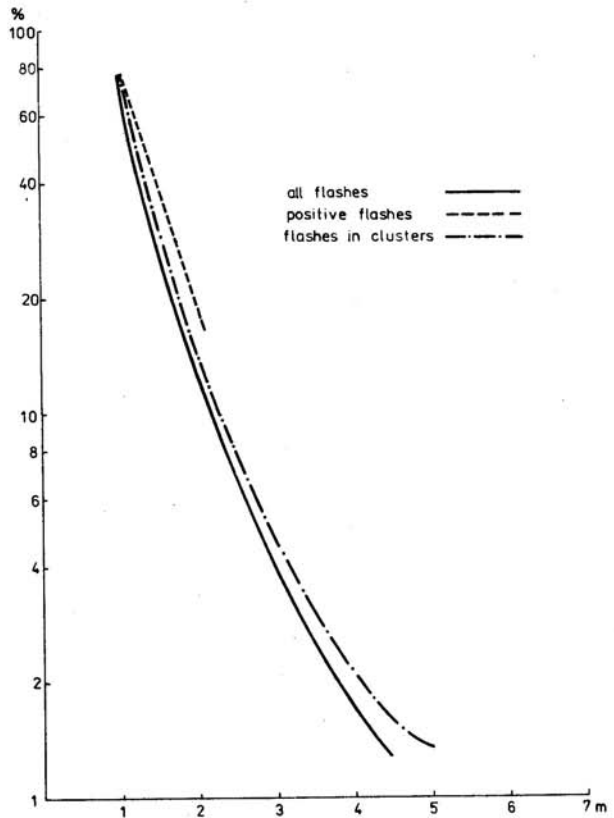


Fig. 19. The percentual number of strokes per flash in all flashes, in positive flashes and in flashes grouped in clusters.

took into account more meteorological observations. A more thorough interpretation of the lightning monitoring with additional meteorological and topographical data available will be attempted in the next report.

#### 7. Summary and preliminary suggestions

Space temporal distribution of c-g lightning flashes without additional observations would provide little information about the structure and development of the observed mesoscale convective system. However, if we supplement it with even some routine meteorological observations, we may obtain data that are hardly available by other means. These data may include: the place and time of occurrence of convective events attributable to the organization of convective clouds into some systems, evolution of deep convec-

tion activity in these systems, variation of deep convection activity, etc.

Cloud-to-ground lightning discharges, as depicted by the location system, appeared to be very well correlated with convective activity, as observed by conventional means (Lopez and Holle, 1986). Nevertheless, these correlations which are sufficiently high for location of synoptical and mesoscale convective phenomena, should be treated more carefully if we consider them in the cloud scale (Lopez et al., 1983), even in the case of good accuracy of lightning location. Although the lightning discharges are predominantly a product of convection, the initiation and development of discharges depend also on the precipitation and stage of development of macro- and microstructure of clouds. Also in time domain the lightning data are not so simply related to convection. The information brought by lightning is to some degree delayed in respect to dynamical changes, of air motion itself, e.g. the changes in circulation. The observed gaps in lightning activity may probably cover the periods of significant changes in convection motions caused for instance by an interaction of processes with different space-temporal scale.

In spite of the above objections, the time-space location of c-g discharges has been proved reliable and very convenient to use for getting a better insight not only into the characteristics of the flash hazard for the needs of lightning protection but also into the evaluation and development of thunderstorm mesoscale systems. Our observations seem to be in accordance with this and other similar opinions (Lopez and Holle, 1986).

An analysis of synoptic situation showed that an inflow of relatively warmer air mass at lower part of the troposphere from south-west with simultaneously progressing cold and fresh air from the north, resulted in a rapid increase of instability and the evolution of the convection changes. The synoptically expected appearance of strong convection, associated with the rapid reconstruction of macrosynoptic situation was confirmed by the occurrence of c-g lightning activity.

It was possible to single out the following characteristic stages of evolution of the observed thunderstorm system: developing stage, mature stage, decay stage and final period of dispersed activity.

In the developing stage, the advection of fresh cold air enhanced by radiation caused convection which penetrated as high as the middle tropospheric levels. This convection was probably responsible for the first cluster of c-g negative flashes. Then the mesoscale subsynoptic processes started to act. This interaction might include such effects as downdraft rain evaporation which - due to cooling - produced a convergence area, giving rise to the secondary generation of clouds around the primordial rain cloud. The subsequent spreading of flashes around the previous cluster confirms this supposition.

The essential role in the development of convective system was played by one of these secondary clouds built up in the cloud of elongated radar echo shape stretched along the lake shore. The appearance of this cloud was associated with a decay of the unusual cluster of intensive positive flashes. The episode of exclusively positive discharges over the whole large area seems to indicate the interference of mesoscale factors. They are probably responsible for later explosive initiation of lightning activity along the whole length of this cloud and the edge of the evolving main convective core of the cloud agglomeration characteristic for MCS. The spreading of the rain area without lightning downwind the deep convective core confirms the organization of the observed clouds in one inter-coupled unit.

The space-temporal distribution of c-g discharges shows that the deep convection was formed along a band between cloud  $c_1$  and the edge of the main cloud  $c_2$  or the long edge of the main ensemble of the cloud agglomerated in one unit. Temporal sequence of c-g discharges recorded in thunderstorm E indicated that lightning activity was stretched randomly almost at once along the whole length of cloud  $c_1$  and the counterpart edge.

The location of c-g flashes in the larger area stretched a-



long or near to a line directed to the southwest and placed at the edge of the upwind core of three thunderstorms, D, E and F, appears to be a characteristic feature in the formation of a squall line. The random temporal distribution of flashes appearing at once and acting along this whole line corroborates this similarity.

The mature stage of lightning activity was followed by a gradual subsidence of the highest cloud, accompanied by the enlargement of the cloud area without lightning. The activity of the mature stage was characterized by frequent negative discharges with low and not much differentiated signal amplitudes. The burst of flashes and their cease are distinctly marked in time. It might give a chance to forecast a new stage of MCS evolution, e.g., the period of intensive precipitation associated with decay of the stratiform part of the system. In this stage lightning flashes do not occur or appear very rarely. In our case only a few flashes did appear at the upwind edge of the enlarged stratiform cloud and the activity of the system entirely decayed. We were therefore unable to trace with the help of lightning the further development of the MCS element.

A new stage of evolution of lightning activity over the area under consideration embraced new regions (VI, VII, VIII), south-east of storms of the MCS element. New cumulonimbus clouds were still being formed there, but they neither merged with nor contributed to the MCS element. The evolution of the distribution of the next separate flashes shows, however, a tendency to form a similar element to that represented by thunderstorms D and E. But it was only possible to observe the stage of transition from individual convective shower cells with separate discharges into a more vigorous thunderclouds, manifesting themselves by lightning clusters. Two such clusters, G and H, were recorded by LLS. Further stage of organization was not attained in the presence of decaying MCS which was built up previously. This decaying stage of MCS was marked electrically only by a few negative flashes and the last positive one, which occurred a long time after the rapid termination of the frequent mature c-g flashing rate at the deep convection area of MCS.

After a total break in lightning activity, lasting for about twenty minutes, its new stage has reflected further evolution of convection in the regions south-east and north-west of the last cluster of previous activity. In this final stage, even the first phase of agglomeration of separate c-g flashes into more active discharges in a cluster was not noticed. However, the development of lightning activity indicating attributable convective clouds was not chaotic. The space distribution of flashes indicates that in this stage the orientation was transverse /to the previous one, i.e., instead of following the south-east direction the regions of flashes were developing southwesterly, in accord with the initial propagation. Remarkable is also the fact that in regions IX and XII the c-g discharges recorded from 15<sup>h</sup>30<sup>m</sup> LT to the end of activity were only positive. The activity was very weak, largely stretched in time and space.

Preliminary analysis of time variation of flashing rate has shown regular fluctuations. They were especially pronounced in the range of periods of about 30 minutes. This value may be correlated to the period of consecutive developments and decays of convective cells and perhaps to the periods of the fluctuations in the inflow of air into MCS (Dudhia et al., 1987).

Very high amplitudes of signal field strength of the first stroke of flashes were observed for separate flashes in small Cb clouds. The amplitudes were especially high for positive c-g discharges. It was found that positive flashes may quite often consist of two strokes in individual flash and be grouped in clusters. Flashes of only positive polarity may also be spread over large areas during a longer time.

Multiplicity of flashes recorded was large for the discharges in clusters, i.e., in major, vigorous thunderclouds or their systems. The amplitude of flashes in conjectured squall line was low but the flashing rate was very high as compared to the preceding and following stages of convective activity.

The average flashing rate of the located c-g discharges in

the observed MCS was about 1 flash per 50 seconds. Keeping in mind that the frequency of intracloud and cloud to cloud discharges in squall lines is usually many times larger than that of the c-g discharges, and taking into account the reliability of the LLS, we may say that the average flashing rate of all discharges was much greater than that indicated by LLS.

Making a separate analyses of ground, aerological, radar, satellite or lightning observations we cannot expect to achieve a satisfactory description and explanation of the development of spectacular phenomena involved in the evolution of the mesoscale convective system. A joint analysis of observations is needed in this respect. The case discussed here gives grounds for believing that the analysis of space-temporal distribution of lightning discharges provides some useful contribution to our understanding and diagnosis of the evolution of deep convection in MCS. It seems reasonable to expect that this contribution will be extended along with the improvement in lightning recording technique and in the knowledge on dependences between the initiation and electric properties of lightning on one hand and the cloud dynamics and microstructure on the other. Further studies with extended contribution of different electric measurements, like that attempted by Chauzy et al. (1984), may bring not only the information about MCS but also a better insight into such relations.

In order to describe unambiguously the dynamical mechanisms that control the evolution of meteorological phenomena that appear to organize and govern the convection, it is necessary to identify and elucidate the interaction between the macro-, meso- and cloud-scale phenomena observed. It would provide us with some means for anticipating the events that could potentially lead to transition between flow regimes in different stages of development and decay of the MCS. The Scandinavian atmospheric scenery offers good possibilities for studying such processes in various conditions which control the homeostatic, selfregulating structures of MCS. More cases like the present one, supplemented by greater meteorological material (with appropriate time and space resolution), are to be



analysed theoretically and numerically, before conclusive statements will be drawn. Theoretical and practical needs of such studies are obvious.

Acknowledgments. We would like to acknowledge the help and advices of Professor S. Lundquist, the project leader, and Professor E. Åström of the Institute of High Voltage Research in Uppsala. This study was made possible through the kindness and help of the staff of the above-mentioned Institute. We express thanks to Mr. L. Bergens and Dr. U. Christensen for providing us with valuable meteorological data. This work could not be done without encouragement and assistance of Professor R. Teisseyre.

Problem: RPBP 03.4 - Rp.6

Received: June 19, 1987

#### R e f e r e n c e s

- Beasley W., 1985, *Positive cloud to ground lightning observations*, J. Geophys. Res., **90**, D4, 6131-6138.
- Bergens L., 1982, private communication.
- Bluestein H., 1985, *Squall lines*; in "Dynamic of mesoscale weather system", ed. by J.B. Klemp, NCAR Summer Colloquium Lecture Notes, Boulder 1984.
- Bosart L.F., Sanders F., 1986, *Mesoscale structure in the megapolitan snowstorm of 11-12 February 1983. Part III: A large amplitude gravity wave*, J. Atmos. Sci., **43**, 9, 924-939.
- Brook M., Nakano M., Krehbiel P., Takeuti T., 1982, *The electrical structure of the Hokuriku winter thunderstorms*, J. Geophys. Res., **87**, C2, 1207-1215.
- Browning K.A., Hill F.F., 1984, *Structure and evolution of a mesoscale convective system near the British Isles*, Quart. J. R. Met. Soc., **110**, 897-913.



- Chauzy S., Chong M., Delaney A., Despian S., 1984, *The June 22 tropical squall - line observed during Copt 81 experiment: electrical signature associated with dynamical structure and precipitations*, VII Intern. Confer. Atmosph. Electricity, Preprints, Albany, N.Y., 235-239.
- Christensen U., Israelsson S., 1987, *Relationships between radar echo characteristics and lightning parameters for a thunderstorm in Sweden*, submitted to "Weather".
- Dudhia J., Moncrief M.W., So D.W.K., 1987, *The two-dimensional dynamics of West African squall lines*, Quart. J. Roy. Met. Soc., 113, 121-126.
- Enyatollah M.A., Michnowski S., 1983, *On the estimation of random error for the LLP system*, Publs. Inst. High Voltage Res., Uppsala Univ., UURIE, 146.
- Fuquy D.M., 1982, *Positive cloud to ground lightning in summer thunderstorms*, J. Geophys. Res., 87, C9, 7131-7140.
- Holle R.L., Lopez R.E., Hiscox W.I., 1983, *Relationships between lightning occurrence and radar echo characteristics in South Florida*, Proc. Intern. Aerospace and Ground Confer. on Lightning and Static Electricity, Fort Worth, June 21-23, 1983.
- Houze R., 1985, *Stratiform precipitation in mesoscale convective systems*; in "Dynamic of Mesoscale Weather Systems", ed. by J.B. Klemp, NCAR Summer Colloquium Lecture Notes, Boulder 1984.
- Ishi M., Junicki H., Kawamura T., 1984, *The polarity of ground flashes and possible charge structure in a thundercloud*, VII Intern. Confer. Atmosph. Electricity, Preprints, Albany, N.Y., 339-343.
- Israelsson A., Enyatollah M.A., Pislser E., Michnowski S., 1983, *On the occurrence of cloud to ground flashes in southern Sweden*, Publs. Inst. High Voltage Res., Uppsala Univ., UURIE, 148.
- Israelsson S., Pislser E., Schütte T., 1985, *The use of an automatic lightning location system in Sweden*, Publs. Inst. High Voltage Res., Uppsala Univ., UURIE, 170.

- Jacobson C., 1982, *Meteorological data compared with data from the lightning location system*, Workshop on Lightning Detection and Recording, Uppsala, August 22-26, 1982.
- Klemp J.B. (ed.), 1985, *Dynamics of mesoscale weather systems*, NCAR Summer Colloquium Lecture Notes, Boulder 1984.
- Krider E.P., 1982, *Locating lightning with wideband magnetic direction finders*, Workshop on Lightning Detection and Recordings, Uppsala, August 22-26, 1982.
- Krider E.P., Pifer A.E., Vance D.L., 1980, *Lightning direction-finding systems for forest fire detection*, Bull. Am. Meteor. Soc., 61, 980-986.
- Lopez R.E., Holle R.L., Hisox W.L., 1983, *Climatological characteristics of lightning over South Florida and their correlation with radar-activity*, Proc. Intern. Aerospace a. Ground Confer. on Lightning a. Static Electricity, Forth Worth, June 21-23, 1983.
- Lopez R.E., Holle R.L., 1986, *Diurnal and spatial variability of lightning activity in northeastern Colorado and central Florida during the summer*, Month. Weather Rev., 114, 1288-1312.
- Maier M.W., Krider P., 1982, *A comparative study of the cloud to ground lightning characteristics in Florida and Oklahoma thunderstorms*, paper presented at 12 Confer. on Severe Local Storms, Am. Meteor. Soc., San Antonio, Texas, Jan. 11-15, 1982.
- Mazur V., Rust W.D., 1983, *Lightning propagation and flash density in squall lines as determined with radar*, J. Geophys. Res., 88, C2, 1495-1502.
- Michnowski S., Parfiniewicz J., Israelsson S., Enyatollah M.A., Pislser E., 1984, *Distribution of cloud to ground lightning discharges and their polarity during thunderstorms observed in Sweden on May 18th, 1982*, Paper was presented at VII Intern. Confer. on Atmosph. Electricity at Albany, USA.
- Moncrieff M.W., Miller M.J., 1976, *The dynamics and simulations of tropical cumulonimbus and squall lines*, Quart. J. R. Met. Soc., 102, 373-394.

- Orville R.E., 1983, *An east coast lightning detection network*, Bull. Am. Meteor. Soc., 64, 9.
- Peckham D.W., Uman M.A., Wilcox G.E.(Jr.), 1984, *Lightning phenomenology in the Tampa Bay area*, J. Geophys. Res., 89, D7, 11789-11805.
- Pisler E., 1980, *Some analysis of "Error Triangles" when using three DF stations*, Publs. Inst. High Voltage Res., Uppsala Univ., UURIE, 128.
- Pisler E., Schütte T., 1985, *Eine neue Methode zur Messung des Peilfehlers bei Blitzpeilsystemen - Beschreibung und erste Ergebnisse*, Blitzschutz Conference, München.
- Schütte T., 1984, *An experimental study of the angle correction of the direction finders of the LLP system in Sweden*, Publs. Inst. High Voltage Res., Uppsala Univ., UURIE, 158.
- Schütte T., Cooray V., Israelsson S., 1986, *Recalculation of lightning location system acceptance using a refined damping model*, Subm. to J. Atm. Techn.
- Takeuti T., Israelsson S., Nakano M., Ishikawa H., Lundquist S., 1980, *On the occurrence of positive lightnings*, Proc. Res. Inst. Atmosph. Nagoya Univ., 27-A.
- Thorpe A.J., Miller M.J., Moncrieff M.W., 1982, *Two-dimensional convection in non-constant shear: a model of mid-latitude squall-lines*, Quart. J. R. Met. Soc., 108, 739-762.
- Zipser E., 1985, *Mesoscale structure of tropical convective storms*; in "Dynamic of mesoscale weather systems", ed. by J.B. Klemp, NCAR Summer Colloquium Lecture Notes, Boulder 1984.



ANALIZA MEZOSKALOWEGO UKŁADU BURZ  
NA PODSTAWIE ROZKŁADU WYŁADOWAŃ ATMOSFERYCZNYCH

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

Na podstawie rejestracji czasowo-przestrzennego rozkładu doziemnych wyładowań atmosferycznych oraz standardowych obserwacji meteorologicznych podjęto próbę opisu rozwoju układu burz, obserwowanych 18 maja 1982 r. nad południową Szwecją.

Analiza synoptyczna wykazała napływ, z południowego zachodu, ciepłego i wilgotnego powietrza nad obserwowany obszar w godzinach popołudniowych i równoczesne nadciąganie frontu chłodnego z północy. W zaistniałym stanie niestabilności powietrza pojawiły się atmosferyczne wyładowania doziemne. Zmiany ich czasowo-przestrzennego rozkładu uwiaryściły w dużej mierze ewolucję mezoskalowego systemu konwekcji (MSK).

W zmianach rozkładu wyładowań wyróżniono cztery stadia rozwoju aktywności elektrycznej: stadium początkowego pojawienia się wyładowań i wzrostu ich aktywności, stadium dojrzałej aktywności wyładowań, stadium rozproszenia wyładowań oraz stadium słabej, rozproszonej aktywności wyładowań, zaistniałej po dłuższej przerwie.

W stadium początkowym pojawiły się dwie krótkie serie bliskich w przestrzeni i w czasie wyładowań (clusters) oraz rozproszone wyładowania nad dość rozległym obszarem. Serie wystąpiły w dwóch chmurach, należących do szybko rozwijającej się grupy chmur konwekcyjnych, wyrosłych wokół zanikającej rozległej pierwotnej chmury deszczowej. Po krótkotrwałym okresie wyładowań i niewielkiej przerwie, aktywność obu chmur i aktywność rozproszona uległy drastycznej zmianie. Zamiast początkowych wyładowań ujemnych przez około 15 minut występowały nad całym obszarem, prawie wyłącznie, wyładowania znoszące do ziemi ładunek dodatni.



Jednej z wymienionych chmur konwekcyjnych przypisać można, bardzo rzadko spotykana i nie opisywana w literaturze, serie wyładowań dodatnich. Chmura ta uległa znacznemu wydłużeniu wzdłuż południowo-wschodniego brzegu jeziora Sommen. W jej stronę nadchodziła, leżąca obok, druga elektrycznie aktywna chmura, która stała się ośrodkiem agregacji całej wspomnianej grupy chmur konwekcyjnych w jeden system. Procesy te były poprzedzone prawie wyłącznie wyładowaniami dodatnimi.

Po zaniku wyładowań dodatnich i około-20 minutowej przerwie raptownie pojawiły się, ze stosunkowo dużą częstością, wyładowania ujemne. Cechowały je niewielkie i mało zróżnicowane wartości amplitudy sygnału skoku natężenia pola wyładowań, rejestrowanych przez stacje systemu lokalizacji. Charakterystyczne było również ich czasowo-przestrzenne rozmieszczenie. Wyładowania te wystąpiły omal równocześnie, w sposób nieuporządkowany, wzdłuż całej rozciągłości echa radarowego wydłużonej chmury oraz w stosunkowo wąskim pasmie, biegnącym wzdłuż pld.-wsch. brzegu organizującej się w pewną całość grupy chmur konwekcyjnych. Obserwacja ta nie jest zgodna z podanym przez Montrieffa i Millera sposobem inicjacji dojrzałego stadium MSK i sugeruje inny jej mechanizm. Częste ujemne wyładowania doziemne zaczęły być raptownie i również prawie jednocześnie przestały. Zanik wyładowań, wskazujący na wygaszanie komór głębokiej konwekcji zamyka charakterystyczny okres dojrzałości śledzonego systemu. W dalszym stadium ewolucji MSK pozostała tylko czynna jego strefa deszczowa chmur typu warstwowego. Strefa ta, bez współdziałania głębokiej konwekcji, ulegała powolnemu zanikowi.

Stadium dyssypacji systemu towarzyszyły wyładowania rozproszone na pld.-wsch. od obszaru uprzednio aktywnego. Wyładowania te nie łączyły się z zanikającym układem MSK, ani nie tworzyły nowego systemu. Ujawniły się jedynie pośrednie etapy rozwoju bardziej aktywnych chmur, zaznaczających się oddzielnymi gromadami wyładowań.

Po dłuższej przerwie nastąpił ostatni okres aktywności, w formie rozproszonych wyładowań. W końcowej jego fazie pojawiła się

W obserwowanej ewolucji aktywności wyładowań przejawiała się pewna cykliczność zmian ich częstości, z mocno zaakcentowanym okresem nieco powyżej 30 minut.

Amplitudy skoków natężenia pola pojedynczo rozproszonych wyładowań były znacznie większe niż amplitudy skoków pochodzących od wyładowań w gromadach (clusters). Potwierdzenie znalazł również fakt występowania największych amplitud przy wyładowaniach dodatnich.

Wyładowania piorunowe należące do gromad wykazywały w obserwowanym przypadku zróżnicowaną wielokrotność wyładowań składowych, podczas gdy w pojedynczych oddzielnych wyładowaniach obserwowano zazwyczaj jedno uderzenie składowe. Wbrew dotychczasowym poglądom wyładowania dodatnie wykazywały większą procentową ilość wyładowań dwukrotnych niż wyładowania ujemne.

Rozkład czasowo-przestrzenny wyładowań doziemnych wnosi cenne dane dotyczące nie tylko charakterystyk aktywności wyładowań dla potrzeb ochrony odgromowej, lecz również dane dotyczące występowania, intensywności i ruchu konwekcyjnych chmur burzowych. Pozwala to w pewnym stopniu na śledzenie rozwoju skomplikowanych mezoskalowych struktur konwekcji ostatnio intensywnie badanych. W celu analizy i przewidywań ich rozwoju, same dane wyładowań, jak i inne oddzielniebrane rodzaje obserwacji, są niewystarczające. Konieczne są działania kompleksowe i odpowiednie analizy systemowe.

Przy dalszym doskonaleniu metod lokalizacji i rejestracji cech wyładowań można się spodziewać iż wkład ten będzie wzrastał. W miarę postępu znajomości inicjacji i właściwości wyładowań w zależności od dynamiki i mikrostruktury chmur burzowych, można oczekiwać lepszego wykorzystywania dodatkowych informacji wnoszonych przez wyładowania, np. przez polarność, wielokrotność, czas trwania, częstość, amplitudę i kształt sygnałów elektromagnetycznych emitowanych przez wyładowanie.

## **On Simultaneous Observations of Geomagnetic and Atmospheric-Electric Field Changes at Arctic Station, Hornsund, Spitsbergen**

Stanisław MICHNOWSKI, Antoni SZYMAŃSKI  
Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences  
ul. Księcia Janusza 64, 01-452 Warszawa, Poland

N.N. NIKIFOROVA, O.V. KOZYREVA, D. ERMOLENKO  
Institute of Earth Physics, USSR Academy of Sciences  
B. Gruzinskaya 10, 123810 Moscow, USSR

Kajetan ZIELKOWSKI  
Space Research Centre, Polish Academy of Sciences  
ul. Bartycka 18a, 00-716 Warszawa, Poland

### **Abstract**

Simultaneous measurements of geomagnetic and atmospheric electric field at the ground with supplementary meteorological and ionospheric observations have been systematically carried on since 1986 at the Polish Polar Station Hornsund ( $\varphi = 77^{\circ}00'N$ ,  $\lambda = 15^{\circ}33'E$ ) in Spitsbergen. Some examples of variations of measured parameters associated with large impulsive magnetic disturbances in the time of high magnetic activity are shown for intervals of "fair weather" conditions. Spectral analysis of selected 20 hours set of data from March 1, 1989 was made in frequency range 0.01 - 6 mHz. The spectra obtained for magnetic and electric field show distinct similarity and the maxima of their density occur in the same range of frequencies (0.15 mHz - 0.5 mHz). Filtered data for this frequency range show variations of low frequency components with very high correlation coefficient of 0.91.



Very good correlation between geomagnetic and atmospheric-electric field was obtained, especially in the case of single intensive substorm examined in six hour long fair weather period of March 2, 1989. The observed behaviour of the observed geomagnetic and atmospheric electric fields points to common magnetospheric origin of these fields in such events. Further observations of such relations at the various magnetospheric states and different position relative to the polar electrojet are to be carried out in coordinated, complex way.

## 1. INTRODUCTION

Atmospheric electric field variations at the Earth's surface have been for a long time studied in the scope limited to the lower atmosphere processes. The electric data from the lower atmosphere have been of little use in the research of the behaviour of the upper atmosphere. On the contrary, the variable part of geomagnetic field has been easily applied as a good indicator of the ionospheric and magnetospheric current systems affected by solar activity. The large difficulties in finding clear, direct relations between the simultaneous changes in both fields have been associated with the opinion that the observed diversities are a result of screening of the lower atmosphere by electrically highly conductive lower ionosphere. Studies of variations of geomagnetic and electric fields at the Earth's surface have usually been carried on separately.

Nonetheless, in the high latitude zone, where solar, magneto- and ionospheric effects are manifested by magnetic fields especially distinctly, evident disturbances of electric field have been observed in the periods associated with strong magnetic and aurora activity (Israel, 1973; Freier, 1961; Olson, 1971; Lobodin and Paramonov, 1972). These effects were possible to be noticed during fair-weather conditions, when local meteorological disturbances of the electric field are low. In such conditions at impulsive magnetic disturbances a decrease of electric field in the range from six to several percent was most often reported. On the other hand, opposite behaviour has been observed as well. Shaw and Hunsucker (1977) analysed yearly records of the electric field at College, Alaska ( $65^{\circ}\text{N}$ ) and did not find such effects at all, even when there was a violent aurora activity. However, further evidences of the response of electric field on the magnetospheric events have been reported from observations in high latitude surface stations (Tanaka et al., 1977).

Considerable progress in studies of these effects has been brought by simultaneous measurements of atmospheric electric and geomagnetic field together with other geo-



physical parameters in the network of polar stations in the USSR. Electric field recordings were extended there on contemporaneous long series of measurements on the level above the planetary boundary layer carried on by means of floating balloons (Apsen et al., 1988). Some morphological features of recorded magnetic and electric field disturbances concerning different geophysical conditions have been distinguished and compared. The results enabled to ascribe the differences in electric field variation to the global state of the magnetosphere and especially to the position of the measuring site in relation to polar electrojet formed during substorms.

It appears of interest to observe the reactions of the atmospheric-electric field at the Earth's surface on the solar, magnetospheric and ionospheric events especially in the polar cap region. There, in the time of intensive magnetic disturbances it is possible to expect more distinct and strong response than in other places, often above the background of the electric field fluctuations of tropospheric origin. The digital recording and the processing of the data permit now for more detailed comparisons of different features of atmospheric-electric and geomagnetic fields.

The purpose of this report is to show first comparisons with some examples of recordings of examined variables under the above conditions. Such a possibility is offered by station Hornsund (Spitsbergen) which is now the only place located in the north polar region in which atmospheric electricity measurements are systematically carried on for longer time.

## 2. MEASUREMENTS AND DATA ACQUISITION

The Spitsbergen island, due to its very good location in respect to the aurora oval, cusp and polar cap is a very interesting place of observation of solar, magnetospheric and ionospheric influences on atmospheric-electric parameters in the lower atmosphere. Geographical and magnetic latitude and longitude of the Polish Polar Station Hornsund operating there are:  $\varphi = 77.00^{\circ}\text{N}$  and  $73.4^{\circ}\text{N}$ ;  $\lambda = 15^{\circ}33'\text{E}$  and  $128.2^{\circ}\text{E}$  (Fig. 1). This station is almost always placed within polar cup when  $K_p$  index is larger than 4. Since 1986, a continuous recording of three component of geomagnetic field is accompanied by electric field recording at the ground surface by means of radioactive collector and field mill, all with the same sampling rate of 10 or 30 s. Besides these parameters, there are also measured ionospheric absorption by means of riometer (30 MHz), time of precipitation, wind direction and velocity, temperature and other meteorological variables. Recently, additional recordings of air-earth current density by horizontal wire

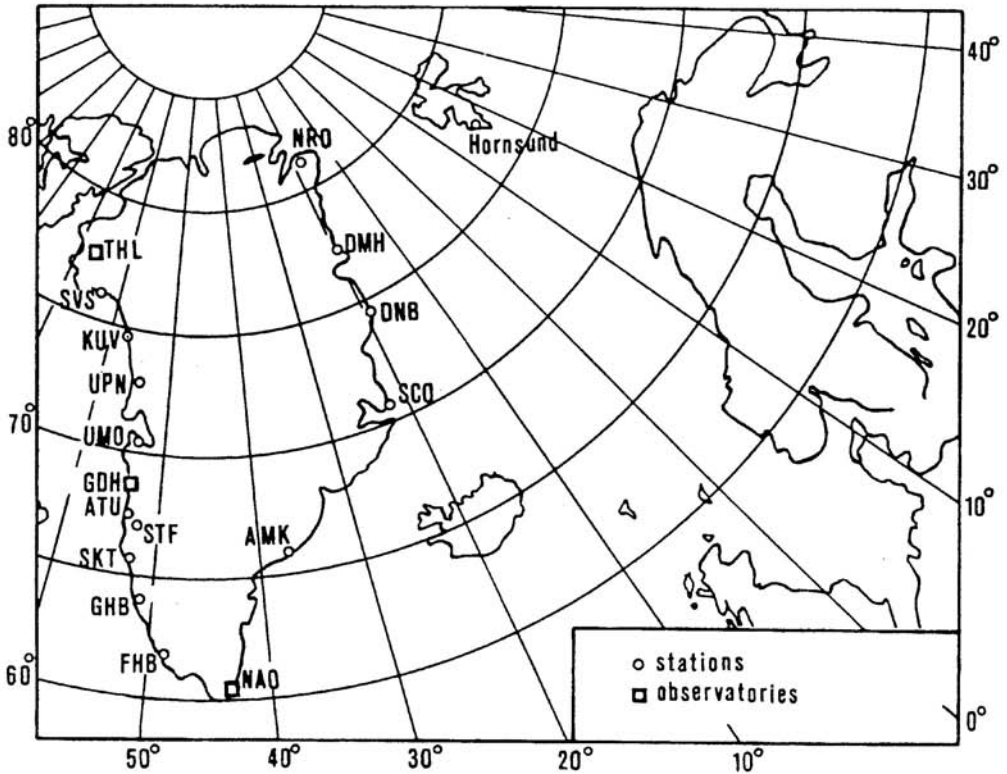


Fig. 1. Location of Polish Polar Station, Hornsund and of network of Greenlands stations.

antenna and aurora observations by means of all sky camera and scanning photometer have been introduced.

The data in digital form are gathered by magnetic loggers, replayed on diskettes and processed by an IBM AT computer.

The results examined now are taken for the periods of fair-weather conditions determined by the generally accepted international instruction, which rejects the time of local meteorological disturbances introduced by precipitation, fog, blizzards, wind stronger than 6 m/s and low cloudiness above the station.

The spectral analysis has been performed by Fourier Transform method. The coefficients of Fourier series were calculated using method of Filon. The spectrum was smoothed by using moving means of 5 points. For signal filtration filter of Butterworth was applied.



### 3. RESULTS OF MEASUREMENTS AND PRELIMINARY DISCUSSION

The results of recordings presented now were taken for the time of high magnetic activity of March 1989. The fair-weather conditions at Hornsund happened to occur only in some periods of this very active month. The records presented in Fig. 2 concern such periods from 21<sup>h</sup>35<sup>m</sup>30<sup>s</sup> of last day (28) of February to 17<sup>h</sup>35<sup>m</sup>30<sup>s</sup> of March 1, 1989. For this time, simultaneous variations of horizontal component H of geomagnetic field, variations of electric field measured by means of field-mill and radioactive collector, and of ionospheric absorption (R) were analyzed.

A very similar shape of variation of the electric field measured by two independent instruments is to be noticed. The calculated correlation coefficient between these two recordings is 0.82. The indications of the field-mill are more exact, with error of less than five percent. The radioactive collector has distinct additional errors influenced by local meteorological conditions. In spite of that, the collector is used supplementary because its service is more convenient in continuous work, especially in polar conditions. The values of electric field data from both instruments are given here without correction to the flat terrain by reduction factor.

The subsequent Fig. 3 illustrates Fourier power spectra in the frequency interval from 0.05 to 6 mHz for the variations of component H and the electric fields in the period specified before. The spectra are similar but show some differences in the range of higher frequencies. It is possible to state that all spectra have their maximum densities in the same range of frequency, from 0.15 to 0.5 mHz, which corresponds to periods of 6600 to 2000 s. For this interval, filtration was performed. The obtained curves are shown in Fig. 4. The correlation coefficient between the filtered courses of electric field is 0.99. The calculated correlation coefficient between the filtered signal of geomagnetic component H and of filtered electric field measured by two methods is 0.91, i.e., almost the same for both. In these first rough comparisons we did not try to find the best correlation between shifted courses of component H and of electric field which should be done in order to search for the phase shift between the examined variables.

Figure 5 shows a further fragment of simultaneous recordings at Hornsund of the corresponding variables in the 8-hour long period of fair-weather conditions from 23<sup>h</sup>00<sup>m</sup> to 07<sup>h</sup>00<sup>m</sup> UT of March 1-2, 1989. The character of changes of the three geomagnetic components shown in Fig. 6 shows that we have to deal with a magnetic substorm. This is seen also from the simultaneous recordings of the geomagnetic field in the nets of magnetic stations in Greenland, as shown in Fig. 7. From this figure we can notice that in the zone between  $\varphi' = 71^{\circ}$  and  $73^{\circ}$ N in magnetic latitude, in which also Hornsund is

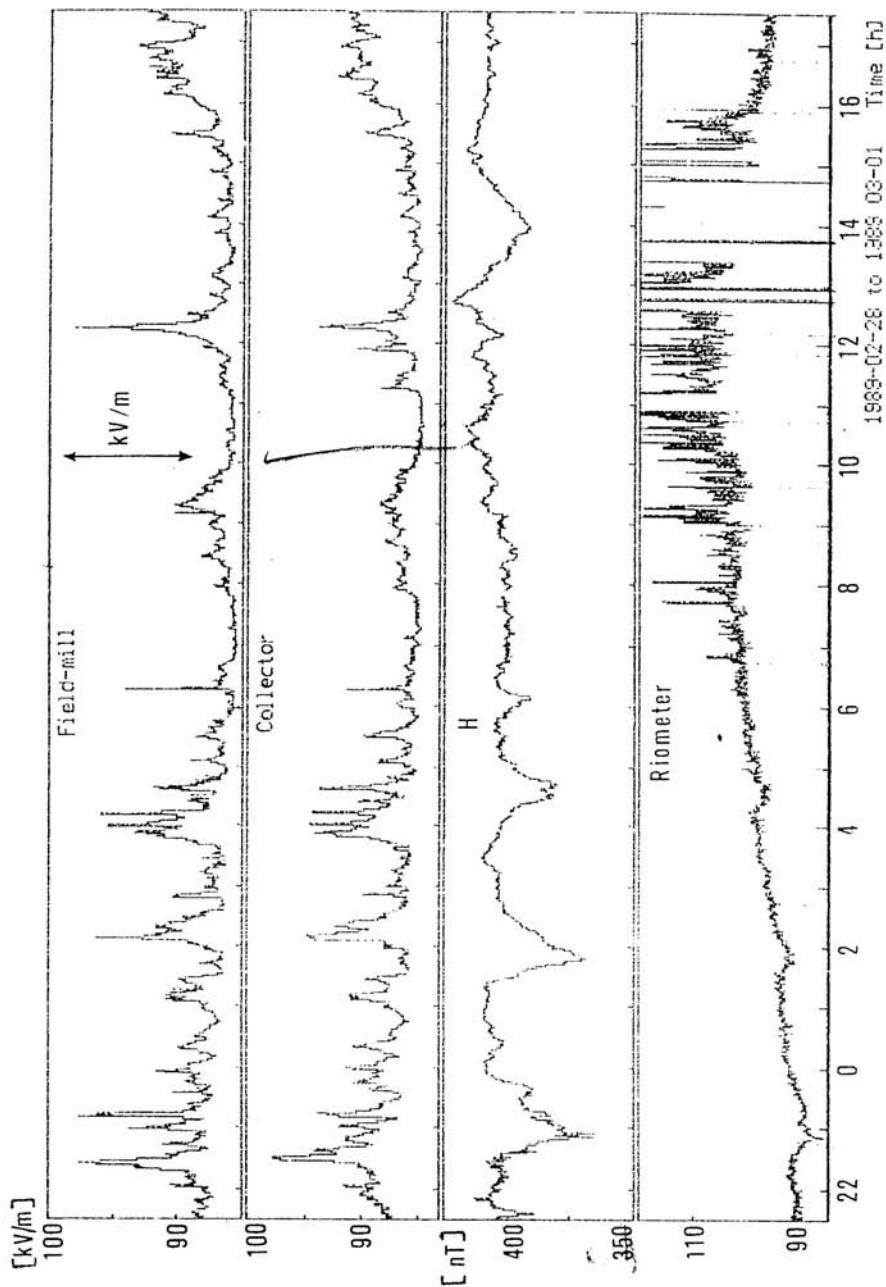


Fig. 2. A fragment of simultaneous recordings of: horizontal component (H) of geomagnetic field, ionospheric absorption (R), ground electric field measured by means of radioactive collector (CO) and field-mill (ML) at station Hornsund during fair-weather conditions from 21:35:30 UT of February 28 to 17:35:30 UT of March 1, 1989.



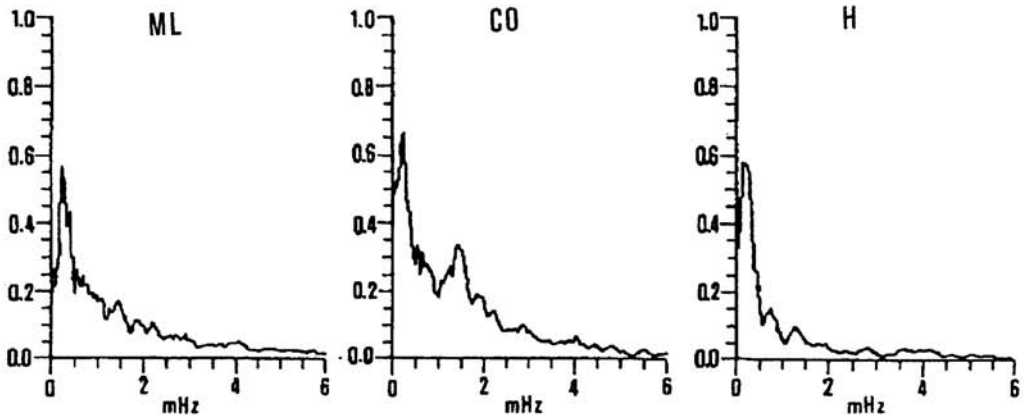


Fig. 3. Power spectra of changes of component H, and the electric field measured by collector (CO) and field mill (ML) at station Hornsund during fair-weather conditions from 21:35:30 UT of February 28 to 17:35:30 UT of March 1, 1989.

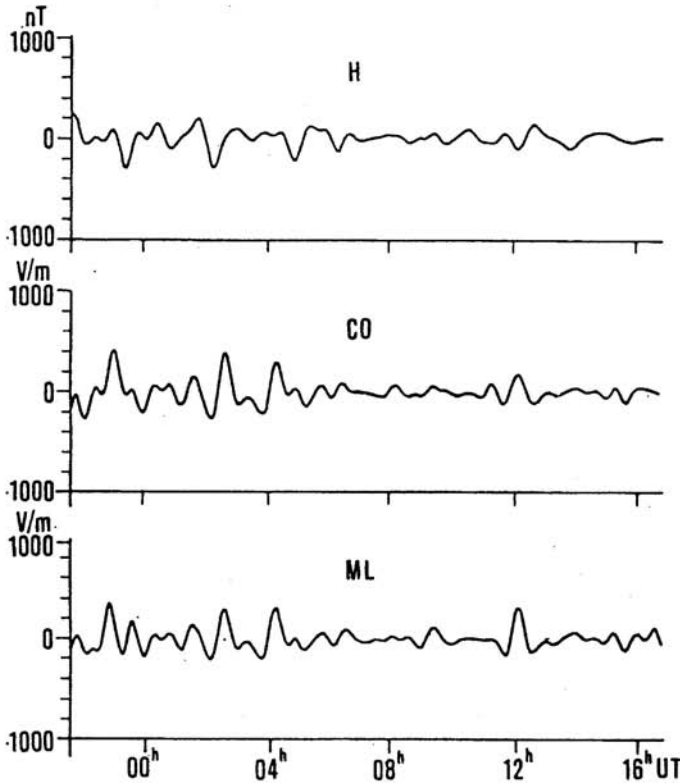


Fig. 4. The variations of component H and electric field signals (CO and ML) after filtering for 0.15-0.5 mHz of the recording fragment from Fig. 2.

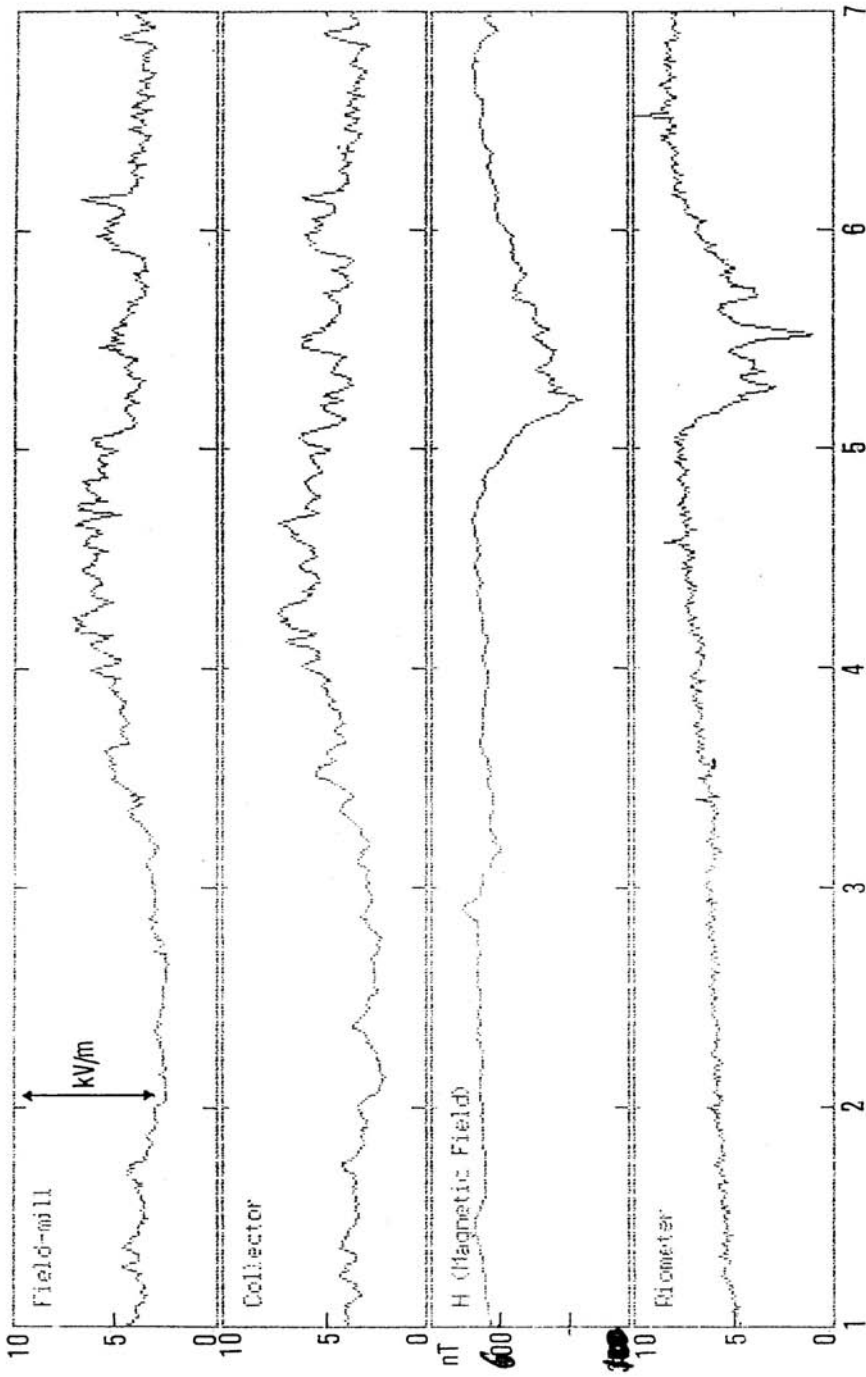


Fig. 5. A fragment of simultaneous recording of component H, ground electric fields measured by field-mill and radioactive collector together with recordings of ionospheric absorption (riometer) of station Hornsund during fair-weather conditions since 01:06:00 to 07:05:30 UT of March 2, 1989.

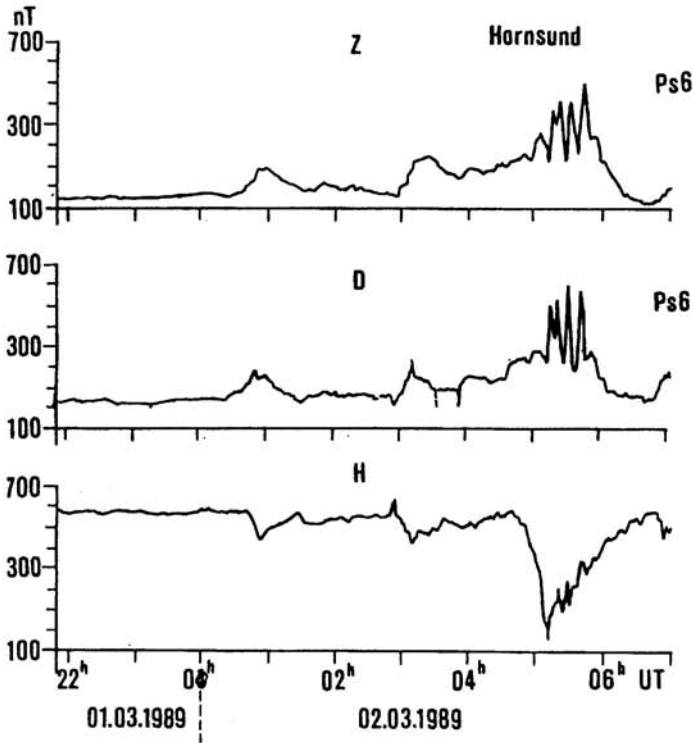


Fig. 6. Simultaneous recordings of three geomagnetic components H, Z, D in Hornsund at the time corresponding to the recording fragment in Fig. 4.

situated, a polar electrojet appeared at this time. The presence of substorm in examined period is suggested also by the changes of ionospheric absorption (Fig. 5).

The power spectrum of the recordings of Fig. 5 is presented in subsequent Fig. 8. The obtained pattern concerns isolated substorm. The following features can be notice. The largest spectra densities correspond to the lowest frequency band. In this band there occur peaks common for all three variables in the range of frequency of 0.01-0.05 mHz and 0.025-0.075 mHz. The third peak is clearly seen on component H being less distinct on the electric field spectra. The range of higher frequencies in the obtained spectra is of special interest. There might be present pulsation Ps6 (Rajaram et al., 1986) seen in the behaviour of geomagnetic components Z and D shown in Fig. 6. This range of frequencies will be a subject of further study (Kleimenova et al., 1991).

The rate of sampling used does not allow to examine the magnetic pulsation of shorter periods and to check whether their correlations with corresponding atmospheric-electric field fluctuations appear in Hornsund. Such a correlation (Nikiforova and Michnowski, 1977) is observed in the middle latitudes extremely rarely. It might be

MAR 2 1989

GREENLAND MAGNETOMETER CHAIN

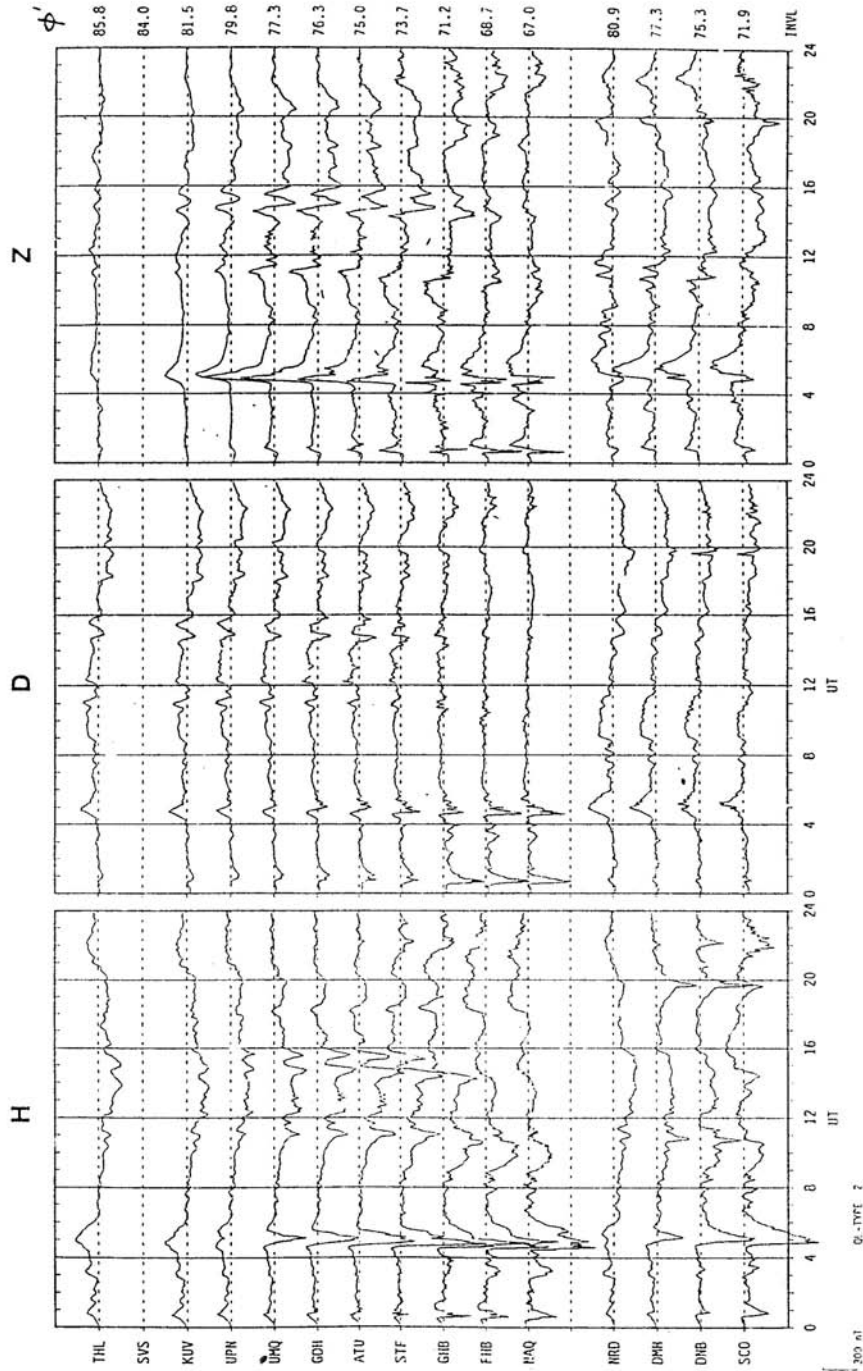


Fig. 7. An example of synchronous recordings of component H in Greenland chains of the surface stations on February 2, 1989. The upper curves correspond to the west coast, lower to the east coast of the island. The mark on the right correspond to the geographical position of anticipated polar electrojet.



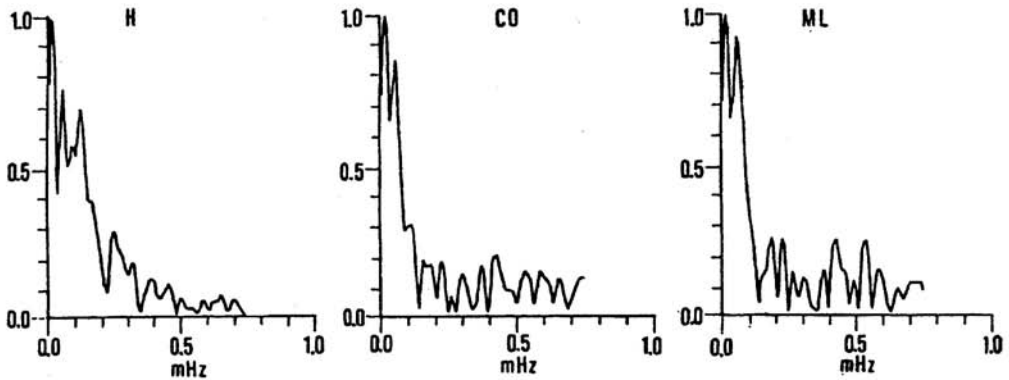


Fig. 8. Power spectra of simultaneous recordings of component H, and electric field measured at Hornsund by a field mill (ML), and collector (CO), from 21:20:00 UT through 06:59:30 UT during fair-weather conditions on February 2, 1989.

noticed that in this range of frequencies we can meet larger disturbances of electric field due to turbulent fluctuation of space charge movements in the planetary boundary layer. To diminish these effects a sharper criteria of fair-weather conditions should be applied. Such disturbances might be very low in quiet conditions associated e.g. with anticyclonic inversions.

The presented example of recordings correspond to a series of strong magnetic disturbances and to a case of intensive, isolated magnetic substorm. The magnitudes of changes in component H are several hundreds of nT. The changes in atmospheric-electric field appear in these cases to be distinctly above the usual level in the quiet conditions.

The example from Fig. 5 shows very pronounced increase of electric field appearing long before the expansive phase of the substorm. This enhancement is followed by the change to a decreasing tendency of the electric field during the expansion and recovery phase. However, it is necessary to be cautious in drawing conclusions about the character of electric field changes associated with the appearance and development of impulsive magnetic disturbances. In Hornsund a diversity in the character of these changes, and also of magnetic ones, was observed. The differences concern the direction of changes, i.e., a positive increase or a negative decrease of the electric field, and the shift of their phase in relation to the geomagnetic variation. The characteristic behaviour from Fig. 5, relatively often observed in Hornsund, corresponds to the cases reported in morning hours at the polar side of westward polar electrojet (Bandilet et al., 1986).

The presented fragments of recordings in polar cap region ( $K_p > 4$ ) of atmospheric electric and geomagnetic fields seem to indicate a regularity of their behaviour in analogical geophysical situations. A similarity of spectral density distribution in the long periods range of their frequencies points to the common magnetospheric origin of the examined magnetic and electric fields. A variety of the observed patterns of regular response of electric field to various magnetic impulsive disturbances associated with them suggests a need to correlate the data in one station to general geophysical situation in terms of magnetospheric convection and field aligned currents.

Coordinated electric field observations in the network of high latitude and polar cap stations seem to offer some additional opportunities for studies of temporal and spatial variations of the processes involved in such very complex global phenomenon as a magnetic substorm. The supplementary observations of electric field at the Earth's surface on a long term basis may be especially important in studies of rapid succession of monitored events.

#### 4. CONCLUDING REMARKS

Geomagnetic and atmospheric electric field variations measured under the fair weather conditions at the Earth's surface in the polar cap region exhibited some characteristic features. During very high magnetic activity in March 1989 recordings made in Hornsund show similar spectral density distribution for both fields in the range of low frequencies with maxima in the same interval of frequencies (0.15-0.5 mHz) and very high correlation coefficient (0.91) of filtered data for this frequency range. Analogical similarity in patterns of spectra density distribution were observed for geomagnetic and atmospheric-electric field variations in the case of a single intensive substorm in morning hours of March 2, 1989. Such a behaviour of the observed simultaneous variations of the two fields points to a possibility of application of electric field observed at the Earth's surface in studies of magnetospheric electric fields associated with magnetic substorms.

Further coordinated data on the observed features in various global magnetospheric configuration are needed. The recordings of electric field at the ground in polar cap region correlated with geomagnetic field and other geophysical variables are able to offer supplementary informations which might be especially important in studies of rapid succession of monitored events.

## References

- Apsen A.B., Kanonidi Ch.D., Chernysheva S.P., Chataev D.N., and Sheftel' V.M., 1988, *Magnitosferynye Effekty v Atmosfernom Elektrichestve*, Nauka, Moskva, 149 pp.
- Bandilet O.J., Kanonidi Ch.D., Chernysheva S.P., and Sheftel' V.M., 1986, *Effekty magnitosferynykh subburi v atmosfernom elektricheskom pole*, *Geomagnetizm i Aeronomiya*, **26**, 232-236.
- Freier G.D., 1961, *Auroral effects on the Earth's electric field*, *J. Geophys. Res.*, **66**, 2695-2702.
- Israel H.W., 1973, *Atmospheric Electricity*, Isral Program for Scientific Translations, Jerusalem (transl. from German).
- Kelly M.C., 1989, *The Earth's Ionosphere, Plasma Physics and Electrodynamics*, Academic Press, New York.
- Kleimenova H.G., Kozyreva O.V., Michnowski S., Szymański A., and Ermolenko D., 1991, *Spektral'no-vremennyye kharakteristiki vysokoshirotnykh dlinoperiodnykh pul'satsii ( = 6-30 min) v geomagnitnom pole i atmosfernom elektrichestve ( $E_z$ ) po dannym nablyudenii na arch. Spitsbergen*, submitted to *Geomagnetizm i Aeronomiya*.
- Lobodin T.V., and Paramonov N.A., 1972, *Variation of atmospheric-electric field during aurorae*, *Pure. Appl. Geophys.*, **100**, 167-173.
- Nikiforova N., and Michnowski S., 1977, *Some geomagnetic and atmospheric electric field variations observed at Świder and Belsk observatories*, in: "Electrical Processes in Atmospheres", H. Dolezalek and R. Reiter (eds.), D. Steinkopff Verlag, Darmstadt, 728-735.
- Olson D.E., 1971, *The evidence for auroral effects on atmospheric electricity*, *Pure Appl. Geophys.*, **84**, 1, 118-138.
- Rajaram G., Rostocker G., and Samson J.C., 1986, *Wave characteristics of  $Ps_6$  magnetic variations and their implications for convective flow in the magnetotail*, *Planet. Space Sci.*, **34**, 3, 319-329.
- Shaw G.F., and Hunsucker N.D., 1977, *A study of possible correlation between fair-weather electric field and auroral activity*, in: "Electrical Processes in Atmospheres", H. Dolezalek and R. Reiter (eds.), D. Steinkopff Verlag, Darmstadt, 576-581.
- Tanaka Y., Ogawa T., and Kodama M., 1977, *Stratospheric electric fields and currents measured at Syowa Station, Antarctica. 1. The vertical component*, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **39**, 523-529.



## **Concluding Remarks on the Mađralin Workshop**

Stanisław MICHNOWSKI

Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences  
Księcia Janusza 64, 01-452 Warszawa, Poland

Approaching the end of the Workshop we are closing the initial, designing phase of international program on the Global Atmospheric Electricity Measurements (GAEM). Now it seems necessary to pause a little and reflect on the formulated resolutions as a whole. Being aware of the present state of atmospheric electricity researches we face a challenge of getting involved in multidisciplinary worldwide broad programs: the International Geosphere-Biosphere Program (IGBP), Solar-Terrestrial Energy Program (STEP), World Climate Research Program and others. During discussions we have had some dispersed views and a variety of examples how atmospheric electricity processes in the lower atmosphere can depend on different factors acting jointly at different scales. The papers of different level presented on the first day of our meeting do not cover the whole spectrum of relevant problems. However, it becomes obvious that multidisciplinary investigations in the global scale can offer a great opportunity to study more efficiently not only the common integrative objects of the discussed "mega projects", but also unsolved problems of particular disciplines and own atmospheric electricity puzzles.

It is now necessary to give an account to what extent the main aims, tasks and projects of international cooperation proposed in our resolutions are able to respond to the present general and our particular needs. The answer is too difficult to be given now. I will try to share only some personal impressions concerning the GAEM program we are going to start.

1. The program of global atmospheric electricity measurements, according to its name, might embrace a variety of measurements made on different levels of the lower atmosphere, or concentrate the attention on measurements of global atmospheric



electric parameters like global lightning activity, difference of potentials between the Earth's surface and the ionosphere, or global resistance of the atmosphere. For many reasons, the program was restricted to the measurements at the Earth's surface of fundamental variables of the global electric circuit. The continuation of the previous detailed observations amenable from the ground and an extension of former surface measurements was recommended. Thus, the program of global measurements was tacitly directed mainly to studies of spatial-temporal distribution of vertical electric field, Maxwell current and conductivities of both polarities at the Earth's surface. It was anticipated that measuring data from suitable global network and local networks of surface atmospheric-electric stations should allow us to study the response of the global circuit to natural and anthropogenic disturbances which are expected to be the subject of interest of IGBP and STEP.

The variables in question are in fact sensitive to various phenomena affecting the global circuit in very large range of scales in both space and time. A broad complexity of multiple relations and complex feedbacks involved in electric fields and electric currents variations observed at the Earth's surface was one of the reasons why the progress in understanding of the main global problem of atmospheric electricity has been relatively slow. The first two large projects in global scale to examine this problem, undertaken by the International Geophysical Year and Ten Years Program, did not bring the expected results, despite large sets of data gathered. It is worthwhile to look on our plans in the light of the previous experience. Now, as it was mentioned in the welcome addresses and introductory papers, we have much better situation in many respects.

The problem is better defined in terms of global electric circuit. We are nearer to attain the ability of testing the suggestive views of C.T.R. Wilson that the fair-weather electric field and air-earth current in the lower atmosphere are produced mainly by global thunderstorm activity, which has not been done through many decades. The time is coming when the global thunderstorm activity can be monitored by observation of global lightning frequency by means of satellites, large sets of lightning location systems or by application of Schuman resonance studies. New technologies have extended the range of measurements of electric fields and currents.

The large general progress achieved in updating the measurement and information systems might be adopted in all aspects of our measurement process, from initial data acquisition to the final analysis product. It can embrace the data transmission, processing, analysis, data dissemination, and access by users. Besides, quantitative modelling and computer simulation of problems to be studied may make it easier now to integrate data sets and guide the research efforts.

2. In spite of this, some serious fundamental obstacles still persist. One of the most serious is the great difficulty in separating particular global effects from the variation of measured parameters subject to the integrated influence of various factors acting simultaneously. It is extremely difficult to separate different causes and their effects. The usual selection of data and the filtering of local meteorological influences by means of fair-weather criteria, commonly applied until now, does not eliminate sufficiently the local disturbances, as, for instance, local electric noises produced in the planetary boundary layer. They are still very far from being satisfactorily avoided or determined by additional measurements. The level of noise disturbances is often larger than global signals to be identified. On the other hand, the identification of local and global effects simultaneously incorporated in the results of surface observations, is a "sine qua non" condition for successful contribution of GAEM in the IGBP and STEP. The success depends on the improvement of knowledge on relevant processes affecting the obtained data from which changes in global electric circuit are to be separated.

The shortage of time prevents us from considering in greater detail to what extent the use of such methods as, e.g., a correlation analysis of measurements at widely separated stations or averaging of instantaneous measurements over large horizontal areas, are sufficient to distinguish properly between the local and global effects and between temporal and spatial variations. Some statistical and theoretical approaches, and especially the more rigorous fair-weather criteria, are able to improve the present status. The studies of these problems have to be intensified. In the meantime, until the expected progress in this direction is made it seems necessary to initiate simultaneous recording of electric variables above the planetary boundary layer. This is to be done by coordinated flights of floating balloons or by means of improved tethered balloon measurements at selected representative stations.

3. To properly use the GAEM data, it is often indispensable to incorporate some complementary information. Even with information coming from related programs, it is not always possible to draw conclusions without additional simultaneous measurements, closer coordination with other programs and some initiatives in individual, suitably selected subprograms. The activity of individual researchers or their local teams are to be especially inspired and supported. In further prospects, the GAEM program might be then conceived as an important element in integrated overall strategy of atmospheric-electric research to address the coordinated studies of particular effects on the global electric circuit behaviour.



Different kinds of such effects are worth now to be briefly recalled, keeping in mind the present pragmatic importance of their studies. Although the time domain of less than one revolution of the Sun has to focus our efforts, it is justified to pay also attention to effects of broader time range. Longer term effects are worth quite often to be treated jointly, taking advantage of data gathered systematically besides the selected GAEM observing periods.

Most common influences on the global circuit are due to meteorological processes acting in the tropospheric parts of the circuit. In this area, the GAEM program is especially interested in fluctuations incorporated into the measured values by global and regional thunderstorm activity. Identification and studies of these effects on the background of electric global activity of planetary boundary layer claim for additional measurements of Schuman resonance, difference of potential between the Earth's surface and the ionosphere, global and regional lightning activity. If close relations of these variables with simultaneous changes in GAEM data are distinctly established, the latter - after filtering from local and other global effects - might be a convenient indicator as one of the measurable global parameters of the total atmospheric system.

Convincing evidences have for a long time been reported that electric variables in the lower atmosphere are under the influence of extratropospheric and extraterrestrial forces caused mainly by solar activity changes. Manifested by a high-speed solar wind and topology of interplanetary and geomagnetic fields, etc., those changes produce a splendid game of processes over polar caps which play a key role in coupling of energy from the solar wind with the Earth's magnetosphere, ionosphere and thermosphere. Surface electric variables may respond to magnetospheric and ionospheric electric field convection patterns across the polar cap. Taking into account the physical link between the impulsive magnetospheric disturbances and surface electric variables, efforts have to be devoted to examine the qualitative correlations between these variables and other data related to magnetospheric and ionospheric convection. The GAEM data over the polar cap can bring quantitative supplementary information on the interactions of polar wind with the Earth's plasma environment. They can be particularly useful during relatively rapid succession of the observed events, e.g., in studies of magnetic substorms and other impulsive disturbances of geomagnetic field. Besides, they can be applied to the observations of possible pulsations resulting from penetration of hydrodynamic oscillations from the magnetosphere through the ionosphere and the lower atmosphere to the Earth's surface. The GAEM measurements appear to be very useful as supplementary and complementary to balloon, satellite, rocket or even radar programs. In studies of solar and upper atmosphere effects on the electric variables at the ground, the

temporal and spatial scales are to be taken even in highly non-linear systems. Unified models begin to be introduced. The future of this area of multidisciplinary research of the extraterrestrial and upper atmosphere influences seems to be bright.

An example of such an approach was given here by Professor E. A. Bering III, whose program was recommended by the GAEM. The results of ground and balloon measurements of electric variables undertaken in the Antarctica are to be used in several ways. It will be very desirable to organize similar balloon experiments in the Arctica according to the suggestion of Professor R. Holzworth, using the experience of previous campaigns. In the north polar region, there might be active a greater number of stations with ground facilities like EISCAT, radars, geomagnetic and aurora observations. The proposed simple atmospheric electricity observations incorporated to the working or planned polar stations have there a chance to bring important supplementary informations. There it could be also much easier to carry on small individual or joint programs with balloons, aircraft and in further, not very distant prospects, rocket and satellite remote measurements concerning electrical effects of the processes in question.

On the other hand, we cannot disregard the studies of observed effects of lithospheric origin (earthquakes, volcanos) on atmospheric electric variables.

It is necessary to emphasize that besides the generating processes, the GAEM data can be intrinsically affected by space-temporal changes in conductivity and other electric properties of the atmospheric medium. Electric conductivity, reacting to changes of cosmic ray intensity and solar activity (effects of solar flares, etc.) also below the ionosphere, exerts some influence on fields and currents at the ground. However, at the ground there occur very distinct changes of conductivity and related electric field and current variations caused by changes in concentration of radioactive debris and atmospheric aerosol of natural (e.g., produced by volcanoes) and anthropogenic origin. Although effects of ionisation by radioactive elements and aerosol attachment of light ions act in opposite direction, the variation of conductivity at one station may be used as an indicator of large local changes of one of these variables if other one is known or quasiconstant. The GAEM monitoring of global circuit may offer an insight into the columnar resistance of the lower atmosphere and consequently into the total burden of contaminants in a regional and global scale. This is possible if the determination of potential difference between the Earth's surface and the ionosphere is known. The establishment of comprehensive observing program of systematic changes in conductivity in representative localities at the ground and in vertical profile is worth to be reconsidered and refocused from the points of view of the IGBP requirements.



4. The scenario of all phenomena to be studied by application of GAEM in the global circuit problems expands. We have here an important example of a need for integrated treatment of electric phenomena observed in various domains like solar wind, magnetosphere, iono/thermosphere, middle atmosphere, troposphere, lithosphere. Because of discontinuities of properties of these media and different sources of energy released there, these domains have for a long time been treated separately. Electric fields and currents encompassing the Earth transcend the barriers between these spheres and are involved in various couplings and interactions, with a possible feedback character.

Of great importance is here the coordination of GAEM with other suitable programs organized by related disciplines, according to the strategy used by the IGBP and STEP. The time comes to replace our previously uncoordinated and fragmentary activity by multidisciplinary systematic and comprehensive studies of global atmospheric electricity problems. The proper theoretical approach, modeling and computer simulations are to be introduced gradually. This requires close coordination of observational programs, data analysis, interpretative efforts of individuals and their groups, workshops, work centers etc. This all calls for a more intensive collaboration of participants from many countries. Besides the efforts of individuals, the actual scientific research - in the framework of GAEM - should be organized into a limited number of special, well-defined cooperative scientific tasks. Detailed proposal for these specific tasks, supported by results of pilot research, may take advantage of projects for which financial support has been in principle committed. Preparation of review papers with theoretical and experimental analysis of the problems to be examined are here of some additional value.

News letters, exchange of experience by means of bilateral visits or small working meetings, promotion of working groups or centers for processing the common results are to be intensified. The development and unification of measuring methods, measuring instruments and recording systems is to be accelerated by exchange of experience, e.g., by lending instruments, preparing detailed descriptions, etc. It is needed to promote new solutions, e.g., how to diminish the errors in land stations produced by electrode effect. The exchange of experience concerns also the description, standardization and processing of the GAEM data. Then the application of modern communication systems, which are emerging now, may provide, somewhat later, a useful alert and time data service. This all can open new prospects for our research. At the beginning, in the first preliminary stage, we should list and connect the existing stations in global and regional networks, e.g., meridional, polar, tropical. The following activities and studies may run on different scales: individual and joint projects. We have now a chance to approach the extremely large complexity of global circuit current system not as fundamental obstacles in the

development of atmospheric electricity research, characteristic in previous studies, but as a rich source of integrative information on different effects involved in electric variables observed at the ground.

5. The success of our program depends to an extremely large extent on the human aspects of cooperation. Our work is mostly based on voluntary contributions. We have to make cooperation attractive and effective. Easily accessible data exchange is important but not sufficient for motivation. It is very important to be able to offer all participants, including those with only very modest resources, the possibility of making significant contribution. We should recommend such topics which can reveal the scientific and pragmatic value of the cooperation, show its need and possible advances in common studies. This concerns those participants who are willing to start or to extend the atmospheric electricity measurements. Also for many of those who are presently carrying on systematic fair-weather electricity measurements on the existing stations an assistance to incorporate them in coordinated projects is needed. A special care should be given to the continuation of the work at stations with long series of observations. We have to improve the style of work not only by new technology but also by intensive assisting each other on all levels of cooperation.

6. The present Workshop is only a small step towards the goals and tasks standing before the GAEM program. We believe that this program, in cooperation with broader projects introduced by STEP and IGBP, will bring important contribution in understanding, monitoring and predicting of interactive complexes of electric processes acting in the scale of our planet and its near space environment. It gives a broader insight into natural environment in the scale of globe and assists in revealing the dangers introduced by insufficiently controlled anthropogenic effects. This contribution largely depends on the extent to which we will be able to realize the needs standing before us. Our ability is still not large but we have grounds for believing that it will increase gradually. Before us and the new generation of geophysicists there appears a fascinating vision of interactions of various processes acting in natural close and distant environment. In this homeostatic system, electric processes are intrinsically involved. Complex analyses especially of non-linear systems show that it is evidently not legitimate to neglect inputs or coupling mechanisms simply because they seem to be "small", "weak" or "slow". We cannot be free from the duties of participating in common efforts demanded in the situation of the menace of inadvertent disturbances of this system by natural and artificial forces.

It was really a pleasure for me to spend this week in a friendly atmosphere created by you all. It is extremely important to keep this atmosphere and to develop deeper motivation in our further work. I wish you all the best results in our common efforts. Thank you for coming and for all contributions. The Mađralin Workshop is closed.



THE FIELD-DEPENDENT CURRENTS DERIVED FROM THE ELECTRIC FIELD VARIATION  
FOLLOWING LIGHTNING DISCHARGES OBSERVED AT THE EARTH SURFACE

Piotr BARAŃSKI, Stanisław MICHNOWSKI

Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences  
01-452 Warsaw, ul. Księcia Janusza 64

A b s t r a c t

The field-dependent current density, FDCD, is estimated according to Krider and Musser's approach on the basis of the variation of the electric field,  $E$ , measured at the ground after lightning discharges. The relation between the FDCD and  $E$  so derived is examined for two groups of discharges. The best-fitting approximation functions, their peculiarities and coefficients are discussed. When the corona current dominates in the FDCD, the transient space charge density at the field jump is estimated at  $-6 \text{ nC/m}^3$  and, on the other hand, the quasi-steady space charge density for the field,  $E$ , approaching sometime later the quasi-steady value  $E_s$ , is evaluated at  $+4 \text{ nC/m}^3$ . In the last case, the FDCD is equal to the Maxwell current density of  $-8.5 \text{ nA/m}^2$ . Characteristic features of the relation of FDCD and  $E$  for individual discharges are noticed and discussed. A possibility of estimation of convective current density from the field recovery variations is suggested. As a result, a characteristic velocity of the order of  $0.45 \text{ m/s}$  is obtained for convection air motions accompanying the observed thunderstorm.

Full text in the Supplement





"Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences: Geophysical Data Bases, Processing and Instrumentation" appears in the following series:

A – Physics of the Earth's Interior

B – Seismology

C – Geomagnetism

D – Physics of the Atmosphere

E – Hydrology (formerly Water Resources)

P – Polar Research

M – Miscellanea

Every volume has two numbers: the first one is the consecutive number of the journal and the second one (in brackets) is the current number in the series.



Stanisław Michnowski, our senior colleague and mentor, celebrates in November 2018 the grand jubilee of one Hundred Years of Age. He is a man of very broad interests: a renown geophysicist, and a person strongly engaged in social, philosophical and religious aspects of life.

He is an acknowledged authority on theoretical and practical problems of atmospheric electricity, including lightning discharges, global circuit, electric structure of thunderclouds, instrumentation, lightning protection as well as effects of indoor ionization on human health, and is one of the pioneers of research on solar wind–magnetosphere–lower atmosphere interaction effects on atmospheric electricity, to briefly mention the just the main topics on which he has noted achievements. Some of his influential early papers are republished in the present book.

Stanisław Michnowski has been active in scientific communities, both in our country and internationally. This was acknowledged by electing him, in November 2014, the Honorary Member of the IUGG/IAMAS International Commission on Atmospheric Electricity (ICAE), after four decades of serving as a member in the Commission. He is also a Honorary Member of the Polish Committee on Lightning Protection and a Honorary Member of Polish Geophysical Society.

**PUBLICATIONS  
OF THE INSTITUTE OF GEOPHYSICS  
POLISH ACADEMY OF SCIENCES**

**Geophysical Data Bases, Processing and Instrumentation**

**424 (D-74)**

**Atmospheric Electricity:  
Commemorative Publication in Honor of Stanisław Michnowski  
on His 100-th Birthday**

**SUPPLEMENT**

**(in electronic version only)**



Stanisław MICHNOWSKI  
Institute of Geophysics  
of the Polish Academy of Sciences

## ELECTRIC FIELD VARIATIONS FOLLOWING LIGHTNING DISCHARGES MEASURED IN WARSAW AND ŚWIDER

### Abstract

A survey of electric field variations following lightning discharges observed in Warsaw and Świder is given and some influences on their forms are discussed. Local influences due to space charge produced by point discharges and splashing of the raindrops were noticed as distinct in the region with high electric field intensities or with presence of rain.

Generally, the observed changes of character of recovery curves in relation to distance are similar to those obtained theoretically by Tamura and based on his model. This seems to confirm the conception of the transient character of recovery variations from electrostatic to current flow field distribution of thundercloud after lightning. The recovery times  $T'$  for conditions undisturbed by local influences are however shorter than in Tamura's calculations and do not correspond to the empirical relations reported by Smith. Considerable differences in the recovery time  $T'$  were distinguished for intracloud and cloud-earth discharges for observed heat thunderstorms. The average  $T'$  for cloud discharges was about 1.75 times shorter than the average  $T'$  for ground discharges occurring at the same distance from the flash (between 15–25 km). Some peculiar shapes of recovery curves are presented.

The recovery curves seem to be dependent on the stage of development of the thundercloud-cells and the variable character of the cloud from one storm to another. The field variations after lightning, by which the recharging processes and electrical structure of the cloud may be manifested, need more attention and further study. Some preliminary remarks and suggestions are given.

### 1. INTRODUCTION

Electric field variations following lightning discharges many times recorded during thunderstorms are an interesting phenomenon very little known until now. Measurements have shown that after sudden changes accompanying the lightning flash the electric field returns almost to its pre-discharge value along a recovery curve of different type. The simplest type of field recovery approximates the exponential character usually observed following distant flashes. The corresponding time constant for these flashes was estimated as averaging about 7 sec.

Since the interpretation given by C. T. R. Wilson [34], on the ground of introduced by him electrostatic bipolar thunder-cloud model, it has been widely accepted



[20] that the observed recovery curves for distant flashes represents the regeneration of the electric moment in the cloud after lightning. T. K. Wormell [35] confirmed and extended this interpretation of recovery forms by taking in account the additional influence of the space charge distributed in the air beneath the thundercloud.

Some regularities in the shape of recovery curves related to distance were subsequently recognised by Y. Tamura. Tamura [29] gave a theoretical explanation of them based on the current flow theory. He used a simple bipolar model of the electric structure of the thundercloud cell and the additional assumption introduced by Holzer [11] that air conductivity increases with height. According to Tamura's theoretical analysis, the differences in the recovery form for near and distant discharges are caused by a transient phenomenon, in which the electric field pattern changes from the electrostatic distribution to that given by the theory of current flow [15].

The divergent opinions regarding proper interpretation of recovery curves and the thundercloud electric models used are still the object of lively discussions. The differences concern problems of basic significance, e.g. estimation of rate of change regeneration after lightning [23], the conductivity in the thundercloud [7] and other properties of thundercloud used in its electric models. At the present stage of inadequate knowledge in this field, the need of further experimental tests seems evident. The understanding of different forms of recovery is necessary not only from the point of view of basic questions which concern the thundercloud electrical structure, but also in respect to other factors, e.g. electrical conditions in the surface layers of air beneath the thundercloud.

Single records of field made in one place only do not yield sufficient data to elucidate the recovery variations, because many processes and influences of different kind are acting simultaneously in the observed phenomenon. One of the difficulties encountered here is the variety of influences of local conditions, prevailing at the place of observation, on the field measured at ground level. In order to distinguish those secondary influences from the cloud and other factors, a simple experimental approach was used in Świder, involving measurements of the electrical field near the ground and of the point discharge current at 23 meters height above ground.

The prime object of this communication is a preliminary survey and short discussion of the observed recovery curves under some of their various aspects.

## 2. APPARATUS AND METHODS OF MEASUREMENT

In the summer and autumn of 1962 and 1963 measurements of electrical field and additional electrical and meteorological elements were carried out during thunderstorms and showers over Świder and Warsaw.

The electric field variation was measured by the dynamic method. The field mill<sup>1</sup> used has response time 0.1 sec. Its hilt was mounted on a pole at a height of 2.5

<sup>1</sup> Elektrostatische Feldstärken Messgerät Typ FM300 Nr. 1 nach Prof. H. F. Schwankhagen, Bergischer Feingerätbau C<sub>1</sub>. m.b.H., Wuppertal.



metres, the measuring plate and rotating screens facing downwards as shown in Fig. 1. The measurements were recorded on a four-channel recorder<sup>2</sup> with paper speed of 0.2 mm/sec, 1 mm/sec and 5 mm/sec. The first intense sounds of thunder (as distinct from the initial rumblings) were recorded by the observer. Owing to the

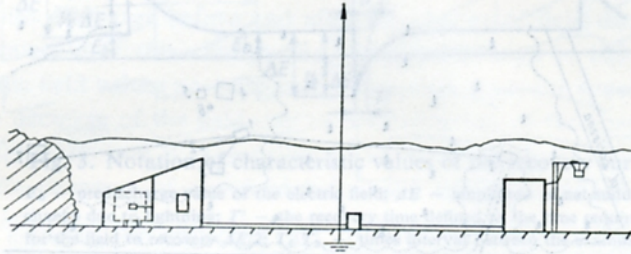


Fig. 1. Vertical section through a part of the Geophysical Observatory in Świder

use of U. V. special recording paper he was able to mark on the watched recording curve the time interval between the instant of visible appearance of the lightning flash accompanied by a sudden jump of the field, and the instant thunder was heard. In a number of cases a microphone and acoustical amplifier was used for automatic recording of the first occurrence of thunder.

The point discharge current was measured by means of the arrangement [22] with a needle mounted on a mast at a height of 23 metres. The response time of the arrangement with the galvanometer used was approximately 1 sec.

Space charge was measured by Thomson's method with an earthed copper-mesh cage  $110 \times 110 \times 110$  cm with a small radioactive collector, placed in the centre of the cage at a level of 1.5 m above the ground level, adjacent to, and under the roof of, a wooden hut. The collector potential was measured with a dynamic electrometer. The time constant of the apparatus, imposed by the collector used, was about 1 min [9].

The potential gradient was at Świder station measured additionally with the collector method [31]. The minute signals of recording time were given to the main 4 channel recorder as time base. The time constant of the radioactive collector was approximately 1 min, wherefore these measurements as well as the space charge measurements were suitable only for slow variations.

Wind velocity and direction were measured with a Fuess anemograph at a height of 23 metres. Precipitation and meteorological elements (temperature, humidity, pressure) were recorded at the small meteorological station of Świder Observatory.

An attempt was made at Świder to obtain preliminary information on local electric conditions prevailing in the atmospheric immediately above the ground, and on their influence on the electric field variations. For this reason a special layout of measuring apparatus was used for simultaneous measurement at different levels

<sup>2</sup> Lichtpunktschreiber, Hartman Braun, Typ RLt 1.



of point discharge current, wind velocity and direction, electric field, space charge precipitation and other meteorological elements.

Fig. 1 and Fig. 2 show the location of the measuring apparatus on the area of the Observatory. Part of the field mill and of the point discharge arrangement with the main recorder were placed in a small iron hut in the vicinity of the mast. The



Fig. 2. Location of the apparatus at the Geophysical Observatory at Świder

1 - main measurement hut, 2 - mast with needle, 3 - hut with Thomson apparatus, 4 - meteorological garden, 5 - meteorological cage, 6 - pluviograph, 7 - anemograph, 8 - hut with potential gradient station

wooden hut with the space charge arrangement and the meteorological station was positioned a short distance away. The anemograph was about 80 m, and the potential gradient station about 100 m, from the mast.

The same electric field-mill and a similar point-discharge current arrangement only were used in Warsaw in the tower of the Sport-Stadium „Budowlani”. The field mill was located on a floor of the tower at 24 m height above ground level with outside clearance between mill and tower wall of 1.2 m. The needle of the point-discharge arrangement was installed at the top of the tower mast at about 36 metres above ground.

Measurements of the electric field and other elements were carried out in Świder and Warsaw during eleven thunderstorms and several showers.

At Świder, a number of elements were recorded simultaneously with the field intensity on the same recording paper. In most cases these were the point discharge current and sometimes space charge and wind velocity.

The observations made in Warsaw comprised mostly electric field measurements and only in one thunderstorm were electric field and point discharge current measured simultaneously. The facilities for visual observation of lightning flashes and clouds were much better there than at Świder.

### 3. EXPERIMENTAL RESULTS AND THEIR TENTATIVE INTERPRETATION

Due to the response time of the fieldmill used, the fast changes during lightning discharges could not be distinguished. It was possible to get the net amplitude of total field change which accompany the lightning discharges, and some times, particularly at higher tap speeds, to read a rough indication of field changes caused by



separate strokes or complex discharges. The measurement yields the values of the vertical field over level ground and delineates reliably the form of the variation of field which follows a discharge. A correction for the distortion due to the local

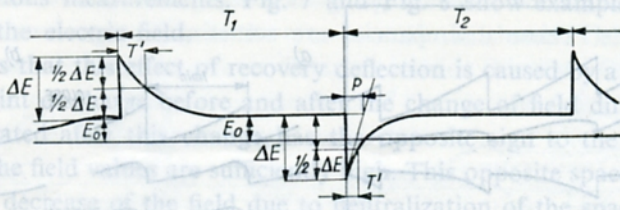


Fig. 3. Notation of characteristic values of the recovery curve

$E_0$  — pre-discharge value of the electric field;  $\Delta E$  — amplitude of net sudden change due to lightning;  $T'$  — the recovery time defined as the time required for the field to recover  $\Delta E/2$ ;  $T_1$   $T_2$  — times interval between the examined flash and the preceding and following one, respectively;  $p$  — time recovery according to the rate of recovery in its first stage

configuration of the measuring apparatus and the area of the observatory was made in Świder.

In the observed recovery curves the following elements were taken in consideration, most of which had been previously used also by others:

$E_0$  — pre-discharge value of the electric field,

$\Delta E$  — net amplitude of sudden changes due to lightning,

$T'$  — recovery time, defined as the time of recovery to half-value of amplitude  $\Delta E$ ,

$p$  — time of recovery according to the rate of recovery in the first stage,

$T_1, T_2$  — time intervals between the flash under examination and the preceding and following one respectively,

$D$  — distance of the lightning estimated on ground of the time interval between the flash (jump of field) and thunder.

Fig. 3 illustrates these characteristic values.

About 400 recovery curves were examined out of nearly a thousand recorded cases. Unfortunately, distance  $D$  was not always recorded.

The shape of the recovery curve and its above characteristic data showed considerable variance, both in Świder and Warsaw. The differences between the observed forms of recovery and those calculated on ground of the selected models are often very distinct and therefore require consideration. Most interesting seemed to be the comparison of the curves obtained by measurements with those calculated on ground of current flow models. The theoretical forms of recovery curves calculated

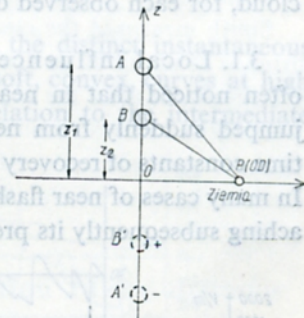


Fig. 4. Simplified Tamura model of thundercloud electrical structure

$Q_A = 80$  C;  $Q_B = -120$  C;  $z_1 = 7$  km;  $z_2 = 5$  km; constant recharging current  $J_0 = 1.81$  A;  $\sigma = \sigma_0 e^{-2kz}$  where:  $\sigma_1 = 1.8 \times 10^{-3}$  csu — conductivity at the level  $z_1$ ;  $\sigma_2 = 1.2 \times 10^{-3}$  csu — conductivity at the level  $z_2$ ;  $\sigma_0 = 4 \times 10^{-4}$  csu conductivity at the level  $z = 0$ .



for intra-cloud discharges by Tamura on base of his model (Fig. 4) are shown in Fig. 5, while recovery curves obtained in a similar way by Smith for intra-cloud and ground discharges are in Fig. 6.

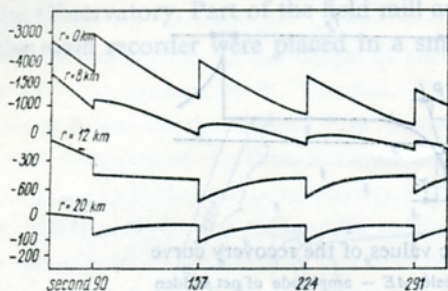


Fig. 5. Electric field variations for different distances of intracloud discharges calculated by Tamura for model in Fig. 6

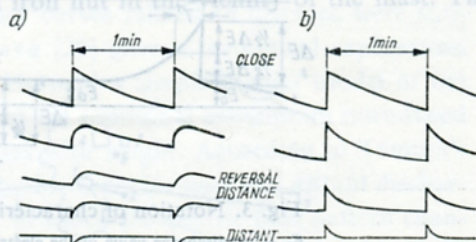


Fig. 6. Electric field variation at various distances for: a — intra-cloud and b — cloud-ground discharges, calculated after Tamura by Smith

Another approach is to relate the observed differences in recovery forms and their characteristic values to different local conditions and kinds of corresponding cloud, for each observed discharge.

3.1. Local influences. In agreement with Wormell's observations it was quite often noticed that in near discharges (distance less than 4 km) the electric field jumped suddenly from negative pre-discharge values to large positive values. The time constants of recovery for these flashes were longer than those for distant flashes. In many cases of near flashes the recovery curves fell in the beginning rapidly, approaching subsequently its pre-discharge value at a slow rate.

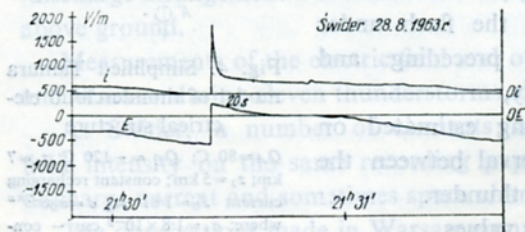


Fig. 7. An example of recovery field variations during a near thunderstorm on the 28<sup>th</sup> August 1963 at Świdler

$E$  — electric field;  $i$  — point discharge current

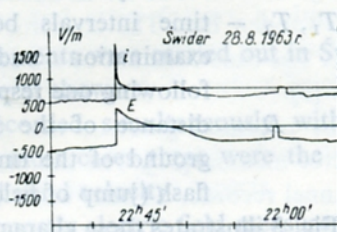


Fig. 8. An example of recovery field variation during the thunderstorm of 28<sup>th</sup> August 1963 over Świdler

$E$  — electric field;  $i$  — point discharge current

Quite often, particularly at Świdler, some new forms of this known pattern of recovery curves were observed. In one of them positive values return fast at first but slow down on approaching zero value. In the range of negative values however



the sequence is reversed, the variations being slow at first and quickening gradually before return to the predischARGE values. These deflections of the field curve were seen more distinctly at higher recording speeds (1 mm/sec, 5 mm/sec) than those used in previous measurements. Fig. 7 and Fig. 8 show examples of this kind of recovery of the electric field.

It appears that this effect of recovery deflection is caused by a space charge produced by point discharge before and after the change of field direction. The space charge generated after this change has the opposite sign to the charge generated before it, if the field values are sufficiently high. This opposite space charge produces considerable decrease of the field due to neutralization of the space charge existing before the lightning, and is responsible to some extent for the field variation after discharge. On decrease of the field below the critical value, at which the point discharge ceases, this neutralizing — recovery accelerating — influence ceases too, causing deflection of the curve. In the negative region this sequence and the signs are inverse. The records of simultaneous changes of point discharge current are in agreement with the foregoing supposition.

This kind of recovery variation was not discussed by previous authors and does not correspond to any of the theoretical recovery curves of Tamura and Smith who have not considered space charge below the cloud in their electrical models of thundercloud.

In some cases (Fig. 9) recovery curves do not show the distinct instantaneous return immediately after the end of the flash but have soft, convex, curves at high amplitudes of sudden changes. This may have some relation to the intermediate

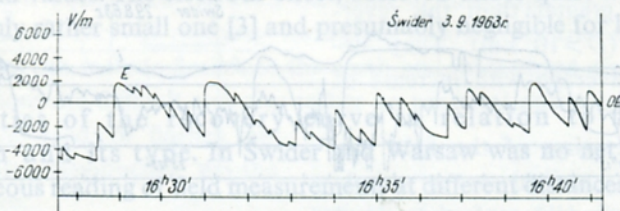


Fig. 9. Recovery field variation at thunderstorm during 3<sup>th</sup> September 1963 in Świder

distances between the place of observation and the flash shown on Tamura's diagram (Fig. 3), or may result also from the local space charge for distances nearer than the reversal point. This assumption seems especially appropriate for lightnings to the ground.

Another kind of influence of the space charges on recovery variations is shown by their irregularities and fluctuations, occurring often at high electric field values.

At the level of the needle, the electric field can be represented approximately by the point discharge current flowing through it, if wind velocity is known. Those three values are interrelated [4]. Comparison between electric field variations measured with the fieldmill at the 2,5 m level and those indicated by the point discharge



current at height of 23 m has shown substantial differences, both in magnitude and phase.

Fig. 10 and Fig. 11 illustrate these differences without even taking into consideration the effect of wind in determining the corresponding field intensity at the level of the needle. Those discrepancies are sometimes so pronounced that the

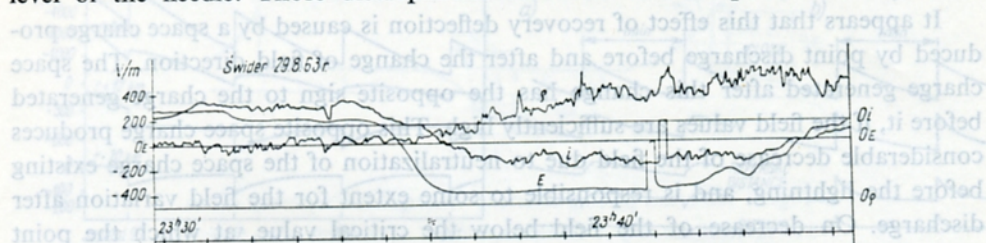


Fig. 10. Electric field —  $E$ ; point discharge current —  $i$ ; space charge density —  $\rho$ ; variations during the storm of 29<sup>th</sup> August 1963 over Świder

direction of the electric field and the point discharge current are opposite, as shown in Fig. 11 for the time interval from 23<sup>h</sup>.21<sup>m</sup> to 23<sup>h</sup>.23<sup>m</sup>. According to C. W. Lutz and others [22], this kind of differences indicates that there is a local space charge between the two levels, caused most probably by point discharges.

Smith measured the electric field variations at two places located at a horizontal distance of about 50 m [26] and observed the differences in the recovery of the field at both places after the same lightning. The differences were seen in the fluctuations

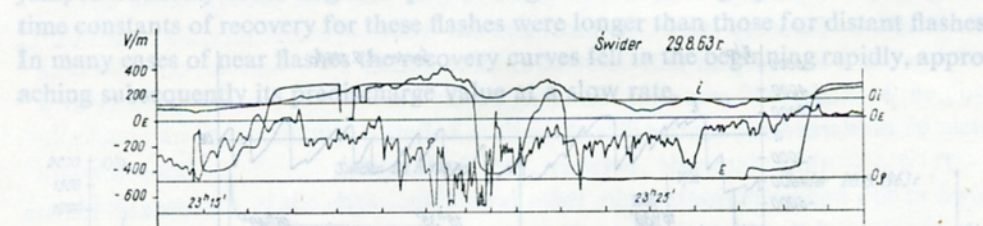


Fig. 11. An example of electric field —  $E$ ; point discharge current —  $i$ ; space charges density —  $\rho$  — variations during the storm of 29<sup>th</sup> August 1963 over Świder

and irregularities of recovery curves. Smith assumed that they resulted from turbulent convection of a local space charge produced by point discharges and carried down below the level of its origin. This suggestion seems to be verified by the variations of point discharge current and electric field at two levels at Świder.

Very considerable local modifications of recovery field curves were recorded both at Świder and Florida [26] during precipitation, especially in heavy showers. Fig. 12 and Fig. 13 show examples of recovery variations in such conditions. The recovery times ( $T'$ ) obtained at Świder were very short, e.g. 4 sec during a heavy shower, while for the same distance the time  $T'$  was under dry conditions on an average about four times greater.



It is worth noting that the shape of the first stage of recovery curve during heavy showers is almost a straight line. Splashing of rain drops on the ground is probably responsible for this phenomenon [36].

Local disturbances caused by point discharge or by splashing of the rain drops on the ground occur most often in the area beneath the clouds. There may act also other local influences, even at greater distances outside this area. One of them may be the electrode effect, giving some increase of the electric field near the earth's surface. Due to the long response time and errors in space-charge measurements

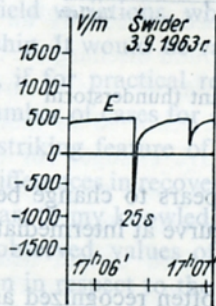


Fig. 12. An example of the recovery field variation during heavy rain on the 3<sup>rd</sup> September 1963 flash approximately 8 km distant

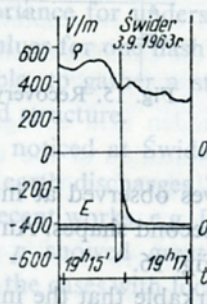


Fig. 13. Recovery field variation during the heavy rain in 3<sup>rd</sup> September 1963 in Świder

the existence of this effect was only roughly indicated at Świder in some cases for great enough field values. The electrode effect, observed under quiet windfree conditions, is commonly rather small one [3] and presumably negligible for large distances to thunderclouds.

3.2. Properties of the recovery curve in relation to the distance from the flash and its type. In Świder and Warsaw was no net of stations to enable simultaneous reading of field measurements at different distances from a given

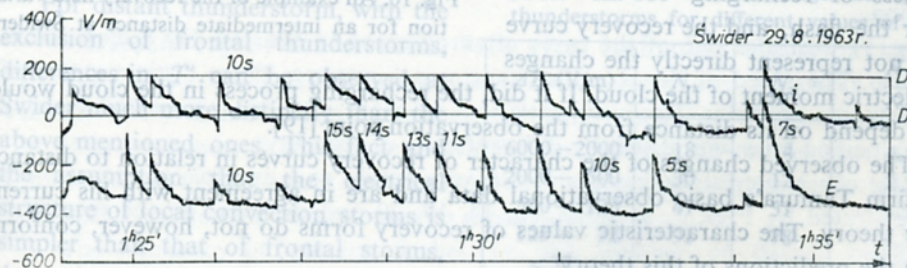


Fig. 14. Recovery curves for a nearby thunderstorm on 29<sup>th</sup> August 1963 at Świder

lightning flash. Although the observed shapes belong to different flashes, they tend to point to a change of character of the recovery curve with distance from the flash. A typical example of the differences and the general character of the shapes is given



in Fig. 14 and Fig. 15 for short and long distances respectively. The former represents recovery curves (of the mature stage of a thundercloud) at distances of less than 5 km, and the latter at distances of over 16 km, which are greater than maximum distance between the observed cloud and the reversal point. The character of the

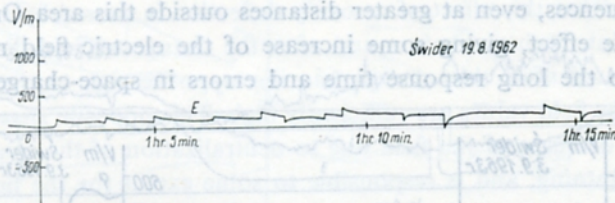


Fig. 15. Recovery field variations for a distant thunderstorm at Świder

recovery curves observed at intermediate distances appears to change between the first and the second shapes. An example of a recovery curve at intermediate distance is shown in Fig. 16.

It is remarkable that the initial rate of recovery  $p$ , often recognized as a rate at which a cloud regenerates its electric moment when the initial internal moment is small, varies with different distance from the flash. The  $p$  values range from 2.5 sec to 60 sec for different distances and different air-mass thunderstorms. For the same thunderstorm these values are changing due to the distance, even for distances greater than the reversal distance ( $D > 10$  km). They decrease on an average with increase of distance.

The regeneration of the field can thus not be ascribed to a simple process of recharging of the cloud after the flash, and the recovery curve can not represent directly the changes

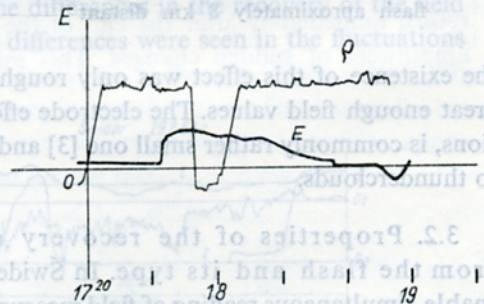


Fig. 16. An example of the recovery field variation for an intermediate distance at Świder

in electric moment of the cloud. If it did, the recharging process in the cloud would not depend on its distance from the observation point [19].

The observed changes of the character of recovery curves in relation to distance confirm Tamura's basic observational data and are in agreement with his current flow theory. The characteristic values of recovery forms do not, however, conform with the predictions of this theory.

Thus, for instance, the recovery times  $T'$  are much shorter than the values expected from Tamura's model for corresponding distances. Average  $T'$  values (for air-mass thunderstorms only) were in Warsaw and Świder about 8 sec for approximately 12 km, as compared with Tamura's model values of 13 sec for the same range of distance.



Discrepancies between Smith's observations and those made at Świder are apparent from comparisons of the latter with the empirical relation between recovery time  $T'$  and amplitude  $\Delta E$ :

$$T' = 6(\Delta E)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

where:  $T'$  in sec,  $\Delta E$  in V/cm.

This relation corresponds to undisturbed conditions and a  $\Delta E$  range between 10 V/cm and 0.1 V/cm. The Świder data for the same range of values do not obey this relation. More statistical data have to be obtained in order to prove regularities of behavior between  $T'$  and  $\Delta E$ , particularly concerning the components of  $\Delta E$  in fast field variations, which seem to be of importance for understanding of this relationship. It would be valuable to relate these values for one flash in a net of stations or, if for practical reasons this is not possible, to gather a statistically adequate number of cases for one kind of thundercloud structure.

The striking feature of the recovery variations noticed at Świder and Warsaw are the differences in recovery times  $T'$  of cloud and earth discharges. Those differences appear, to my knowledge, unaccounted for in recent works, e.g. [7, 26, 28].

The observed values of recovery time  $T'$  and  $p$  showed great variance and dispersion in respect to the mean values. Excluding the cases with local disturbances underneath of the thundercloud, it was noticed — in accordance with the observation of previous workers — that recovery times are smaller for negative  $\Delta E$  field changes than for positive ones. The small mean differences were rather quite distinct for ranges exceeding the reversal distance, similarly to the results and suggestions of previous authors [37]. But with the exception of indication of some individual observations of kind of flashes in previous recovery curve reports, no relation had been established between the kind of discharge and the sign of the field change  $\Delta E$  of observed recovery variations, because positive as well as negative field changes can include flashes to the earth and intra-cloud discharges. Simple visual observations are difficult and give rather no practical possibility to distinguish continuously the kind of flashes, especially for distances outside of the reversal distance.

For distant thunderstorm, with the exclusion of frontal thunderstorms, differences in  $T'$  can be observed at Świder much more distinctly than the above mentioned ones. This fact and the assumption that the electrical structure of local convection storms is simpler than that of frontal storms, drew our attention to the local heat storms, particularly to small and isolated ones.

From Table I it is seen that for some heat storms used there the ratio of the numbers of positive to negative field changes decreases in a function of amplitude  $\Delta E$ , that is with increase of distance  $D$ . It is significant that for  $\Delta E$  values smaller than 500

Table I

The ratio between the numbers  $N_+$  of positive and  $N_-$  of negative field changes during heat thunderstorms for different values of  $\Delta E$

$\Delta E$ (V/m)	$N_+$	$N_-$	$\frac{N_-}{N_+}$
6000—2000	18	4	4.5
2000—500	30	12	2.5
500—125	47	31	1.5
125—32	93	78	1.1
<32			1.1



V/m this ratio remains almost constant<sup>3</sup>. It shows thus the rather simple electrical structure with only positive polarity of the thunderclouds considered in the table. In first approximation the types of discharges other than intra-cloud and cloud-earth could be here neglected.

The average electrical moments for negative and positive field changes for distant flashes of those storms are nearly equal.

About one fifth of all examined cases were distinct complex discharges i.e. with two or more components of opposite sign. In our measurements it was not possible to single out those complex discharges which definitely contained ground components, because of the low resolution of the apparatus used. Therefore all positive components of the complex discharges were treated as ground discharge.

In accordance with the foregoing known remarks about polarity of clouds [25], the signs of sudden field changes for the heat storms considered in table I may give a rough indication of the type of discharge. Positive changes for distances considerably greater than the reversal distance will correspond then to cloud-to-ground discharges, negative changes mainly to intra-cloud discharges.

Records in Warsaw and Świder show that for mentioned distant heat thunderstorms the average recovery times  $T'$  for positive sudden field changes are about 1.75 times longer than the average recovery time for negative changes, both at the same range of distance and observation time. The average time  $T'$  for positive field changes was about 7.8 sec for the range of  $\Delta E$  values between 250 V/m and 25 V/m without rain; the average time  $T'$  for negative change over the same  $\Delta E$  range was about 4.5 sec.

These data indicate for heat thunderstorms observed at Świder a much longer time of recovery field variations for ground discharges than for intra-cloud discharges. The differences between recovery curves for different kind of discharges appear to be characteristic for the properties of recovery processes in clouds and should be the subject of further research.

3.3. Special features of recovery curves. A number of interesting cases of recovery curves were observed, which do not appear to have attracted sufficient attention.

Fig. 17 illustrates one of the cases often observed in Warsaw for a close thunderstorm. The speed of the recording tape was 1 mm/sec. Three distinct stages of the curve are apparent. Recovery variations in each stage are represented by only slightly curved lines with distinctly different rates of recovery.

Some other interesting features of recovery curves as a example of their variety are illustrated by Figs. 7, 8, 9, 12, 13, 14, 19, 20 and discussed in the respective sections.

Many different kinds of special features of recovery curves occur much more frequently and distinctly underneath the thundercloud or in its near vicinity than

<sup>3</sup> This regularity was not seen in all heat thunderstorms observed. Generally the ratio  $\frac{N_+}{N_-}$  does not correspond to monotonic decrease.



at greater distance from the thundercloud. Some of the cloud factors, e.g. recharging processes in the cloud and properties of lightning discharges, affect the recovery field variations at greater distances to a lesser degree than directly below the thundercloud. In the latter case the space charge and local disturbing influences contribute also to increased variety of recovery forms. In order to avoid such local disturbances and to obtain a simpler picture of the recovery curve, it is advisable to make observations of recovery field variations at distances  $12 \text{ km} < D < 25 \text{ km}$ . The distances  $D$  can not be much greater than the reversal distance, because otherwise the electrostatic field values may include high additional inductive and radiative components.

Not all of the observed irregular special features of recovery curves and not all discrepancies with Tamura's calculations can be attributed to local influences and to the difference in magnitude, height and inclination of the dipol used by Tamura. It would seem that the theoretical explanation of recovery variations may be sought rather along the more convincing line of conductivity and charge distribution in the thunder cloud and its environment. It should be noted here that Tamura's thundercloud conductivity values are not in agreement with more recent studies [7, 8, 16] and some observations [12, 16]. In considerations on electrical cloud structure and recovery processes it seems to be also indispensable to introduce the discussed problem of electric space charge conditions beneath the thundercloud [23].

Our present understanding of recovery variations is still very inadequate and many gaps in corresponding observational knowledge can be noted. For detailed interpretation of what has been observed it is necessary to have simultaneous additional electrical data as well as some meteorological observations e.g. with radar. Discrepancies between observed cases and Tamura's theoretical values can not be elucidated without increasing the range of observations.

3.4. Recovery of the electric field after lightning at the background of the kind of thunderstorm cloud and the stage of their development. Every thunderstorm comprises normally a number of thundercloud cells in different stages of development. Having no information on the distribution of thundercloud cells in space and time and on the location of a given discharge, it is difficult to relate its recovery curve to a corresponding cell.

The frequency of lightning flashes i.e. the number of flashes per minute, increases from the beginning of the storm to a peak value and subsequently decreases [24]. Sometimes one observes a cyclic variation of lightning frequency which is known to arise from the growth and decay of individual thunderstorm cells. Now and then an approximate distinction of individual cells is possible. The number of cells developed during the lifetime of a storm and the time interval between successive cells

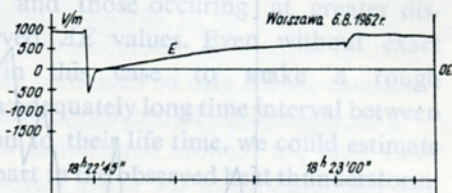


Fig. 17. An example of the recovery curve (3 stages) during the thunderstorm at 16<sup>th</sup> August 1962 in Warsaw



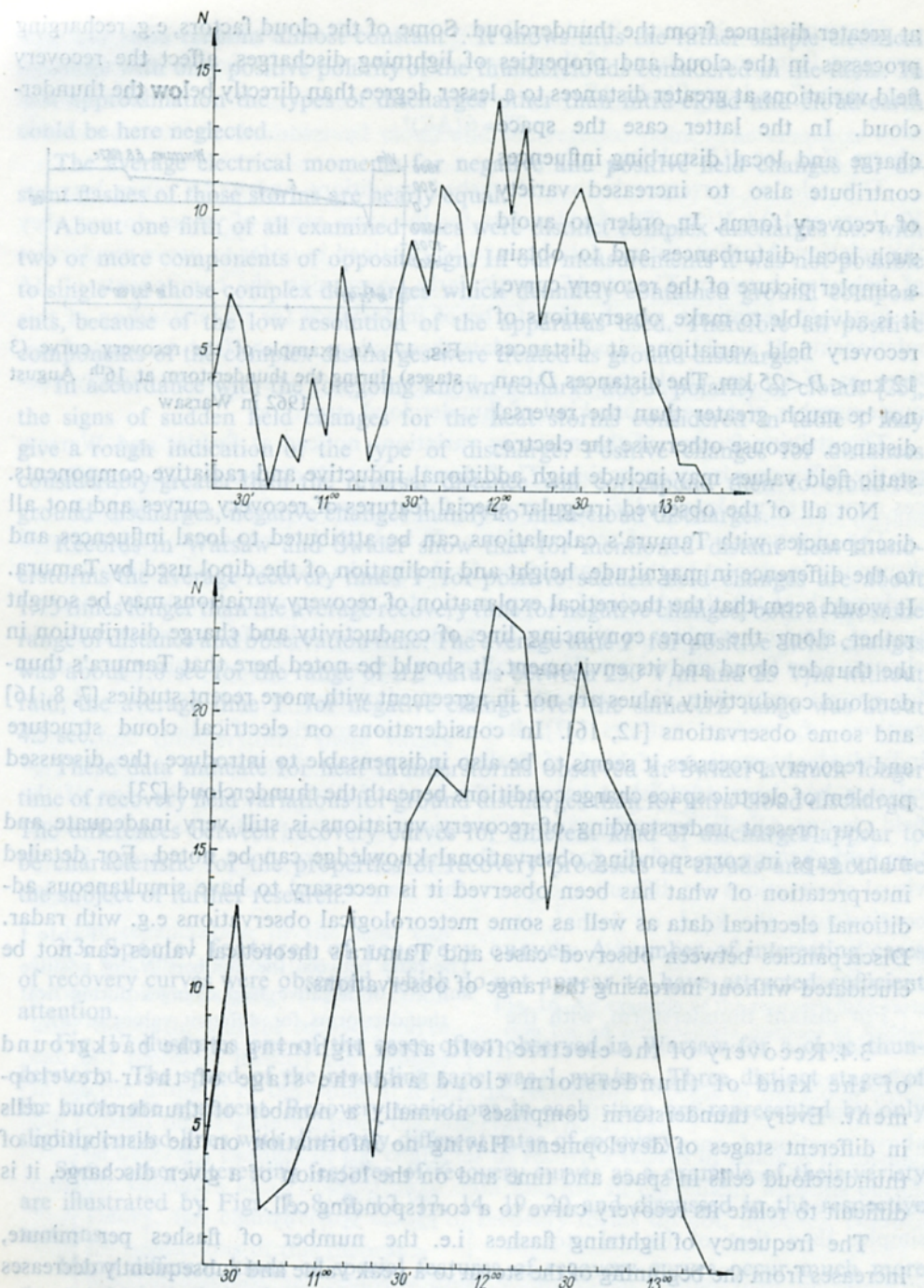


Fig. 18. Variation in flash frequency during the thunderstorm of 7th August 1963 at Swider

A — number of flashes for 5 minute intervals; B — number of flashes for 10 minute intervals



can be estimated from the crests and troughs in curve variations of lightning frequency, the irregularities of the curves having been averaged [1].

Fig. 18 shows an example of flashing frequency variation in one thunderstorm observed at Świder on August 7, 1963. It was a distant thunderstorm in which it was possible to distinguish between closer flashes and those occurring at greater distances, owing to the differences in the observed  $\Delta E$  values. Even without exact smoothing operations it seems possible in this case to make a rough estimate of the number of cells. If we assume an adequately long time interval between the development of individual cells in relation to their life time, we could estimate that about 5 active cells were probably taking part in the observed heat thunderstorm.

For all distant storms the ratio between the number of intracloud and cloud to ground discharges has not been evaluated, but it was possible to observe a wide variety in this ratio for different storms. Thus, for instance, during the storm of 29<sup>th</sup> August 1963 at Świder nearly all flashes were cloud to ground, while during the storm of 20<sup>th</sup> September 1963 only a small percentage of lightnings were cloud to ground according to additional visual observations.

When a given kind of thunderstorm is studied, it is found that sudden jumps of the electric field and their recovery are different for lightning flashes of even approximately equal distances. The characteristic recovery values appear then to be related to differences in cloud development stages. In the first stage of lightning activity and especially for cells with low intensity, the  $p$  values, characteristic for the initial value of the field regeneration rate  $\left(\frac{\partial E}{\partial t}\right)_{t=0}$ , and  $T'$  are greater than the corres-

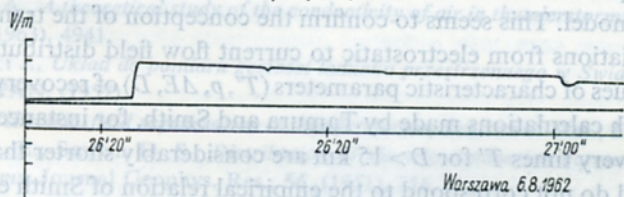


Fig. 19. Recovery field variation during a small thunderstorm on 6<sup>th</sup> August over Warsaw

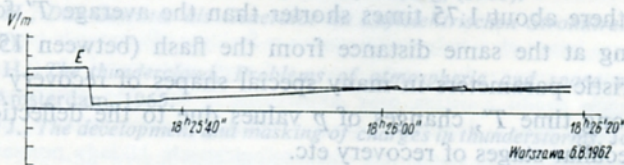


Fig. 20. Recovery field variation during a small thunderstorm on 6<sup>th</sup> August over Warsaw

ponding values for the mature stage of thundercell activity at approximately the same range of distances. Some precautions are here necessary owing to the relative movement of thundercloud systems towards the place of observation and other factors.

Fig. 19 and 20 illustrate interesting examples of recovery field variations with exceptionally long recovery times  $T'$  (about 60 sec), represented by almost straight



lines. Such instances occurred for flashes preceded by long  $T_1$ . Quite often, the shorter is  $T_1$  the shorter appears to be the recovery time  $T'$ . Not enough data have been collected so far to illustrate correlations between  $T'$  and  $T_1$  for observed heat storms, wherefore no regular relationships can be given at present. Parameters of the physical processes occurring in thunderclouds and lightning discharges show considerable statistical dispersion, wherefore the magnitudes of characteristic data of recovery variations should also be examined statistically.

The inadequate information available at present does not allow to do much more than put forward suggestions which appear to deserve statistical elaboration. The interrelations of the many factors involved in recovery processes make it, however, very difficult and often impossible to study successfully field variations after lightning discharges without supplementing it by a further complex range of observations.

#### 4. CONCLUSIONS AND PRELIMINARY SUGGESTIONS

1. Among the local conditions influencing recovery field variation after lightning, the most effective are space charge generated by point discharges and splashing of raindrops on the ground. Those effects, responsible for many of the peculiar shapes of the observed recovery curves, are less distinct in distant flashes and can be nearly avoided when moreover there is no rainfall over the area of measurement. Deviations due to electrode effect may for greater distances be regarded as negligible.

2. Generally, the character of recovery field variations observed in Warsaw and Świder is in respect to distance similar to the variations derived theoretically by Tamura from his model. This seems to confirm the conception of the transient character of recovery variations from electrostatic to current flow field distribution.

3. Some values of characteristic parameters ( $T'$ ,  $p$ ,  $\Delta E$ ,  $D$ ) of recovery curves appear not to agree with calculations made by Tamura and Smith, for instance:

a) The recovery times  $T'$  for  $D > 15$  km are considerably shorter than in Tamura's calculations and do not correspond to the empirical relation of Smith either.

b) Considerable differences in the recovery time  $T'$  were observed for intracloud and cloud-earth discharges for some heat thunderstorms. The average  $T'$  for cloud discharges was there about 1.75 times shorter than the average  $T'$  for ground discharges occurring at the same distance from the flash (between 15 and 25 km).

c) Characteristic parameters in many special shapes of recovery field variation e.g. extremely long time  $T'$ , changes of  $p$  values due to the deflections caused by space charge, peculiar stages of recovery etc.

Not all of the observed discrepancies could be attributed to a difference in magnitude, height and inclination of the dipole used by Tamura from that in the observed clouds. Some of these discrepancies suggest the necessity of introducing assumptions other than those used by Tamura in his model. These new assumptions should deal with the following problems:

- $\alpha$  — differences in the conductivity of the air and of the clouds,
- $\beta$  — point discharge current and space charge between the base of the cloud and the earth,



$\gamma$  — differences in the rate of regeneration and the masking processes in the cloud.

4. The recovery curves seem to be dependent on the stage of development of thundercloud-cells and the changing character of the clouds from one storm to another. This suggests a study of the recovery field variations and lightning frequency in order to obtain additional information about physical conditions of cells and trends in their development.

Manuscript received by Editor: September 29, 1966.

#### REFERENCES

1. Aiya S. W. C., Sonde B. S., *Spring thunderstorms over Bangalore*, Proc. of IEE, Nov. (1963).
2. Brook M., Kitagawa N., *Some aspects of lightning activity and related meteorological conditions*, Journal Geophys. Res., **65**, 4 (1960), 1203—1210.
3. Chalmers J. A., *Atmospheric electricity*, Pergamon Press, (1957).
4. Chalmers J. A., *The relation of point discharge current to potential difference and wind-speed*, Journal of Atm. and Terr. Phys., **24**, (1962), 344.
5. Chalmers J. A., *On the conductivity of the air in thunderstorms*, Journal Geophys. Res., **67**, (1964).
6. Fitzgerald D. R., *Some theoretical aspects of the relation of surface electric field observations to cloud charge distribution*, Journal of Met., **14**, (1957), 505.
7. Freier G. A., *Conductivity of the air in thunderstorms*, Journal Geophys. Res., **67**, (1962), 4683.
8. Freier G. A., *A theoretical study of the conductivity of air in thunderstorms*, Journal Geophys. Res., **68**, (1963), 4941.
9. Gadomski J., *Układ do pomiaru gęstości ładunku przestrzennego w Świdrze*, Arch. Zakładu Geofizyki PAN, (1957).
10. Gunn R., *Electric field regeneration in thunderstorms*, Journal of Met., **11**, (1954), 130—138.
11. Holzer R. E., Saxon D. S., *Distribution of electric conduction currents in the vicinity of thunderstorms*, Journal Geophys. Res., **56**, (1951), 216.
12. Imianitov J., *Ku woprosu elektryczności i przewodności grozowych obłoków*, Dokł. A. N., **109/1**, (1956), 77.
13. Israel H., *Atmosphärische Elektrizität*, Teil 2, Leipzig, (1961).
14. Kasemir H., *Das Gewitter als Generator im Luftpoletrischen Stromkreis*, Zeitschr. Geoph. **25**, 2, (1959).
15. Kasemir H., *The thundercloud, Problems of atmospheric and space electricity*, ed. S. C. Coroniti, Amsterdam, 1965.
16. Kuettner J., *The development and masking of charges in thunderstorms*, Journal of Meteorol., **13** (1956).
17. Machotkin L. G., *Izmenienie skaczkw naprężenności elektrostatycznego pola w zawiśności ot rosztrojania do grozawego rozriada*, Fizyka Atmosfery i Oceana, **1**, 2, (1965).
18. Malan D. J., *Les décharges dans l'air et la charge inférieure positive d'un nuage orangeux*, Ann Géoph. **8**, (1952).
19. Malan D. J., *Physics of Lightning*, London — English Univ. Press, 1963.
20. Mason B. J., *The physics of clouds*, Oxford — Univ. Press, 1957.
21. Mason B. J., *Charge generation in thunderstorms, Problems of atmospheric and space electricity*, S. C. Coroniti, Amsterdam, 1965.
22. Michnowski S., *Wpływ wyladowań z ostrza na natężenie pola przy powierzchni ziemi*, Acta Geophys. Pol., (1955).



23. Michnowski S., *Zmiany pola elektrycznego chmur burzowych w warstwie przyziemnej powietrza w Świdrze i Warszawie*, in press.
24. Müller-Hillebrand D., *Coment on: Charge Generation in thunderstorms by B. J. Mason, Problems of atmospheric and space electricity*, S. C. Coroniti, Amsterdam. 1965.
25. Pierce E. T., *Electrostatic field changes in lightning discharges*, Quart. Journal Roy. Met. Soc. **81**, (1955), 211.
26. Smith L., *Electric field studies of Florida thunderstorms*, Rec. Adv. in Atm. El., ed. L. G. Smith, (1958).
27. Schonland F. B. J., *The lightning discharge*, Handbuch der Physik, (1956), 376–628
28. Tamura Y., *An Analysis of electric field after lightning discharges*, Journal of Geom. a. Geoelectr., **6**, March, (1954).
29. Tamura Y., *Investigations of the electrical structure of thunderstorms*, Rec. Adv. in Atm. El. ed. L. G. Smith, (1958).
30. Vonnegut B., *Some facts and speculations concerning the origin and role of thunderstorm electricity*, Meteor. Monogr., **5**, 27, (1963).
31. Warzecha S., *Roczniki elektryczności atmosferycznej i meteorologii*, Obserwatorium PAN w Świdrze, 1962.
32. Watt A. D., *ELF electric fields from thunderstorms*, Journal Res. Nat. Bureau Stand., **64D**, (1960), 425–433.
33. Workman E. T., Reynolds S. E., *Electrical activity as related to thunderstorm cell growth*. Bull. Amer. Met. Soc., **30**, (1949), 142–144.
34. Wilson C. T. R., *Investigation on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms*, Phil. Trans. A. **221**, 73–115.
35. Wormell T. W., *Atmospheric electricity, some recent trends and problems*, Quart. Journal. Roy. Met. Soc. **79**, (1953), 3–38.
36. Wormell T. W., Adkins C. J., *Effects of splashing of raindrops at the ground*, Rec. Adv. in Atm. El. ed. L. G. Smith — Pergamon Press, (1958).
37. Wormell T. W., *The effect of thunderstorms and lightning discharges and the Earth's electric field*, Philos. Trans. **A238**, 1939, p. 249.

## ZMIANY POLA ELEKTRYCZNEGO PO WYŁADOWANIACH ATMOSFERYCZNYCH OBSERWOWANYCH W WARSZAWIE I ŚWIDRZE

### Streszczenie

Podczas kilkunastu burz i ulew były wykonywane w Świdrze i Warszawie pomiary zmian pola elektrycznego za pomocą przyrządu o stałej czasie wskazań wynoszącej ok. 0,1 s. Jednocześnie prowadzono rejestrację prądu z ostrza oraz akustyczne i wizualne obserwacje wyładowań. Dodatkowo prowadzone były w Świdrze rejestracje ładunku przestrzennego, nasilenia opadu, kierunku i siły wiatru oraz innych elementów meteorologicznych. Układy pomiarowe zainstalowano w specjalnie wybranym rozkładzie przestrzennym na dwu wysokościach celem uchwycenia wpływu efektów lokalnych na przebieg zmian pola.

W artykule został podany przegląd rejestrowanych zmian pola po wyładowaniach elektrycznych. Starano się prześledzić dostępne dla obserwacji wpływy wywierane na przebieg zmian powrotu pola przez chmury burzowe i ich wyładowania oraz przez zakłócające efekty lokalne. W analizie posłużono się metodą zestawień odpowiednich parametrów charakteryzujących zmiany powrotu pola dla różnych warunków lokalnych i różnych odległości od wyładowań, rodzaju chmur ect. Drugim możliwym podejściem było wykorzystanie porównań obserwowanych zmian powrotu pola ze zmianami wyprowadzonymi teoretycznie na podstawie przyjmowanych modeli chmur, przede wszystkim przepływowego modelu Tamury.



Jednoczesne pomiary kilku elementów w Świdrze potwierdziły wyraźnie występowanie silnych wpływów lokalnych pochodzących od czynników, jakie występują w warstwie przyziemnej powietrza, a co do działania których nie ma jeszcze powszechnej zgody. Zostały stwierdzone duże wpływy wywołane ulewnym deszczem (rys. 12, 13) oraz bardzo wyraźny wpływ ładunków przestrzennych wytwarzanych przez wyładowania z ostrzy (rys. 7, 8, 10, 11). Oddziaływanie tych ładunków może być praktycznie pomijane przy niedużych wartościach gradientu potencjału. Uznano, iż spełnienie tego warunku daje praktyczną pomijalność również efektu elektrodowego. Rozeznanie lokalnych wpływów pozwoliło dać wskazówki co do właściwego wyboru miejsca obserwacji zmian powrotu pola przy badaniach elektrycznych właściwości chmur. Z tych i innych względów uznano za właściwe wybranie odległości między 12 i 25 km oraz wyłączenia okresów lub miejsc obserwacji z deszczem.

Rejestrowane różnice charakteru powrotu pola w zależności od odległości od wyładowania są na ogół podobne do odpowiednich zmian otrzymanych teoretycznie przez Tamurę na podstawie jego modelu (patrz rys. 14, 15, 16). Podobieństwo to przemawia za słusznością przyjętej przez Tamurę dotychczas kontrowersyjnej interpretacji zmian charakteru przebiegów powrotu pola w miarę oddalania się od wyładowania. Według tej interpretacji przebiegi powrotu pola odpowiadają przejściu rozkładu pola rozładowywanej chmury od początkowego rozkładu elektrostatycznego tuż po wyładowaniu, poprzez stany nieustalone do quasistacjonarnego rozkładu przepływowego dyktowanego właściwościami ośrodka. Czas  $T'$  powrotu pola do połowy amplitudy skoku  $E$  był jednakże znacznie krótszy niż w obliczeniach Tamury i nie odpowiadał empirycznej zależności podawanej przez Smitha. Również nie odpowiada teoretycznym krzywom Tamury wiele nietypowych (tj. nie zbliżonych do eksponentjalnych) form krzywych powrotu pola, które licznie występowały w Świdrze i Warszawie. Część z tych form nie była dotychczas przez nikogo omawiana (np. rys. 7, 8, 17) niektóre natomiast (np. rys. 19, 20) nie zyskały należytej uwagi. Wobec spotykanych rozbieżności wydaje się konieczne wprowadzenie uzupełnień i nowych założeń do modelu przepływowego Tamury.

Interesujące spostrzeżenia przyniosły w Warszawie i Świdrze badania różnic czasu powrotu pola dla ujemnych i dodatnich skoków pola po wyładowaniach. Odpowiadające znakom skoków różnice szybkości powrotu pola obserwowano uprzednio jako raczej niewielkie. Dla wartości średnich rozpatrywanych dotychczas łącznie dla różnego rodzaju burz były one notowane w wysokości około 15%. Podobnej wielkości średnie różnice były obserwowane w Świdrze i Warszawie. Uderzająco duże różnice ujawniły się wówczas, gdy do porównań wzięto wyładowania z wyłączeniem burz frontalnych i intensywnych burz termicznych. Podczas paru burz termicznych średni czas  $T'$  był dla skoków ujemnych około 1,75 razy krótszy niż przeciętny czas  $T'$  dla skoków o znaku dodatnim. W jednym i drugim przypadku dotyczy to wyładowań z odległości pomiędzy 15 i 25 km.

Używając ogólnie znanej metody analizy znaku skoków pola w funkcji odległości od wyładowania można było przypisać obserwowanym burzom ciepłym stosunkowo prostą strukturę o dodatnim tylko spolaryzowaniu chmur oraz przyjąć, że dla odległości przekraczających odległość odwrócenia znaku pola skokom o znaku dodatnim odpowiadają wyładowania doziemne, zaś o znaku ujemnym — wyładowania w chmurze. Otrzymane różnice wykazują wobec tego występowanie w obserwowanych burzach termicznych znacznie dłuższego czasu powrotu pola (o około 75%) dla wyładowań doziemnych niż dla wyładowań w chmurach i rozszerzają dotychczasowe w tej sprawie informacje. W dawnych pracach co prawda wskazywano na możliwość większego nieco czasu powrotu pola dla wyładowań doziemnych niż dla wyładowań w chmurach, lecz ogólnie występowania tego nie wykazano, poza paru pojedynczymi przypadkami indywidualnymi, w których dostępna była identyfikacja wizualna rodzaju wyładowań. W powojennych badaniach zmian pola nie spotyka się już na ten temat dalszych danych, co wydaje się raczej dziwne zważywszy znaczenie tego rodzaju spostrzeżeń.

Pomiary w Świdrze i Warszawie częściowo potwierdzają występowanie cykliczności w nasileniu częstości wyładowań w czasie burz termicznych. Wydaje się, iż w pewnych przypadkach możliwe staje się rozróżnienie maksymalnego nasilenia częstości wyładowań poszcze-







SOME RESULTS OF THE MEASUREMENTS OF RADIOACTIVE,  
ATMOSPHERIC ELECTRICITY AND METEOROLOGICAL PARAMETERS  
AT THE GEOPHYSICAL OBSERVATORY AT ŚWIDER

Stanisław MICHNOWSKI\*, Jerzy PEŃSKO\*\*, Bogdan GWIAZDOWSKI\*\*\*

Abstract

Measurements methods of the gamma background radiation and artificial radioactive fallout from the atmosphere are described. The measurements results are given together with the values of meteorological and atmospheric electricity parameters. The measurements were carried out on the ground of the Geophysical Observatory at Świder in 1970-1972.

A preliminary examination of the measurements results shows that an average daily gamma background radiation is at Świder almost constant during the whole year (approximately level of  $2.7 \mu\text{R/h}$ ) with the exception of periods of heavy rainfall and snow.

In the samples of radioactive fallout taken at the end of March and the beginning of April 1972 fresh fission products were found. They originated from an atmospheric nuclear explosion carried out on 19 March 1972 in the People's Republic of China. The multiple increase of the radioactive fallout, connected with this explosion, only slightly disturbed the gamma background radiation. The values of conductivity, however, increased significantly in spite of a greater concentration of condensation nuclei observed at that time.

The relationships between atmospheric electricity parameters, the condensation nuclei and intensity of radioactive exposure dose rates are discussed. These relations are modified by the complex influence of meteorological factors and ground conditions.

---

\* Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Warsaw.

\*\* Institute of Nuclear Research, Świerk near Warsaw.

\*\*\* Central Laboratory of Radiological Protection, Warsaw.



## 1. Introduction

The study of radioactive pollution of the biosphere and of the resulting emission of ionizing radiation, is an important part of a research program aimed at the protection of the natural environment. Atmospheric electricity parameters are of importance in those studies as their values can to some extent indicate the increased concentration of radioactive and neutral microaerosol pollution in our environment.

In 1967 the Institute of Geophysics of the Polish Academy of Sciences set up a special station for the simultaneous observation of radioactive, electric and meteorological parameters. The station was organized at the Geophysical Observatory at Świder. The Institute of Nuclear Research and the Central Laboratory of Radiological Protection were invited to participate in joint measurements.

The Observatory at Świder has carried out continuous observations of several meteorological parameters such as precipitation, snow cover, air temperature and pressure for many years. The measurements of electric conductivity, concentration of condensation nuclei and electric field made it possible to study the time variations of electric parameters in relation to the changes of radioactive parameters specifying the exposure dose rates of nuclear radiation in the atmospheric surface layer. The measurement of the gamma background radiation and radioactive fallout has been used as an index of radioactive pollution.

After a preliminary analysis two types of radiation detectors were chosen for radiological measurements. They are: the spectrometric scintillation counter and the high-pressure ionizing chamber. These measurements were supplemented in 1972 by the measurement of radioactivity of the atmospheric fallout.

This paper is the result of a joint program carried out by the Institute of Geophysics, the Institute of Nuclear Research and the Central Laboratory of Radiological Protection.

## 2. Measurement systems and methods

Continuous recording of the radioactive, atmospheric electricity and meteorological parameters was carried out.

### 2.1. Spectrometric measurement of the gamma background radiation

Continuous measurements and observations of the gamma dose rate variations originating from an artificial radioactive fallout and from natural radioactive isotopes, as well as the possibility of identification of the more important radiation components, require an elaboration of the proper methods, and the design and production of necessary instruments. Figure 1 shows a schematic diagram of the measurement device. The device contains two scintillation counters with NaJ(Tl) crystals 5" in diameter and 2" high.



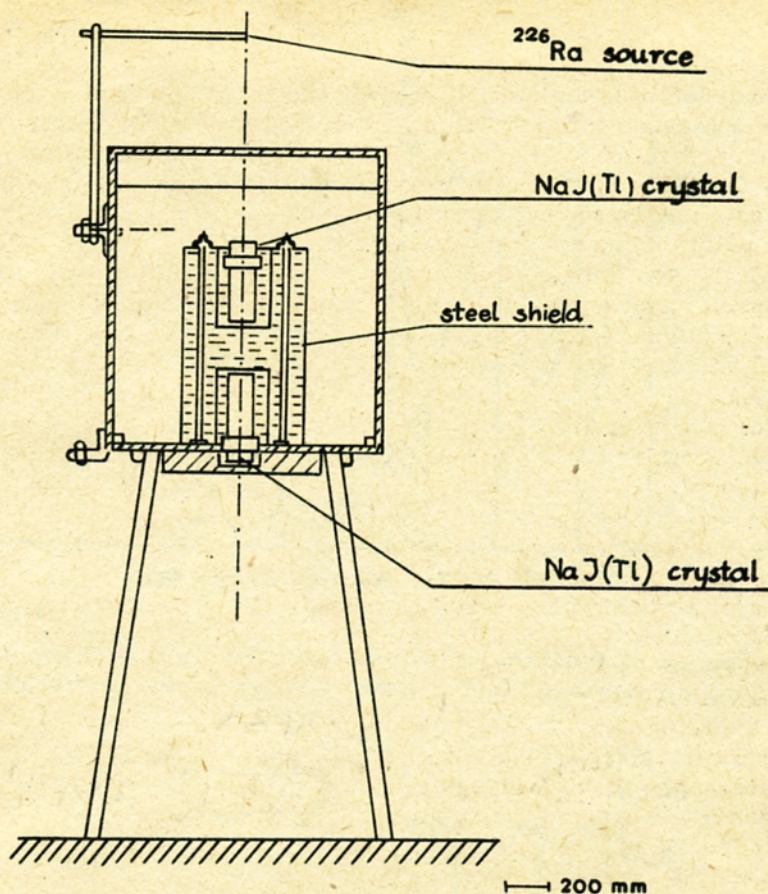


Fig. 1. Steel shielding and scintillation counters adopted for the measurement of the gamma background radiation.

Both counters are placed in a steel shield of 150 mm wall thickness, protected against rain and snow by a wooden hut. The height of stand is 180 cm.

The device enables independent measurements of gamma rays coming to the ground surface from the atmosphere and the gamma rays coming from the ground surface itself in solid angles close to  $2\pi$ . Figures 2 and 3 show the energy distribution of pulses originated from the soil gamma background radiation as measured by the lower and upper counters.

The total exposure dose rate of the gamma background radiation in a full solid angle was estimated by adding the dose rates measured by both counters. The determination of the dose rates, based on the measured counting rate, required the application of correction factors for cosmic radiation and for technological cause as well as the carrying out of respective calibration procedure. Measurements of the integral spectra and absorption curves of the gamma radiation for the radium standard source and for the terrestrial gamma background have shown that this source fulfils the conditions required for the proper calibration of instruments within the frame-



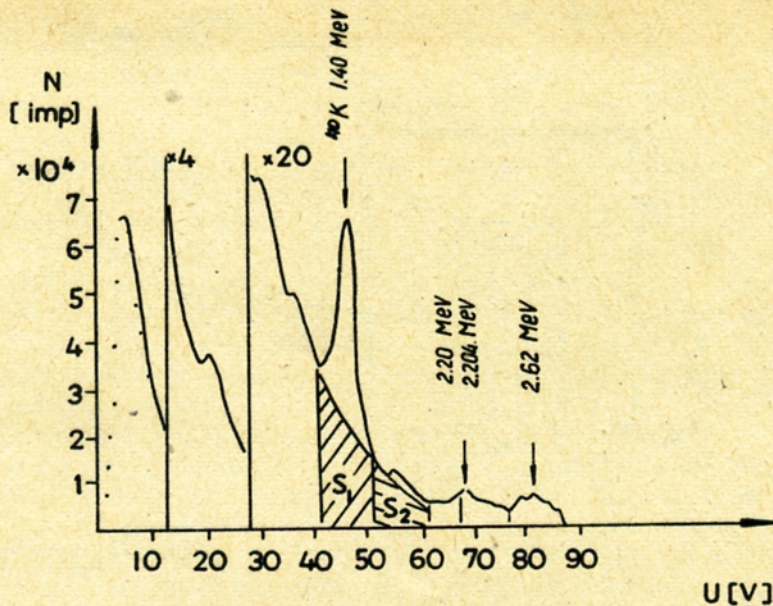


Fig. 2. Energy distribution of pulses from the terrestrial gamma background radiation, as measured by the lower counter of the stationary system.

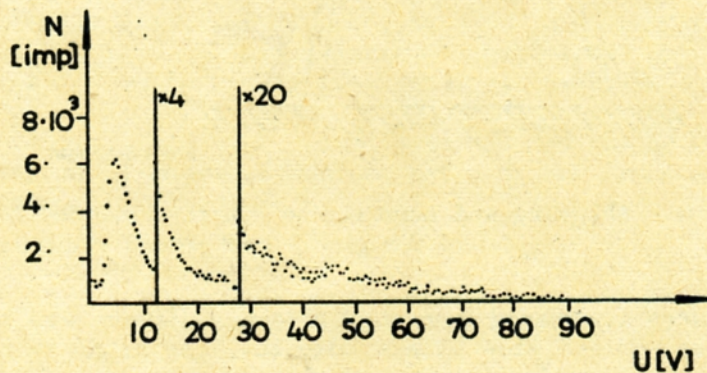


Fig. 3. Energy distribution of pulses from the terrestrial gamma background radiation, as measured by the upper counter of the stationary system.

work of the present study. The values of exposure dose rate arising from various components of gamma background radiation were calculated under an assumption that they are proportional to the counting rate defined by the surface of respective photoelectric peaks of studied pulse spectra. For the case of  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  families it was assumed that they are at radioactive equilibrium and the value of each photopeak surface in a measured spectrum is proportional to the gamma radiation dose rate of the whole family. The temperature effect was small due to the applied thermal shielding. The details of this method are described by Peňsko (1973).



The dose rate of gamma radiation emitted by isotopes from an artificial radioactive fallout was computed by subtracting the dose rate of natural background radiation from the total dose rate of the gamma background. The values of the dose rate of the gamma radiation emitted by particular artificial radionuclides were not determined. Their part in the total gamma background radiation was very small during the time of observation.

## 2.2 Continuous measurement with the high-pressure ionizing chamber

The equipment used for continuous measurement the gamma background radiation contained a high-pressure ionizing chamber, electrometer VA-J-51 with dynamic condenser and electric recorder NSK.

A steel bottle with walls about 4 mm thick and a capacity of 7 l, filled with argon under pressure of 36 Atm., was used as an ionizing chamber. The chamber was connected by concentric cables with an electrometer containing a dynamic condenser. The cables were placed in plastic tubes to prevent generation of electric charges caused by cable movements. The application of a long cable, separating the chamber from the converter with dynamic condenser, was necessary in view of a limited range of temperatures in which a dynamic condenser can work. Thus the converter and electrometer can be housed in a properly heated room. The rate of recording was adjusted to a monthly exchange of recording tapes, during the continuous work of the instruments.

The method of instrument calibration, based on the use of the  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{131}\text{I}$  standard sources, has been described previously (Peńsko, 1973).

The values of calibration coefficients were calculated for the spectrum composition of a gamma background radiation equivalent to 70% of the  $^{226}\text{Ra}$  radiation and 30% of  $^{131}\text{I}$  radiation. An isotropic distribution of gamma radiation field and infinite plane surface distribution were assumed for calculations.

Corrections for cosmic radiation were estimated from measurements carried out on lake Niegocin (Peńsko, 1973).

The dependence of high-pressure ionization chamber indications on the gamma radiation dose rate is of a linear character within the large range of dose rates from single  $\mu\text{R/h}$  up to about 10 mR/h. The temperature's effect on the indication values was small.

## 2.3. Measurement of global beta activity of the atmospheric fallout

The atmospheric fallout is collected into a plastic container 12 cm deep and with a base surface of 0.2 m<sup>2</sup>. The time of exposition is one week. Samples are taken on Tuesdays at 9 a.m. The emptied container is rinsed several times with distilled water to which HNO<sub>3</sub> has been added (about 0.5 dm<sup>3</sup> of water each time). The rinsing solution is added to the taken sample. The container is also rinsed when no atmospheric precipitation has occurred. The solution used in rinsing a container with "dry precipitation" is then taken as a sample of the total precipitation. The sample is vaporized in a porcelain evaporating dish with a capacity of 1 dm<sup>3</sup>. After the evaporation of water the damp remnant is transferred,



with the help of filter-paper, into a porcelain melting-pot and burned in a temperature not exceeding 500°C. To measure the global beta activity the total ash mass is taken. The measurement sample is an ash sample with a mass of 200 mg packed up in paper 1 mg/cm<sup>2</sup> thick and placed in a plexi-glas ring 2 mm thick with an internal diameter of 20 mm. The sample is consolidated by clear varnish with a density about 1 g/cm<sup>3</sup>. The determination of beta activity in samples is made by the global measurement method, and the quantitative and qualitative determination of separate radionuclides by the spectrometric analysis of gamma radiation. Measurement of the global beta activity is made with the help of two G.M. counters directed towards each other. The distance between the G.M. windows is 5 mm. The counter's background does not exceed 20 cpm. The efficiency of the detection system is estimated with the help of natural potassium.

A spectrometric analysis is made for the energy of gamma quantum within a range of 0.080 to 3 MeV. Measurements are carried out with the scintillation counter with NaJ(Tl) crystal 3" by 3" and an NTA-512 pulse height analyser.

The content of radionuclides in the total fallout is estimated by the spectrometric measurement of the same samples used to measure the global beta activity. They are placed in a polyethylene beaker with a capacity of 0.25 dm<sup>3</sup>.

#### 2.4. Measurements of atmospheric electricity parameters

The measurements of atmospheric electricity parameters included: the continuous recording of electric field intensity and positive electric conductivity, and systematic observation of the concentration of condensation nuclei.

Electric field intensity was measured by two collector systems. The radioactive collector (30 μCi) of the first system is located on a level of 200 cm and the second on a level of 230 cm above the ground surface. They are placed on an insulated metal rod connected with the input of a special electrometer (Warzecha, 1973). The output-signal from electrometers with a properly selected range of sensitivity is transferred by a cable for recording in the station building.

Electric conductivity is recorded by an aspiration system with a continuous air-flow (Dziembowska, Warzecha, Puchalski, 1969). The air flows through a cylindric measuring condenser along its electrodes. In the area of the electric field directed perpendicularly to the electrodes, electric ions are deviated from the air stream in the direction of the electrodes. One well insulated electrode is connected with the ground through a high resistance (10<sup>11</sup> Ω). The flow of electric charges accumulated by the catching of ions by the resistance gives a drop of tension which is measured by a dynamic electrometer. The value of conductivity is proportional to the instrument parameters and to the value of the measured signal, which is recorded in the station building. The air is taken outdoors at a height of 1 m.

The concentration of condensation nuclei is measured by the Scholz counter. The measurement is made systematically three times a day at standard times.



## 2.5. Measurements of meteorological parameters

Meteorological measurements included the recording of the precipitation by the Hellmann pluviograph, recording of temperature, pressure, humidity and insolation by standard instruments and station methods. The direction and velocity of wind was also recorded, and systematic observations of cloudness and types of clouds were made.

A description of the measurement equipment used at the station of atmospheric electricity at Świder and the location of station instruments are given in the introduction to the station bulletins (Warzecha, 1970).

## 3. Results of measurements

Measurement results of the gamma background radiation in 1970-1972 at Świder, obtained by the stationary scintillation monitor, are shown in Figs 4, 5 and 6. The results are presented in a form of annual changes of the average daily values of dose rates expressed in  $\mu\text{R/h}$ . These values are computed as an arithmetic mean of all the eight-minute measurements made in a given day.

In 1972 the values of dose rates of the gamma background radiation were calculated taking into account the corrections for the upper counter seeing that for a greater part of the year only the lower counter worked.

The calculated dose rates are within a range of 1.1 to 4.5  $\mu\text{R/h}$ .

The results of the estimation of the artificial radioactive fallout from the atmosphere are shown in Fig. 7.

The measurement results of the atmospheric electricity and meteorological parameters are given in Figs 4, 5 and 6 in the form of annual changes of the average daily values of respective parameters.

## 4. Discussion and preliminary conclusions and remarks

The details of application of the measurement results will be described in separate papers. From the results given here several general relationships can be preliminarily noted.

The annual changes of electric and meteorological parameters (Figs 4, 5 and 6) show that the exposure dose rate decreases with the rising thickness of the snow cover and it increases during atmospheric precipitation. The observed dose intensities are within a range of values from 1.1 to 4.5  $\mu\text{R/h}$ . The smallest values are observed during winter when snow layer is thick. At other times the intensities of the exposure dose rate remain on an approximately constant level of 2.7  $\mu\text{R/h}$ . This value is in good agreement with the dose rate calculated from the measured concentrations of uranium, thorium and potassium in the soil samples. These concentrations are: 0.517 ppm  $^{238}\text{U}$ , 1.19 ppm  $^{232}\text{Th}$  and 0.7%  $^{40}\text{K}$  (Peńsko, 1973).



Momentary values of the exposure dose rate, rising sometimes up to  $4.5 \mu\text{R/h}$ , were mainly caused by heavy precipitation. The precipitation washing out gamma-radioactive decay products of radon from the atmosphere - and clogging soil pores has caused short-lived accumulation of the radon daughter in the surface layer and a momentary increase of the gamma background radiation, measured by detectors placed low above the ground. Similar effects were previously observed by other workers (Turner, 1974), and also by one of the present authors (Peńsko, 1973).

The values of the gamma background radiation obtained from the scintillation counter agree with those from the high-pressure ionization chamber, although the results obtained from the chamber show much larger annual fluctuations of exposure dose rate. Both methods demonstrated the dependence of the measured parameters on rainfall and snow cover thickness.

An analysis of the relationship between the gamma background radiation and atmospheric electricity parameters is difficult to make, because of a lack of measurements of radon and its decay product at Świder. Thus in this paper daily changes are not considered. They are to a great extent related to the daily variations of the vertical turbulence exchange.

A preliminary comparison of the results presented in Figures 4, 5 and 6 does not indicate any significant correlation between the gamma radiation dose rate and the electric conductivity and concentration of condensation nuclei. This could mean that the influence of meteorological factors upon these quantities is greater than the direct influence of the increased ionization of the air or changes in the concentration of condensation nuclei upon the value of the measured conductivity.

It can be seen from Fig. 7 that an increase in radioactive fallout in the second and third quarters of 1972 was observed. Large values of the fallout were caused by a significant increase in precipitation. Spectrometric analy-

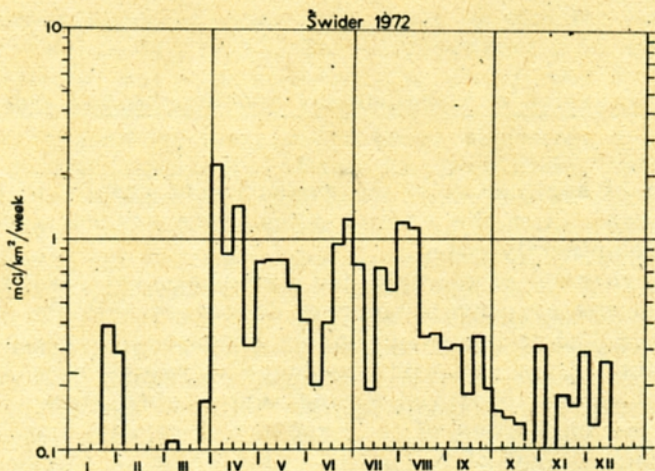


Fig. 7. Measurement results of the artificial radioactive fallout from the atmosphere in 1972 at Świder.



sis of the samples of precipitation found long-lived decay products of post explosion origin, like:  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{144}\text{Ce}$ .

The annual variation of the artificial radioactive fallout does not show typical changes observed during the first few years after the ban on nuclear explosions in the atmosphere was introduced (Michnowski et al., 1965). During springtime the increase of artificial fallout observed at Świder is larger than the so-called spring effect. In samples of the radioactive fallout collected at the end of March and the beginning of April fresh decay products were observed. These products  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{141}\text{Ce}$  and  $^{147}\text{Nd}$  were originated by the nuclear explosion on 19 March 1972 in the People's Republic of China. The multiple increase of the radioactive fallout caused by the explosion has only a slight influence on the variation of gamma background radiation (Fig. 6). The values of electric conductivity, however, have increased significantly despite greater concentrations of condensation nuclei observed at that time from those measured previously. The influence of radioactive fallout on electric conductivity and the influence of meteorological parameters on fallout accumulation on the ground surface at Świder is considered separately (Gadomski, 1975).

The changes in the concentration of small ions, and the following changes in electric conductivity, depend upon various processes of formation of small ions and their disappearance. This small ion concentration is moreover influenced by migration of ions due to meteorological factors such as convection and eddy diffusion, and also by the electric field (Wilkening, 1974). In some situations it is possible to neglect or to estimate the impact of the latter factors. In these cases electric parameters can more distinctly indicate changes in the concentration of the radioactive pollution of the air and ground surface, or changes in the concentration of condensation nuclei.

Electric parameters react to both types of concentration by a variation in ion concentration, especially in small ions (Bricard, 1965). The increase of exposure dose rate (in other words the rate of ionization of the air \*) increases ion concentration, whereas the increase in the concentration of condensation nuclei has an opposite effect. It is to be expected, therefore, that electric parameters in the atmospheric surface layer could indicate a variation in the radioactive pollution at the ground surface or in the concentration of condensation nuclei, when one of these factors is not significantly changed. The gamma background radiation originates mainly from rocks and soil. It is not, however, constant in time, as the measurements show (Fig. 4, 5, 6). This should be taken into account when an interpretation of the dependence between specific electric parameters and the concentration of condensation nuclei is made. Accordingly, the changes of condensation nuclei density have to be taken into account to monitor the increase in the concentration of radioactive products in a given area with the help of atmospheric electricity indicators. Examples of a simple possibility are situations observed at Świder, when the electric conductivity increased even in spite of moderate increase of the concentration of condensation nuclei.

The concentration of small ions, as well as the resulting values of other electric parameters (Bricard, 1965; Israelson et al., 1975), depend to a great extent on meteorological conditions as it was mentioned.

\*  $1\mu\text{R/h} = 0.58 \text{ ion pairs cm}^{-3}\text{s}^{-1}$



1  
5  
These conditions modify the concentration of condensation nuclei and to some extent they also change the rate of ionization degree of the air in the atmospheric surface layer. They play, therefore, an essential role in the processes leading to the ionization equilibrium and momentary ion concentrations. A local estimation of changes in the state of microaerosol and radioactive pollution by means of electric parameters requires, therefore, an analysis of particular meteorological situations and their specific influences. The role of electric parameters, however, increase<sup>s</sup> with the degree of pollution either by condensation nuclei or radioactive substances.

Problem: C VII-1

Received: December 17, 1975

### References

- Bricard I., 1965, Action of radioactivity and of pollution upon parameters of atmospheric electricity, in: Problems of atmospheric and space electricity, ed. b S. C. Coroniti, Elsevier Publ., Comp., Amsterdam.
- Dziembowska A., Puchalski S., Warzecha S., 1967, Electrical conductivity of the air, Belsk 1967, Materiały i Prace ZG PAN 26, 73-85.
- Gadomski J., 1975, Wpływ produktów rozszczepienia na elementy elektryczności atmosferycznej w Świdrze, Archiwum IGF PAN.
- Israël H., 1957, 1961, Atmosphärische Elektrizität, I, II, Academ. Verlag, Leipzig.
- Israelson S., Oluwafemi C., Ungethum E., 1975, Correlation and spectral studies of electric, radioactive and meteorological parameters under fair weather conditions in the atmospheric surface layer, Raport No. 12 Departm. of Meteorology, University of Uppsala.
- Michnowski S., Nguyen Manh Duc, Dao The Ngu, 1965, The seasonal and short duration variations of fallout at Cha-Pa 1958-1961, Materiały i Prace ZG PAN, 7, 125-134.
- Peńsko J., 1973, Pole ziemskie tła promieniowania gamma w przyziemnej warstwie atmosfery i metody jego badań, Raport IBJ 1473/XIX/D/B.
- Peńsko J., Wardaszko T., Wachna M., 1969, Natural atmospheric radioactivity and its dependence on some geophysical factors, Atompraxis, 14, 255-258.
- Turner A.B., 1974, Radon migration in the ground, in: The natural radiation environment, John A.S. Adams and Wayne Lewder, University of the Chicago Press.
- Wilkening M.H., 1974, Influence of the electric fields of thunderstorms on <sup>222</sup>Rn daughter ion concentration, submitted to Fifth Intern. Conference to Atm. Electr., Garmisch-Partenkirchen.
- Warzecha S., 1973, Électricité Atmosphérique et Météorologie, Observatoire Geophysique de St. Kalinowski a Świder 1971, Publs. Inst. Geoph. Pol. Ac. Sci., 63.



WSTĘPNE WYNIKI POMIARÓW RADIOAKTYWNYCH,  
ATMOSFERYCZNO-ELEKTRYCZNYCH I METEOROLOGICZNYCH  
PROWADZONYCH W OBSERWATORIUM GEOFIZYCZNYM W ŚWIDRZE

Streszczenie

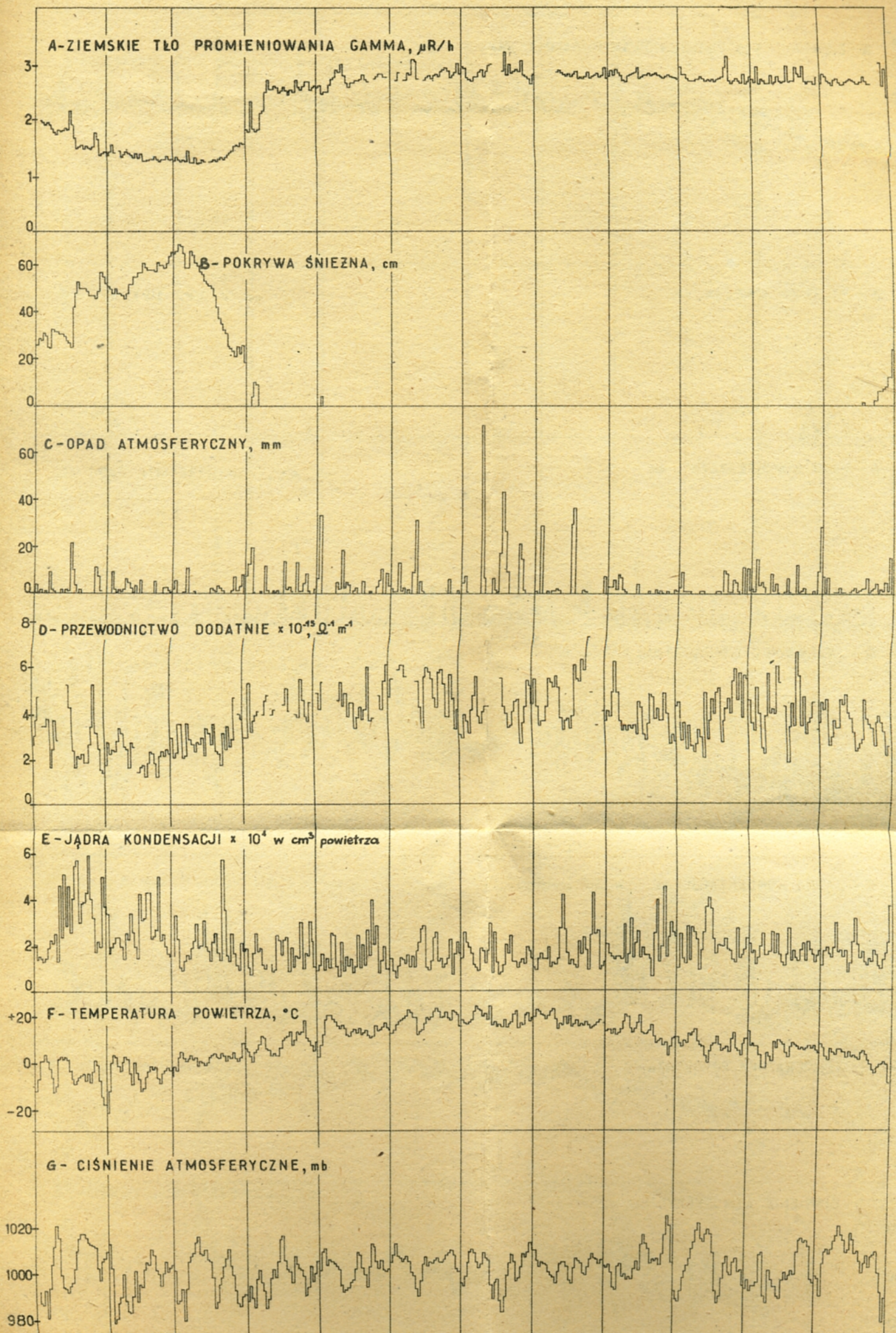
W pracy opisano metody pomiarów ziemskiego tła promieniowania gamma i opadu promieniotwórczego z atmosfery. Podano wyniki tych pomiarów wraz z elementami meteorologicznymi i elektryczno-atmosferycznymi. Pomiary wykonywano w latach 1970-1972 w Obserwatorium Geofizycznym IGF PAN w Świdrze w ramach trójstronnej współpracy pomiędzy Instytutem Geofizyki, Instytutem Badań Jądrowych w Świerku i Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej.

Na podstawie wstępnego rozpatrzenia wyników pomiarowych można stwierdzić, że średnie dzienne tło promieniowania gamma w Świdrze jest prawie stałe w ciągu roku ( $2.7 \mu\text{R/h}$ ), z wyjątkiem okresów silnego deszczu i występowania pokrywy śnieżnej.

W próbkach opadu promieniotwórczego zebranych na przełomie marca i kwietnia 1972 r. zaobserwowano świeże produkty rozszczepienia, pochodzące od eksplozji jądrowej dokonanej w atmosferze w Azji Środkowej na terenie Chińskiej Republiki Ludowej, dnia 19 marca, 1972 r. Wielokrotne podwyższenie opadu promieniotwórczego związane z eksplozją nieznacznie tylko wpłynęło na zmianę tła promieniowania gamma. Podwyższyły się jednak wyraźnie wartości przewodnictwa, pomimo obserwowanych większych niż uprzednio stężeń jąder kondensacji.

Rola elementów elektrycznych (stężeń jonów i przewodnictwa) jako wskaźnika zanieczyszczeń substancjami radioaktywnymi lub jądrami kondensacji może być w pewnych sytuacjach ograniczona. Wynika to ze względu na przeciwny kierunek oddziaływań tych zanieczyszczeń na koncentrację jonów oraz na różnego rodzaju ich modyfikacje meteorologiczne. Elementy elektryczne najczęściej okazują się jednak wrażliwym wskaźnikiem jednego z tych zanieczyszczeń, przy znajomości drugiego lub braku jego zmian.







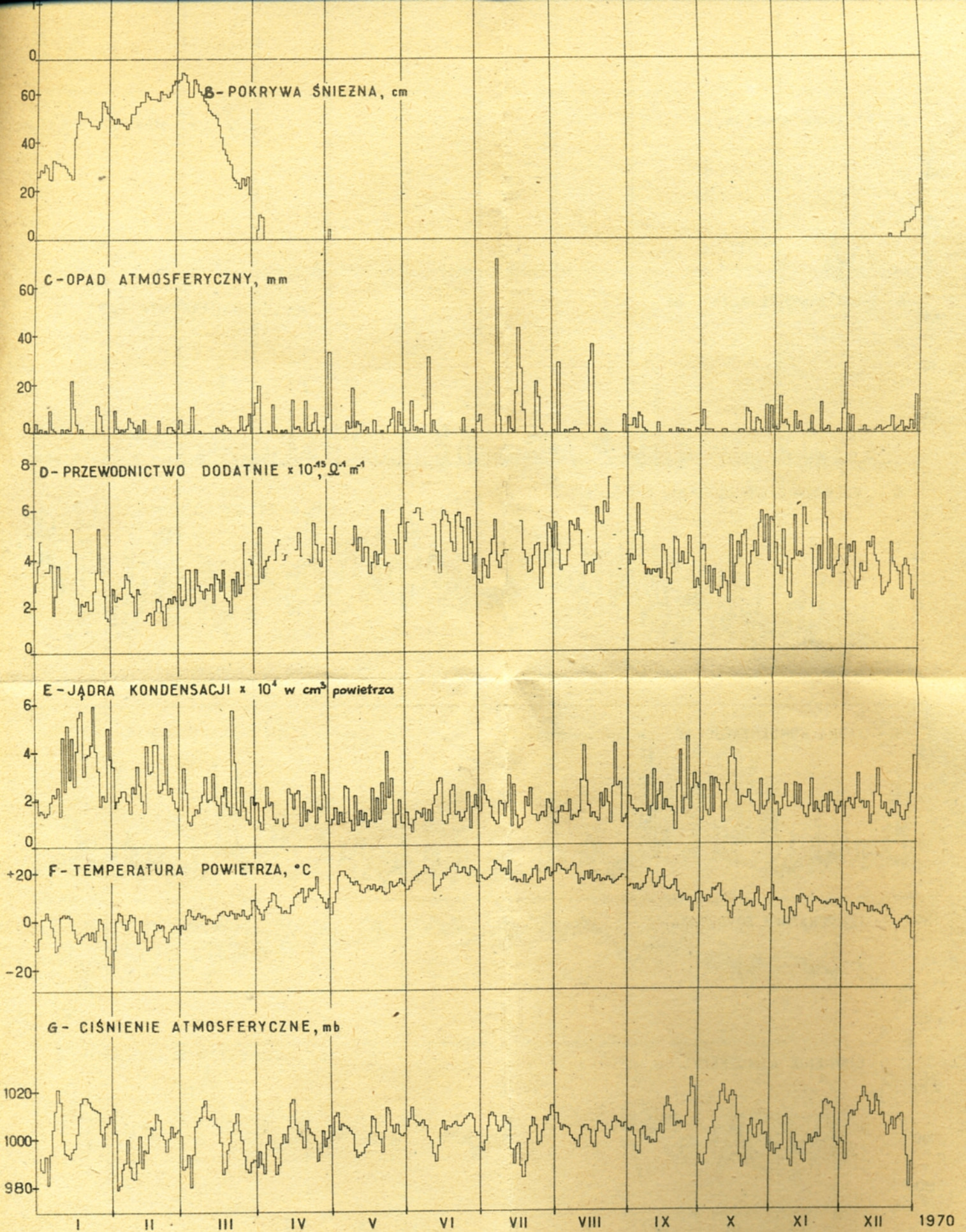
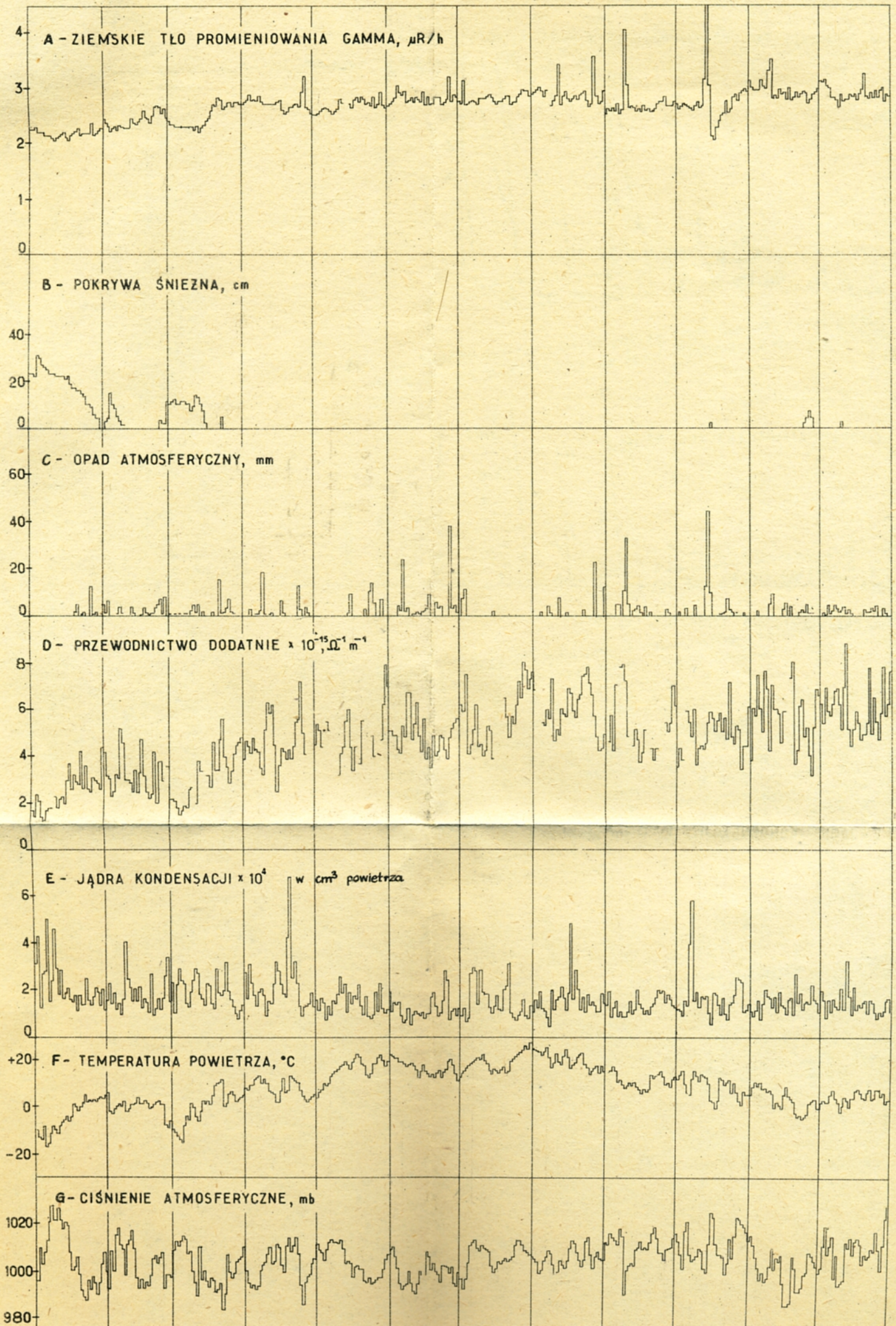


Fig. 4. Measurement results of the exposure dose rate of the gamma background radiation and of the meteorological and electrical parameters in 1970 at the Geophysical Observatory at Świder (A - gamma background radiation, B - snow cover, C - precipitation, D - electrical conductivity ( $\lambda_+$ ), E - condensation nuclei, F - air temperature, G - atmospheric pressure).







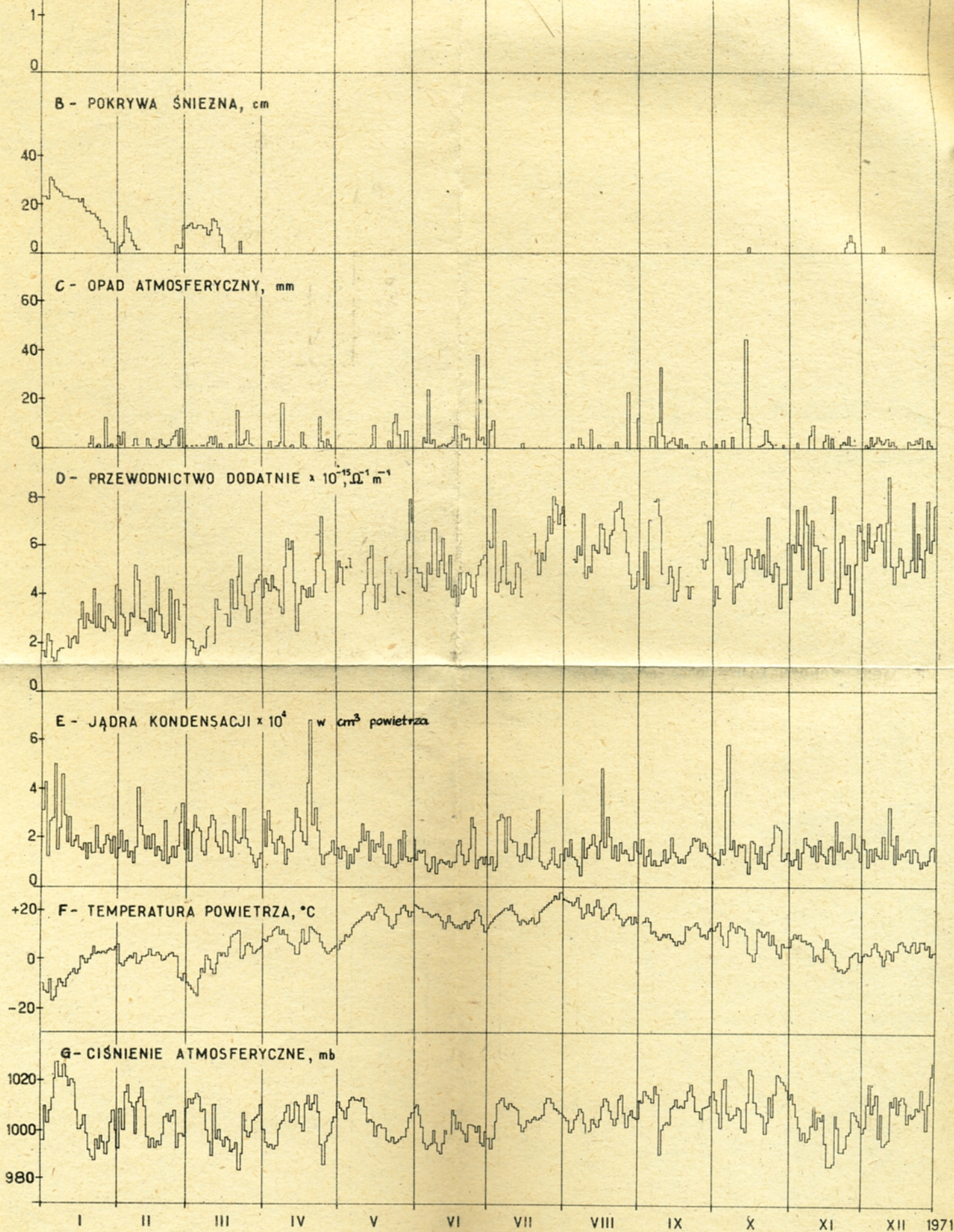
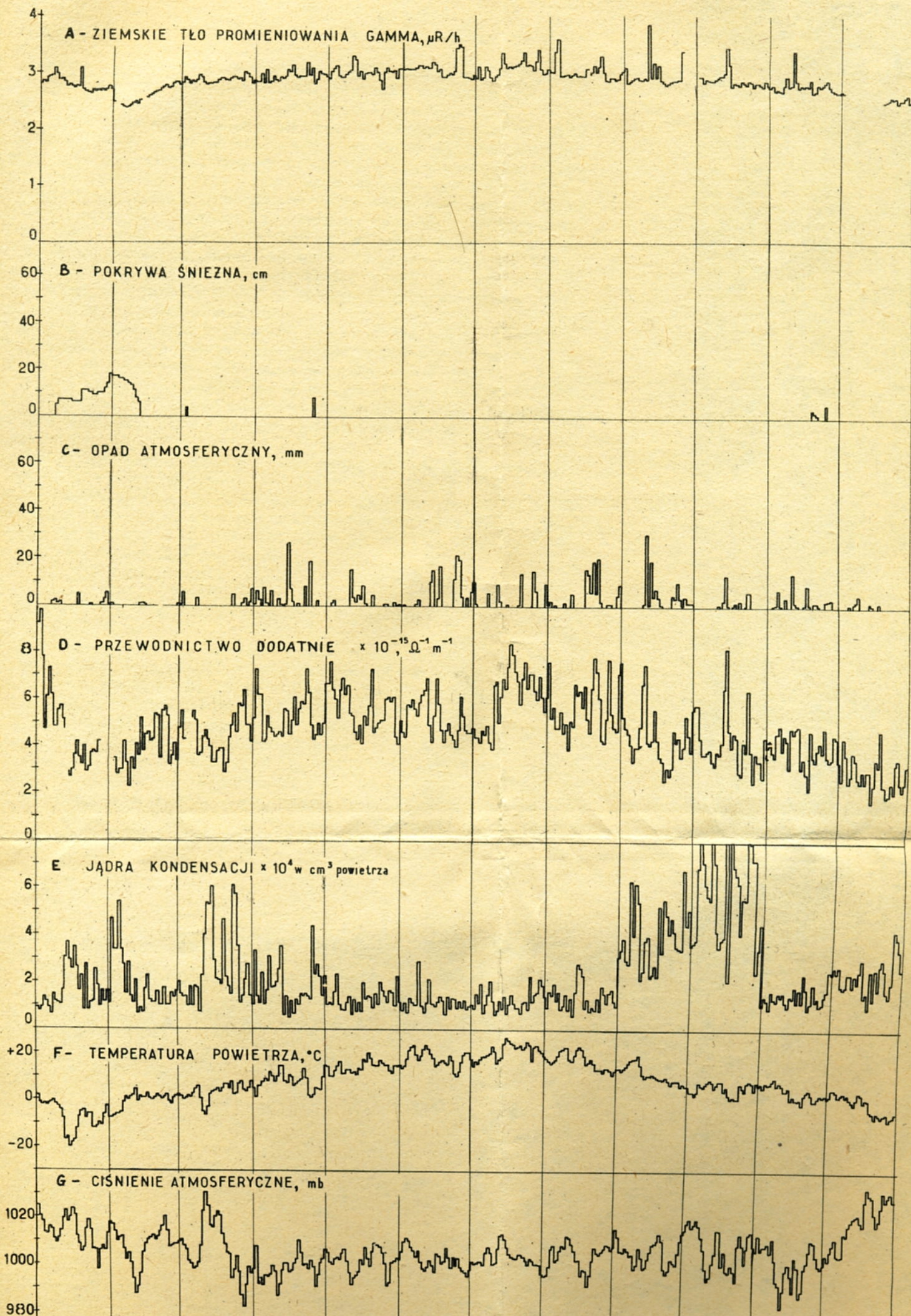


Fig. 5. Measurement results of the exposure dose rate of the gamma background radiation and of the meteorological and electrical parameters in 1971 at the Geophysical Observatory at Świder (explanations as at Fig. 4).







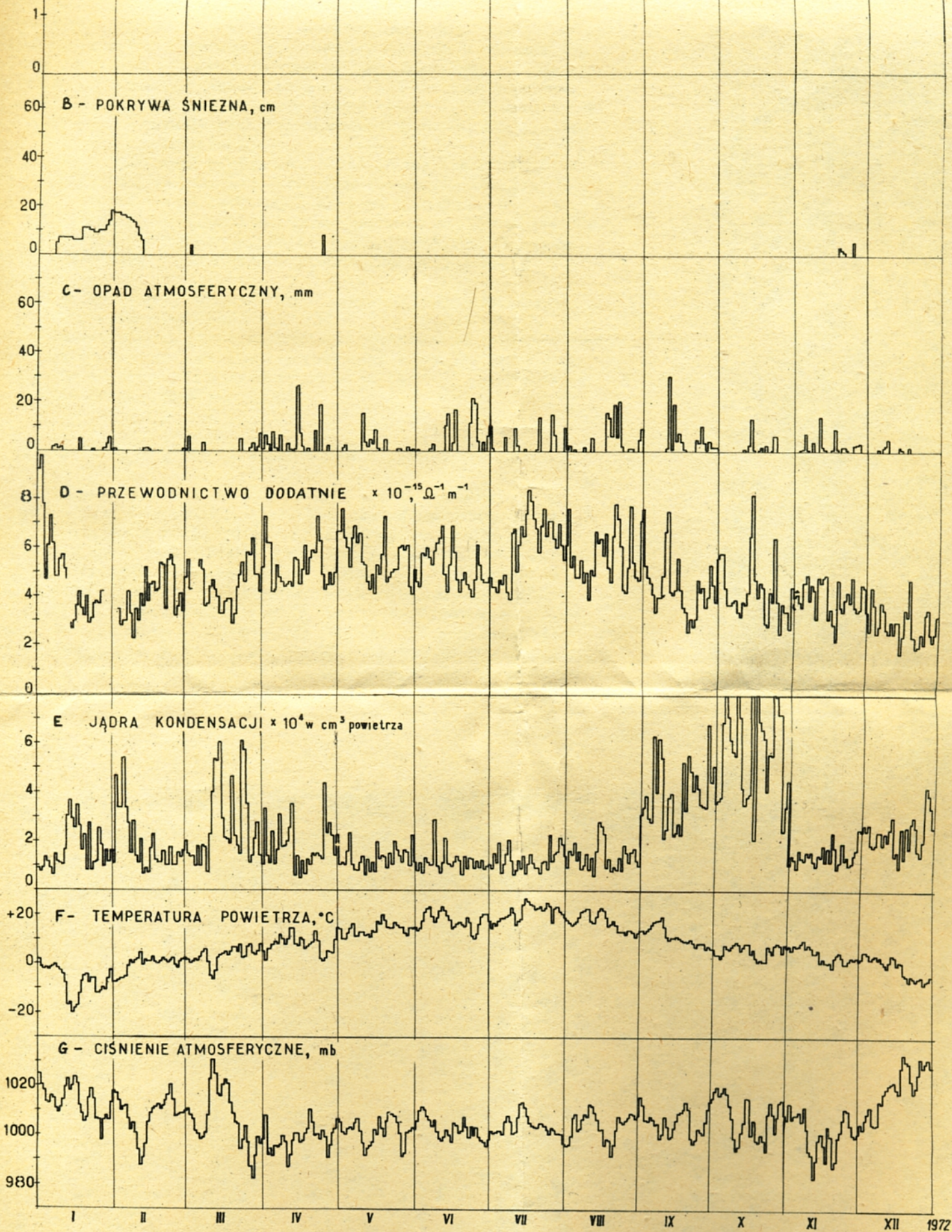


Fig. 6. Measurement results of the exposure dose rate of the gamma background radiation and of the meteorological and electrical parameters in 1972 at the Geophysical Observatory at Świder (explanations as at Fig. 4).



**I KRAJOWE SYMPOZJUM NAUKOWE  
WPŁYW ROZWIĄZAŃ MATERIAŁOWO-KONSTRUKCYJNYCH  
W BUDOWNICTWIE NA ZDROWIE CZŁOWIEKA  
Warszawa, 18-19 listopada 1980**

---

doc. dr Stanisław Michnowski, dr Stanisław Warzecha  
Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk  
Warszawa  
mgr Andrzej Wajdewicz  
Politechnika Warszawska

2.3

**WPŁYW ROZWIĄZAŃ MATERIAŁOWO-KONSTRUKCYJNYCH  
NA JONIZACJĘ POWIETRZA  
POMIESZCZEŃ MIESZKALNYCH**

**JONIZACJA POWIETRZA JAKO CZYNNIK MIKROŚRODOWISKA  
POMIESZCZEŃ MIESZKALNYCH**

Powietrze, zarówno na zewnątrz jak i wewnątrz budynków, podlega procesowi jonizacji polegającemu na wyrwaniu elektronu lub elektronów z atomów cząstek powietrza na koszt energii różnych czynników jonizujących, głównie promieniowania substancji radioaktywnych i promieniowania kosmicznego.

W wyniku procesu jonizacji w powietrzu występują naładowane elektrycznie dodatnie i ujemne cząstki, które nazywamy jonami atmosferycznymi. Pewna ich ilość znajduje się zawsze w każdym środowisku człowieka, a więc zarówno w powietrzu zanieczyszczonym jak i w powietrzu czystym.

Jony, ze względu na ich ruchliwość, dzielimy na szereg grup wielkości. Dotychczas najczęściej przyjmowano trzy zakresy wielkości jonów, a mianowicie jony lekkie, średnie i ciężkie, mimo pewnej arbitralności tego podziału nie oddającego całego spektrum wielkości spotykanych jonów. Spektrum to kształtowane jest przez rozkład wielkości cząstek aerozolu, która po otrzymaniu ładunku elektrycznego stanowią jony o różnej wielkości. Ilość jonów, ich znak i wymiary /ruchliwość/ określają etan zjonizowania powietrza, który skrótowo nazywany bywa jonizacją powietrza.

Prowadzone od wielu lat badania wykazują, że jony zawarte w powietrzu oddziałują na organizmy żywe, głównie zaś na pracę układu oddechowego. Ich szkodliwe biologiczne działanie często związane jest z towarzyszącym temu zjawisku nieodpowiednim składem chemicznym powietrza.

Stan zjonizowania powietrza w mikrośrodkowisku mieszkań może być z jednej strony modyfikowany przez zmiany natężenia i rodzaju źródeł jonizujących, z drugiej strony przez zmiany składu zanieczyszczeń aerozolowych i gazowych, wprowadzonych do mieszkań w wyniku zastosowania materiałów, wyposażenia i sposobu ich użytkowania.

W związku z tym stan zjonizowania powietrza w mieszkaniach może odbiegać znacznie od stanu jaki występuje w naturalnych, mało zanieczyszczonych środowiskach atmosferycznych. Przy wprowadzaniu nowych technik i technologii budowlanych staje się konieczne prowadzenie kontroli stanu zjonizowania powietrza będącego istotnym elementem jakości powietrza w mikrośrodkowisku otrzymywanych wewnątrz.

#### PROCESY POWSTAWANIA JONÓW ORAZ FIZYKO-CHEMICZNYCH ZMIAN JAKOŚCI POWIETRZA CZYSTEGO I ZANIECZYSZCZONEGO

Powstawaniu jonów daje początek wspomniany fizyczny akt jonizacji. W wyniku wyrwania elektronu powstałe dodatnie reszty atomów i wolne elektrony nie mogą istnieć swobodnie w gęstej mieszaninie gazów, par i cząstek aerozolu jaką jest powietrze. Przyłączają się one bardzo szybko do najczęściej zderzających się z nimi obojętnych molekuł lub atomów gazowych powietrza. Te molekularne czy atomowe jony obu znaków nie są jeszcze stabilne i wiążą się z pewną ilością neutralnych molekuł, tworząc dodatnie i ujemne jony lekkie.

W czystym powietrzu standardowym, składającym się w odpowiednich proporcjach z  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$  i pary wodnej mogą istnieć w równowadze jony lekkie dodatnie w postaci  $H_3O^+$  / $H_2O/n$ . Grupa  $H_3O^+$  aglomeruje się przy zderzeniach z molekułami pary wodnej, tworząc dopiero wtedy stabilny dodatni jon lekki.

W standardowym powietrzu mogą zachodzić również procesy tworzenia się lekkich jonów ujemnych typu  $O_2^-$  / $H_2O/n$ . Przypuszcza się, że tego rodzaju jony lekkie mogą wywierać ożywcze działanie na organizm.

Rzeczywiste powietrze zawiera oprócz uwzględnionych powyżej składników również substancje śladowe, takie jak:  $NH_3$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $HNO_3$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ , różne nasycone i nienasycone węglowodory,  $H_2S$ ,  $SO_2$ ,  $O_3$ ,  $I_2$ ,  $Cl_2$ ,  $HCl$ ,  $OH$ ,  $O$  itp. Koncentracje tych substancji wynoszą od paru cząsteczek na milion do paru na trylion cząsteczek powietrza i zależą od wielu czynników środowiskowych. Każde zderzenie dodatniego lub ujemnego jonu z jednym atomem lub molekułą substancji śladowych może wywołać reakcje jonowo-molekularne, które zmieniają naturę chemiczną i fizyczną pierwotnego jonu. W ten sposób powstałe jony lekkie, dodatnie i ujemne są wychwytywane przez cząstki aerozolu, przechodząc w mniej ruchliwe jony ciężkie.

Zanieczyszczenia gazowe, takie jak  $NO_2$ ,  $SO_2$ , węglowodory, wcześniej czy później przechodzą również innymi drogami w submikronowe cząstki wtórnego aerozolu, tworząc zazwyczaj bardziej toksyczne cząstki niż składniki, z których powstają [8], np. drogą różnego rodzaju nukleizacji, kondensacji itp. Wzrost wielkości cząstek aerozolu następuje również przez koagulację, tj. łączenie się cząstek przy zderzeniach, prowadząc do przesuwania się

rozkładu masy w stronę większych cząstek i do wyrównywania się przy tym ich składu chemicznego.

Stan zjonizowania powietrza w pomieszczeniach mieszkalnych jest w zasadniczym stopniu uzależniony od stanu zjonizowania i od zanieczyszczeń powietrza zewnętrznego przenikającego do mieszkań. W mieszkaniach stan ten jest tylko modyfikowany przez powstawanie w nich jonów, cząstek wtórnego aerozolu oraz dalsze procesy fizyko-chemiczne.

Jakość powietrza zewnętrznego narzucona jest lokalizacją budynku w stosunku do źródeł zanieczyszczeń powietrza, sytuacją meteorologiczną, topograficzną itp. Potwierdza to bardzo ważny postulat dotyczący odpowiedniego oddalenia budynków mieszkalnych od groźnych źródeł zanieczyszczeń, zarówno aerozolowych i gazowych jak i pyłów.

Dla porównania w tabl. 1 podano średnie wartości stężeń jonów i całkowitej koncentracji aerozolu dla centrum Warszawy /hotel Forum/, jej peryferii /ul. Wałbrzyska/ i mało zanieczyszczonego terenu Obserwatorium Geofizycznego w Świdrze. Przedstawione wartości świadczą o tym, że poziom koncentracji naładowanego aerozolu i wszystkich jego cząstek jest wielokrotnie większy w pobliżu silnych źródeł emisji /duży ruch samochodowy w centrum/ niż w powietrzu odległym od źródeł emisji polutantów.

Tablica 1. Porównanie średnich wartości stężeń jonów i całkowitej koncentracji aerozolu / $cm^{-3}$ / dla centrum Warszawy /hotel Forum/, jej peryferii /ul. Wałbrzyska/ i mało zanieczyszczonego terenu Obserwatorium Geofizycznego w Świdrze

Rodzaje jonów	Stężenie jonów i koncentracja aerozolu, $cm^{-3}$		
	przy hotelu Forum	przy ul. Wałbrzyskiej	na terenie Obserwatorium w Świdrze
Jony lekkie dodatnie	168	136	200
Jony lekkie ujemne	90	84	170
Jony średnie dodatnie	14 500	4 580	2 100
Jony średnie ujemne	10 800	5 870	1 900
Jony ciężkie dodatnie	10 500	5 660	3 400
Jony ciężkie ujemne	4 700	6 460	3 200
Jądra kondensacji	113 700	60 800	17 200

#### POMIARY I WYNIKI POMIARÓW KONCENTRACJI JONÓW I AERAZOLI W POMIESZCZENIACH MIESZKALNYCH NOWEGO BUDOWNICTWA

Na stan zjonizowania powietrza w mikrośrodkowisku mieszkań wpływa również wiele czynników działających wewnątrz mieszkań, takich jak materiały i właściwości techniczne przegród, materiały wykończeniowe i wyposażenie mieszkań, urządzenia techniczne mieszkań. W celu orientacyjnego wydzielenia tych wpływów wykonano kilka serii pomiarów jesienią, zimą i latem wewnątrz zamkniętych mieszkań i na zewnątrz pomieszczeń, w nowych 10-piętrowych blokach o ścianach z płyt betonowych. Przed pomiarami badana niezasiedlona



Jeśli mieszkania nie były przewietrzane ani odwiedzane przez okres co najmniej doby. Okna i drzwi nie posiadały hermetycznych uszczelnień. Do badań wybrano pomieszczenia z różnymi wykładzinami podłogowymi i ściennymi z tworzyw sztucznych. Dla porównania zbadano kilka mieszkań zasiedlonych oraz jedno mieszkanie z tradycyjnym wyposażeniem - bez tworzyw sztucznych.

Zakres pomiarów obejmował oznaczenie stężeń jonów i wszystkich cząstek aerozolu oraz pomiary pól elektrycznych panujących w obszarze pobierania próbek badanego powietrza. Koncentracje jonów mierzono w trzech zakresach:

- a/ jony lekkie  $n$  obu biegunowości - w przedziale ruchliwości większej lub równej  $0,5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,
- b/ jony średnie  $Ns$  obu biegunowości - w przedziale ruchliwości od  $0,001$  do  $0,5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,
- c/ jony ciężkie  $Nc$  obu biegunowości - w przedziałach ruchliwości od  $0,00025$  do  $0,001 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ . Stężenia mierzonych cząstek aerozolu, które są znane również pod nazwą jąder kondensacji, odpowiadają cząstkom naładowanym i nienaładowanym o rozmiarach  $5 \cdot 10^{-9}$  do  $10^{-5} \text{ m}$ .

Dane techniczne przyrządów pomiarowych, opisy wykonanych pomiarów i pełne zestawienie wyników i ich omówienie podane są we wcześniejszych opracowaniach [4]. Część wyników przedstawiono przykładowo na rysunku oraz tabl.1-3.

#### OMÓWIENIE WYNIKÓW I PRÓBA ICH DYSKUSJI ILOŚCIOWEJ

Oszacowanie stanu zjonizowania powietrza w pomieszczeniach badanych, w zależności od stanu zjonizowania powietrza zewnętrznego i oddziaływania nań parametrów działających wewnątrz mieszkań, wymaga przeprowadzenia analizy powstania i zaniku poszczególnych rodzajów jonów w badanej próbce powietrza.

Równowaga jonizacyjna i natężenie dodatkowych źródeł jonizacji w nowych budynkach

Zmiany koncentracji jonów w poszczególnych zakresach ich wielkości mogą być określone na podstawie różnicy między liczbą jonów wytwarzanych w danym obszarze i do niego wlatujących a liczbą jonów zanikających w tym obszarze i z niego wylatujących. Przy odpowiednich założeniach możemy w pewnym przybliżeniu opisać ilościowo zmiany koncentracji jonów lekkich w funkcji ich rozkładu ponad rozległą podłogę za pomocą równań równowagi jonizacyjnej.

Nie wchodząc bliżej w wyznaczenie i analizę równań równowagi jonizacyjnej dla wszystkich wyodrębnionych składników, można powiedzieć, że natężenie jonizacji /stopień tworzenia się jonów lekkich/ określony jest nie tylko koncentracją jonów lekkich  $n$ , lecz również stopniem naelektryzowania aerozolu tj. stosunkiem ilości cząstek naładowanych do wszystkich cząstek aerozolu. Istotny jest tu rozkład co do wielkości cząstek aerozolu, dla którego poszczególnych frakcji współczynniki wychwyty różnią się znacznie [1].

Prawie we wszystkich seriach pomiarowych w mieszkaniach koncentracje jonów lekkich okazują się znacznie większe w stosunku do koncentracji tego ro-

dzażu jonów w powietrzu otaczającym budynek. Tak np. w mieszkaniach z tradycyjnymi wykładzinami na 10 piętrze, przy zbliżonym poziomie koncentracji wszystkich cząstek aerozolu wynoszącym ok.  $40\,000 \text{ cm}^{-3}$ , koncentracje jonów lekkich dodatnich wynosiła  $680 \text{ cm}^{-3}$ , a na zewnątrz pokoju na otwartym balkonie  $290 \text{ cm}^{-3}$ , zaś jonów lekkich ujemnych w mieszkaniu  $560 \text{ cm}^{-3}$ , podczas gdy na zewnątrz  $160 \text{ cm}^{-3}$ . Stałe podwyższenie średnich koncentracji jonów lekkich wewnątrz pomieszczeń badanych, zwłaszcza przy jednoczesnym wzroście stężeń jąder kondensacji, wskazuje na występowanie wewnątrz budynku dodatkowych źródeł jonizacji. Przemawia również za tym fakt równoczesnego podwyższenia mierzonych koncentracji jonów średnich i ciężkich.

Dodatkowe pomiary laboratoryjne koncentracji jonów, wykonane przy pocieraniu wykładzin, wykazały, że przy elektryzowaniu badanych wykładzin podłogowych koncentracje jonów lekkich przeważnie znacznie malały. Ilustruje to przykładowo tabl.2. Stwierdzono jednocześnie znaczne podwyższenie koncentracji  $Ns$  i  $Nc$ . Pocierania wykładzin podłogowych bezpośrednio w mieszkaniu przez podeszwy butów dawały ten sam efekt, nie przyczyniając się do wzrostu produkcji jonów lekkich.

Tablica 2. Zestawienie wyników laboratoryjnych pomiarów stężeń jonów  $/\text{cm}^{-3}/$  nad wykładziną podłogową "Teppich Boden" elektryzowaną przez pocieranie, bez pocierania i bez wykładziny

Rodzaje jonów	Stężenie jonów, $\text{cm}^{-3}$		
	przy pocieraniu wykładziny	bez pocierania wykładziny	bez wykładziny
Jony lekkie dodatnie	46	37	167
Jony lekkie ujemne	41	144	158
Jony średnie dodatnie	4 360	4 200	2 490
Jony średnie ujemne	3 350	3 800	2 800
Jony ciężkie dodatnie	1 610	1 770	2 530
Jony ciężkie ujemne	1 990	1 840	2 540

Poszukując przyczyn tego wzrostu wykonano orientacyjny pomiar tła promieniowania gamma i pomiar koncentracji radonu w typowym pomieszczeniu mieszkalnym. Wyznaczone koncentracje tego radioaktywnego gazu wynosiły ok.  $2300 \text{ pCi}/\text{m}^3$ , co powoduje tworzenie się 34 par jonów w ciągu 1 sekundy w objętości  $1 \text{ cm}^3$ , to jest 34 J. Wartość ta jest około dziesięciokrotnie większa w stosunku do przeciętnej wartości w przyziemnej atmosferze. Wykluczając możliwość wystąpienia tak znacznego podwyższenia koncentracji radonu przez gaz świetlny [4] można wnioskować, iż głównym źródłem podwyższonej jonizacji powietrza w badanych nowych niezasiedlonych mieszkaniach są materiały budowlane najprawdopodobniej żelazo-betonowe przegrody, z których ekshaluje się radon.

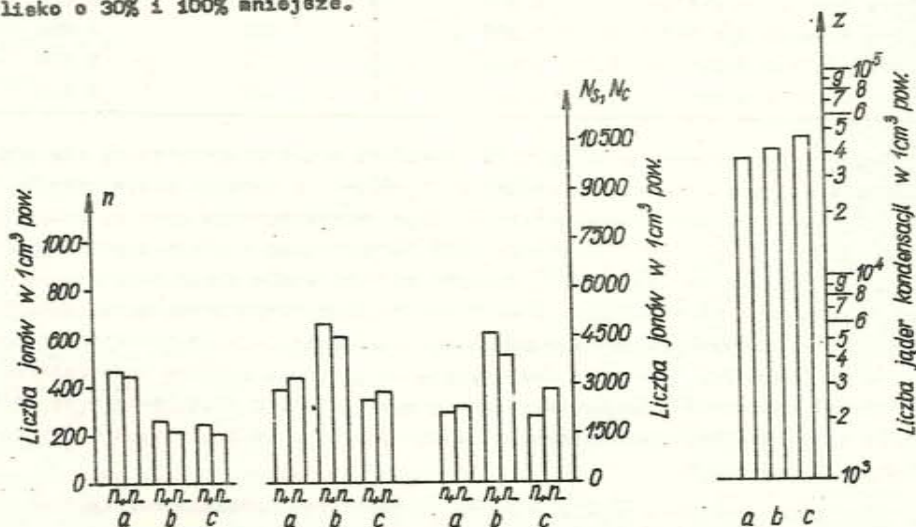
Zagrożenie wywołane oddziaływaniem biologicznym promieniowania jonizującego ścian oraz radonu i jego pochodnych w powietrzu mieszkań jest przedmiotem oddzielnych opracowań [5]. Na ich podstawie można podesć, iż mierzony



Wzrost dawki radonu wynosi ponad 6600 mrem/rok, co przy długotrwałym przebywaniu w mieszkaniu i przy braku wentylacji przynosi około dziesięciokrotne zwiększenie zachorowalności na raka płuc w porównaniu do zachorowań od dawek naturalnego tła.

Szacując natężenie jonizacji powietrza pochodzącej od promieniowania radioaktywnego ścian na 15  $\mu\text{R/h}$  i ok. 9 J i przyjmując stopień jonizacji powietrza wywołany promieniowaniem kosmicznym równy 2 J otrzymujemy łącznie z udziałem radonu, całkowitą wartość równą 45 J. Tymczasem, natężenie jonizacji, obliczone na podstawie równania równowagi jonizacji i przyjętych z obliczeń współczynników, daje wartości około dwa razy większe dla większych mieszkań z podłogami z tworzyw sztucznych. Świadczyć to może o dodatkowym zwiększeniu stanu jonizowania powietrza w mieszkaniach z tymi wykładzinami na skutek produkcji jonów średnich i ciężkich. Sprawa ta jest bardzo ważna, gdyż można się spodziewać tego, iż w skład wytwarzanych przez pocieranie jonów i obojętnych cząsteczek aerozolu mogą wchodzić monomery, tj. substraty używane do produkcji tworzyw sztucznych, jak również małe lotne składniki substancji pomocniczych używanych do produkcji tworzyw [6]. Większość tych substancji pochodzących z używanych tworzyw może mieć działanie toksyczne lub alergiczne. Część z nich, np. chlorek winylu, podejrzany jest o działanie nowotworowe [6].

Na rysunku przedstawiono przykłady stanu zjonizowania powietrza w mieszkaniu niezamieszkanym z wykładzinami tradycyjnymi gdzie koncentracje jonów lekkich dodatnich i koncentracje jonów ujemnych wynosiły ponad  $400 \text{ cm}^{-3}$ . Są one zatem znacznie większe od odpowiednich koncentracji w mieszkaniu z wykładzinami sztucznymi, natomiast koncentracje jonów średnich i ciężkich odwrotnie - blisko o 30% i 100% mniejsze.



Histogramy stanu zjonizowania powietrza w Warszawie w mieszkaniu z wykładzinami tradycyjnymi: a/ z wykładzinami podłogowymi z tworzyw sztucznych; b/ na zewnętrz budynku; c/ /XI.1975/

Stan zjonizowania powietrza jako wskaźnik jego zanieczyszczeń aerozolowych

Stan zjonizowania powietrza określony przez koncentrację naładowanych cząstek aerozolu w całym spektrum ich wielkości daje możliwość wyznaczenia spektralnego rozkładu koncentracji również i cząstek nienaładowanych. Stosunek koncentracji wszystkich cząstek aerozolu w ich przedziale wielkości do koncentracji odpowiadających im wielkościom mierzonych jonów, wyznaczony na podstawie obliczeń teoretycznych lub badań eksperymentalnych, nie jest wartością stałą, lecz maleje wraz z rosnącą wielkością cząstek [2]. Przyjmując ten stosunek można obliczyć odpowiednio dla poszczególnych grup jonów koncentracje cząstek nienaładowanych. Tym samym możemy również wyznaczyć nie tylko sumaryczny ładunek niesiony przez wszystkie cząstki aerozolu, lecz i oszacować ich całkowite koncentracje.

W naszym przypadku próba orientacyjnego obliczenia potwierdziła to, iż w powietrzu badanych mieszkań liczby cząstek aerozolu gwałtownie rosną dla cząstek o coraz to mniejszej ich wielkości. Można oczekiwać, że w przedziale cząstek odpowiadających wielkościom jonów średnich występuje maksimum koncentracji cząstek. W mieszkaniach należy się zatem liczyć z występowaniem drugiego, znacznie niższego maksimum koncentracji w zakresie dużych cząstek, tj. większych niż  $0,3 \mu\text{m}$ .

W różnych sytuacjach mogą się różnić toksycznością poszczególne frakcje wielkości cząstek aerozolu. W zakresie najmniejszych cząstek, obok toksycznego aerozolu wtórnego, występującego w mieszkaniach przy przewietrzaniu powietrzem zewnętrznym zwłaszcza wielkomiejskim, mogą występować w tym przedziale najliczniej reprezentowane cząstki z atomami izotopowych produktów rozpadu radonu oraz również - groźne dla zdrowia - cząstki biologicznego aerozolu w postaci wirusów i niektórych bakterii. W połączeniu z głębokim wniknięciem do płuc cząstek submikronowych, stanowi to może szczególne zagrożenie dla zdrowia. Z drugiej strony, biorąc pod uwagę masę cząstek aerozolu większych niż  $1 \mu\text{m}$  i ich osiadanie w górnych drogach oddychawczych, można również oczekiwać groźnego oddziaływania na zdrowie cząstek dużych, zwłaszcza w przypadku ich szkodliwego składu chemicznego, o działaniu toksycznym czy alergicznym. Dla cząstek większych niż  $1 \mu\text{m}$  zaliczanych do pyłów, istnieją przepisy, które uznają stężenie powyżej  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  za niedopuszczalne w miejscach długiego przebywania człowieka. W naszym przypadku oszacowana liczba cząstek o wymiarach  $1-10 \mu\text{m}$  daje znacznie mniejsze wartości od dopuszczalnych.

Rozkład przestrzenny koncentracji jonów i aerozolu w pomieszczeniach mieszkalnych

Pomiary stanu zjonizowania powietrza wykonywane w różnych wysokościach nad podłogą, nawet nienaładowaną, wykazują występowanie różnic w wartościach koncentracji poszczególnych składników, zwłaszcza w obecności pół



elektrycznych; od silnie naelektryzowanych wykładzin podłogowych. Pod wpływem pól elektrycznych jony przemieszczają się w kierunku pola z szybkością proporcjonalną do jego natężenia. Tak np. w polu o natężeniu 1000 V/m jony lekkie będą się przesuwały z prędkością ok. 15 m/s, ciężkie - 1 m/s do 0,01 cm/s.

W wyniku tego zjawiska, przy niejednorodnych polach elektrycznych, siły elektryczne mogą wywierać znaczny wpływ na rozkład naładowanych cząstek aerozolu w mieszkaniach oraz pewien niewielki wpływ na rozkład nienaładowanych polaryzujących się cząstek aerozolu. Z drugiej strony w wyniku przeciwnie oddziałujących innych procesów może ustalić się pewien stan zbliżony do równowagi, który przejawia się w danym rozkładzie przestrzennym koncentracji jonów i aerozoli, trudnym do określenia na drodze przeliczeń teoretycznych.

W polach elektrycznych rzędu kilkuset V/m ruchy naładowanych cząstek aerozolu są niewielkie w porównaniu z ruchem powietrza, wywołanym innymi przyczynami występującymi w pomieszczeniach zamkniętych. Zachodzące ruchy cząstek, natury konwekcyjnej lub z powodu wymiany powietrza z powietrzem zewnętrznym przez nieszczelności, charakteryzują się przeciętną prędkością przepływu rzędu 10 cm/s. Wskutek takich prędkości, efekty sił elektrycznych w przemieszczeniu się aerozolu mogą zachodzić wyraźnie dopiero przy silnych polach rzędu dziesiątek tysięcy V/m. Przy takich polach jony ciężkie i ultraciężkie, naładowane cząstki aerozolu znaku przeciwnego do ładunku powierzchni naelektryzowanej, mogą się skupiać w jej pobliżu tworząc warstwę ładunku przestrzennego. W wyniku przeciwnie oddziałujących różnych procesów może ustalić się pewien stan zbliżony do równowagi, który przejawia się w nierównomiernym rozkładzie przestrzennym koncentracji jonów i nienaładowanych cząstek aerozolu, trudnym do określenia na drodze obliczeń.

Pomiary potwierdzają to przypuszczenie, wykazując np. tuż nad podłogą  $2970 \text{ cm}^{-3}$  jonów ciężkich, zaś na wysokości 120 cm -  $2280 \text{ cm}^{-3}$ .

Podobnych efektów redystrybucji i niesymetrii biegunowości w rozkładzie jonów można się spodziewać w mniejszej skali wokół głowy człowieka pod wpływem jego naelektryzowania od wykładzin podłogowych.

#### Z m i a n y s t a n u j o n i z a c j i w p o m i e s z c z e - n i a c h m i e z k a l n y c h

Badania przeprowadzone w niezamieszanych pomieszczeniach zamkniętych wykazały zmiany stanu zjonizowania powietrza pod wpływem różnych warunków i procesów.

#### A. Wpływ pór roku na stan zjonizowania powietrza

Wyniki pomiarów w tych samych mieszkaniach niezamieszanych wykazują przy większej wilgotności w lecie większe koncentracje jonów lekkich, natomiast znacznie mniejsze stężenie jonów średnich, ciężkich i wszystkich cząstek aerozolu.

Stopień naelektryzowania aerozolu zimą jest znacznie większy niż latem; potwierdza to, że przeciętna średnica cząstki aerozolu jest większa zimą.

#### B. Wpływ koagulacji i sedymentacji na stan zjonizowania powietrza

Procesy koagulacji i sedymentacji odgrywają istotną rolę w mikrośrodku mieszkań przez swoje działanie oczyszczające powietrze. Koagulacja prowadzi do tworzenia się dużych cząstek o wymiarach mikronowych co jest warunkiem działania sedymentacji grawitacyjnej. Natomiast przy obecności silnych pól elektrycznych usuwanie cząstek aerozolu do powierzchni naładowanych następuje silniej dla mniejszych cząstek naładowanych. Stąd oczyszczenie powietrza na drodze elektrycznej może być skuteczniejsze /szybsze/ od sedymentacji grawitacyjnej, zależąc przy tym bardzo istotnie od stanu zjonizowania powietrza i od znaku naładowanych cząstek aerozolu. Nad silnie naelektryzowaną podłogą mogą się np. unosić bardzo duże cząstki aerozolu o znaku przeciwnym niż podłoga, które w przypadku sedymentacji tylko grawitacyjnej byłyby od dawna usunięte. Sedymentacja elektryczna może powodować, iż toksyczne małe cząstki o znaku przeciwnym w stosunku do ładunku wykładziny zmniejszają swoje koncentracje po napływie świeżego powietrza.

#### C. Wpływ eksploatacji niektórych urządzeń w mieszkaniach zamieszanych

Porównanie stanu zjonizowania powietrza, tych samych niezamieszanych mieszkań w czasie lata i w czasie zimy, kiedy system ogrzewczy nie działał i kiedy był on włączony; potwierdza zwiększenie się koncentracji jonów ciężkich zimą, co przypisywać można działaniu tego systemu. Podobnie, stwierdzono również wpływ użycia kuchenki gazowej na stan zjonizowania powietrza. Gaz świetlny z domieszką gazu naturalnego może wprowadzić trochę radonu, a spalając się, produkować zwiększone ilości jonów i cząstek aerozolu, jako produktów przemian przy spalaniu węglowodorów. W czasie palenia się gazu stwierdzono: jonów lekkich o ok. 30% mniej, średnich o 30% więcej, ciężkich zaś o ok. 250% więcej - niż w mieszkaniu niezamieszonym bez palenia gazu.

Biorąc pod uwagę znaczne podwyższenie koncentracji jonów i aerozolu nienaładowanego, wytwarzanego podczas palenia się gazu świetlnego, oraz jego szkodliwych domieszek - należy rozważyć sprawę wprowadzenia okapów i dodatkowych wyciągów nad kuchenkami gazowymi w mieszkaniach.

#### D. Wpływ wentylacji na stan zjonizowania powietrza w pomieszczeniach mieszkalnych

Dane zawarte w tabl.3 ilustrują wpływ, jaki wywiera działalność przewietrzania mieszkań. Po 3-minutowym uchyleniu okna koncentracja jonów lekkich dodatnich zmniejszyła się z 317 do  $246 \text{ cm}^{-3}$ , zaś po 5-minutowym otwarciu okna do  $104 \text{ cm}^{-3}$ . Charakterystyczny jest przy tym wyraźny wzrost stężeń jąder kondensacji.

Zmniejszenie się liczby jonów lekkich świadczy o tym, iż przewietrzanie pomieszczenia mieszkalnego może znacznie zmniejszyć stężenie radonu i jego po-



cnodnych. Ma to bardzo istotne znaczenie dla zmniejszenia zagrożenia zdrowia mieszkańców w budynkach o dużej radioaktywności przegród.

Tablica 3. Wyniki pomiarów koncentracji jonów lekkich  $n$  i jąderek kondensacji  $N / \text{cm}^{-3}$  w mieszkaniu przed przewietrzeniem i w czasie przewietrzenia po otwarciu okna

Warunki pomiaru	Godziny pomiaru	Stężenie jonów i jąderek kondensacji $\text{cm}^{-3}$		
		$n_+$	$n_-$	$N$
Pokój zamknięty	11 <sup>20</sup> - 11 <sup>32</sup>	326	268	31 270
	11 <sup>33</sup> - 11 <sup>43</sup>			
	11 <sup>49</sup> - 11 <sup>57</sup>			
Okno uchylone	12 <sup>04</sup> - 12 <sup>09</sup>	246	94	38 410
	12 <sup>09</sup> - 12 <sup>18</sup>	146		
	12 <sup>18</sup> - 12 <sup>23</sup>	104		
	12 <sup>24</sup> - 12 <sup>30</sup>			
	12 <sup>23</sup> - 12 <sup>28</sup>			

POTRZEBY BADAŃ JONIZACJI POWIETRZA W NOWYCH BUDYNKACH ORAZ WSTĘPNE UWAGI I WNIOSKI DOTYCZĄCE ROZWIĄZAŃ MATERIAŁOWO-KONSTRUKCYJNYCH

Jonizacja powietrza jest ważnym składnikiem mikrośrodowiska mieszkań, która może świadczyć z jednej strony o działających w nich źródłach jonizujących, z drugiej strony o właściwościach powietrza, zwłaszcza jego zanieczyszczeniach aerozolowych. Ocena biologicznego oddziaływania stanu zjonizowania powietrza dotychczas nie ma wystarczająco opracowanych podstaw do określenia wartości normatywnych. Ten powszechnie znany stan rzeczy zmusza do postulowania potrzeb i zadań badawczych w kierunku stopniowego uzyskania odpowiednich ocen szkodliwości. Bez odpowiednich kryteriów podane na końcu uwagi i wnioski mają tylko charakter wstępny i wymagają prowadzenia dalszych badań.

1. Stan zjonizowania powietrza i koncentracji aerozolu jest istotnym parametrem jakości powietrza w budynkach mieszkalnych. Zależy on w znacznym stopniu od jakości powietrza zewnętrznego. W związku z tym nie można rozdzielić badań jonizacji powietrza w mikrośrodkach mieszkań od odpowiednich badań w środowiskach zewnętrznych i warunkach naturalnych. Te ostatnie potrzebne są ponadto do uzyskania danych odnośnie normatywów lokalizacji i rodzaju konstrukcji budynku /klimatyzacja, wysokość itp./.

2. Do oceny oddziaływań stanu zjonizowania powietrza na organizm ludzki konieczne jest prowadzenie badań nad retencją poszczególnych frakcji wielkości jonów i cząstek nienaładowanych w systemie oddechowym. Szczególnie dotyczy to często najbardziej toksycznych submikronowych cząstek wtórnego aerozolu, w tym cząstek zawierających atomy substancji radioaktywnych pochodnych radonu i cząstek powstałych z par metali ciężkich.

3. Nieodzowne jest podjęcie badań chemicznego składu aerozolu, zwłaszcza aerozolu wtórnego powstającego w powietrzu z polutantów gazowych, oraz dalsze studia biologiczne, laboratoryjno-kliniczne i epidemiologiczne nad toksycznością i alergicznymi oddziaływaniami jonów i nienaładowanych elektrycznie cząstek zanieczyszczeń aerozolowych spotykanych w mieszkaniach.

4. W badaniach nad stanem zjonizowania powietrza, jego zmianami czasowymi i możliwością ich regulowania bardzo wskazane jest prowadzenie studiów teoretycznych nad równowagą jonizacyjną, zarówno procesów powstawania i wzrostu jonów i cząstek aerozolu jak i procesów ich usuwania przez sedymentację oraz przewietrzanie lub wentylację.

5. Konieczne jest podjęcie przygotowań naukowo-technicznych w zakresie budowy nowoczesnej aparatury pomiarowej, w tym np. spektrometrów ruchliwości jonów i analizatora elektrycznego rozkładu wielkości wszystkich cząstek, aerozolu oraz przyrządów opartych na metodach optycznych, aerodynamicznych itp.

6. Pomiary stanu zjonizowania powietrza w nowych budynkach z płyt betonowych potwierdziły konieczność ograniczenia radioaktywności materiałów przegród, postulowaną przez innych autorów na podstawie bezpośrednich i obszernych badań [3]. W przypadku stawiania nowych budowli konieczny jest np. bezwzględny zakaz używania tworzyw betonowych z niesprawdzonych pod względem radioaktywności materiałów. Należy postulować wprowadzenie nowych technologii zapobiegających ekshalacji radonu, nawet przy jeszcze dopuszczalnych skażeniach materiałów. Zagrożenie zdrowia spowodowane nadmierną koncentracją radonu i produktami jego rozkładu powinno być zmniejszone na drodze stosowania w mieszkaniach sprawniejszej niż grawitacyjna wentylacji. W istniejących domach, charakteryzujących się występowaniem nadmiernej koncentracji radonu, należy rozważyć wprowadzenie odpowiednich wyciągów w otworach wentylacyjnych.

7. Stan zjonizowania powietrza w mieszkaniach ze sztucznymi wykładzinami podłogowymi wykazuje bardzo silne powiększenie koncentracji jonów średnich /o ok. 50%/ i jonów ciężkich /o ok. 100% wartości/ w stosunku do odpowiednich koncentracji w mieszkaniach tradycyjnych. Znaczne podwyższenie koncentracji jonów i ich skład przy używaniu wykładzin z tworzyw sztucznych budzi obawy niekorzystnego oddziaływania na organizm ludzki. Niezbędne są ustalenia pod tym względem norm dotyczących fizyko-chemicznych własności polimerycznych tworzyw, stosowanych w oddawanych do użytku budynkach mieszkalnych.

8. Redystrybucja przestrzennego rozłożenia oraz zmiany spektrum wielkości cząstek, spowodowana polami elektrycznymi wykładzin, zwiększać może zagrożenie radioaktywnym i biologicznym aerozolem od produktów rozpadu radonu oraz wirusów i drobnych bakterii.

9. W związku ze znaczną produkcją jonów i nienaładowanego aerozolu, przy pocieraniu tworzyw sztucznych i zwiększaniu się elektryzacji wykładzin w suchym powietrzu, należy przy stosowaniu zimych systemach grzewczych, podnosić względną wilgotność powietrza do ok. 50%.



## LITERATURA

- [1] Bricard J.: Action of Radioactivity and of Pollution upon Parameters of Atmospheric Electricity in "Problems of Atmospheric and Space Electricity" ed. S.C. Coroniti Elsevier, New York 1965
- [2] Junge C.E.: Air Chemistry and Radioactivity, Academic Press, New York 1963
- [3] Lewandowski B.: Mikroklimat pomieszczeń z maksymalnym zastosowaniem tworzyw sztucznych, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 1977
- [4] Michnowski S., Warzecha S., Wajdewicz A., Chrobak M., Kozłowski W.: Badania warunków elektrycznych w mikrośrodkowisku mieszkań nowego budownictwa z zastosowaniem tworzyw sztucznych, Instytut Geofizyki PAN, Warszawa 1977
- [5] Peńsko J., Geisler J.: Analiza potencjalnego zagrożenia ludności w Polsce na promieniowanie jonizujące w budynkach mieszkalnych, Komitet Fizyki Medycznej PAN, Warszawa 1978
- [6] Rutkowska J.: Wpływ składników chemicznych niektórych materiałów stosowanych w budownictwie na zdrowie człowieka. Problemy kształtowania mikrośrodkowiska mieszkalnego, NOT, Warszawa 1978
- [7] Tyczka S.: Pomiar jonizacji powietrza. Problemy kształtowania mikrośrodkowiska mieszkalnego, NOT, Warszawa 1978
- [8] Workshop on health effect of transportation - related pollutants. Environmental Health Effects Research Series, U.S. Environmental Protection Agency, EPA - 600/1-78-011, January 1978

Stanisław Michnowski, Stanisław Warzecha  
Andrzej Wajdewicz

WPLYW ROZWIĄZAŃ MATERIAŁOWO-KONSTRUKCYJNYCH NA JONIZACJĘ  
POWIETRZA POMIESZCZEŃ MIESZKALNYCH  
Streszczenie

Omówiono jonizację powietrza jako istotny parametr jakości mikrośrodkowiska pomieszczeń mieszkalnych. Na podstawie badań własnych przedstawiono koncentrację jonów i aerozolu w powietrzu mieszkań nowego budownictwa, na tle odpowiednich koncentracji w miejskim powietrzu zewnętrznym oraz w powietrzu obszarów o małym zanieczyszczeniu. Stwierdzono występowania wyraźnych zależności stanu zjonizowania powietrza od ścian betonowych, wykładzin z tworzyw sztucznych, ogrzewania i urządzeń wewnętrznych. Przedyskutowano wielkość tych efektów i ich ewentualny wpływ na jakość powietrza mieszkań. Przedstawiono potrzeby badań i kontroli jonizacji powietrza z punktu widzenia jej oddziaływania na zdrowie mieszkańców. Podano w związku z tym wstępne uwagi i wnioski dotyczące nowych rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych w budownictwie mieszkaniowym.

Stanisław Michnowski, Stanisław Warzecha  
Andrzej Wajdewicz

EFFECT OF BUILDING MATERIALS AND STRUCTURES UPON  
AIR-IONIZATION IN FLATS

## Abstract

The air ionization is discussed as an essential quality parameter of the microenvironment of flats. On the basis of the authors' own investigations, the concentration is presented of ions and aerosol in air of flats in new buildings, against the background of corresponding concentrations in the outside urban air, and in the air of regions of low contamination. The occurrence has been found of clear dependences of air ionization upon the concrete walls, plastics lining, heating and internal equipment. The magnitude of these effects is discussed and their possible influence upon the air quality in flats. The necessity is indicated of examining and checking the air ionization from the viewpoint of its effect upon the inhabitants' health. In this connection, preliminary remarks have been made and conclusions have drawn, concerning new solutions with respect to materials and structures in residential building.

Станислав Михновски, Станислав Вареха  
Андрей Вайдвич

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-КОНСТРУКЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ НА ИОНИЗАЦИЮ ВОЗДУХА В ЖИЛЫХ  
ПОМЕЩЕНИЯХ

## Резюме

Обсуждается ионизация воздуха как существенный параметр качества микросреды жилых помещений. На основании исследований, проведенных авторами, представляется концентрация ионов и аэрозоля в воздухе квартир нового строительства, на фоне соответствующих концентраций в городском наружном воздухе, а также в воздухе пространств с малым загрязнением. Отмечается факт существования бесспорных зависимостей состояния ионизирования воздуха от бетонных стен, пластмассовых обшивок, отопления и внутреннего оборудования. Обсуждается значение этих эффектов и их возможное влияние на качество воздуха квартир. Представляются потребности в исследованиях и контроле ионизации воздуха с точки зрения ее воздействия на здоровье жителей. Приводятся в связи с вышеуказанными предварительные замечания и предложения, касающиеся новых материально-конструктивных решений в жилищном строительстве.



doc. dr inż. Henryk Korniewicz  
Centralny Instytut Ochrony Pracy  
Warszawa  
mgr Jan Maria Kowalski  
Instytut Przemysłu Organicznego  
Warszawa  
doc. dr Stanisław Michnowski  
Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk  
Warszawa

2.4

### WPLYW ROZWIĄZAŃ MATERIAŁOWO-KONSTRUKCYJNYCH NA ZAGROŻENIE ZDROWIA PRZEZ ELEKTRYCZNOŚĆ STATYCZNA

BRYŁA BUDYNKU NIE PRZEPUSZCZA DO MIESZKAŃ NATURALNYCH  
PÓL ELEKTRYCZNYCH WOLNOZMIENNYCH

#### Naturalne pola elektryczne wolnozmienne

Jak wiadomo, pomiędzy powierzchnią Ziemi a jonosferą otaczającą Ziemię, występuje wysoka różnica potencjałów o wartości średniej rzędu 280 kV. Otoczenie Ziemi aż do jonosfery może być w uproszczeniu rozpatrywane jako wnętrze kondensatora kulistego, w którym występuje pole elektryczne o kierunku pionowym i zwrocie wektora natężenia pola skierowanym od dodatnio naładowanej jonosfery do powierzchni Ziemi wykazującej w obszarach pogody nadmiar ładunków elektrycznych ujemnych. Przy powierzchni Ziemi, natężenie pola elektrostatycznego wynosi średnio w ciągu roku ok. 130 V/m, co oznacza, że na każde ciało materialne, znajdujące się przy powierzchni Ziemi, a mające ładunek elektryczny 1 kulomba /1 C/ działa siła 130 niutonów /130 N/. Siła ta przyciąga w kierunku Ziemi ciała naładowane dodatnio, a odpycha ciała naładowane ujemnie.

Pola elektryczne występujące wokół Ziemi ulega ciągłym fluktuacjom, w wyniku czego na składową stałą 130 V/m nakładają się przebiegi zmienne o różnych częstotliwościach. Spośród nich na szczególne wyróżnienie zasługuje częstotliwość rezonansowa rezonatora kulistego, którym jest przestrzeń pomiędzy powierzchnią Ziemi a jonosferą. Częstotliwość ta, tzw. rezonans Schumana, zawiera się w granicach 8÷30 Hz, a związane z nią natężenie pola elektrycznego jest stosunkowo niewielkie, rzędu mV/m. Rezonans Schumana zasługuje jednak na uwagę, ze względu na jego regularny bieg dobowy i prawdopodobny wpływ na rytmy biologiczne.

#### Przyczyny ograniczające naturalne pola wolnozmienne wewnątrz budynków

Przewodnictwo elektryczne przegród budowlanych jest zwykle ponad 10 rzędów wielkości większe od przewodnictwa powietrza w przyziemnej warstwie atmosfery i powietrza znajdującego się we wnętrzach budynków mieszkalnych. W konsekwencji, bryła budynku o znacznie zwiększonej przewodności elektrycznej względem powietrza i zabudowana w ziemi, wykazuje właściwości ekranujące, podobnie jak tzw. klatka Faraday'a.

Skuteczność ekranowania wnętrza budynku przed polami zewnętrznymi może być przedstawiona stosunkiem natężenia pola zewnętrznego do natężenia pola wewnątrz budynku. Stosunek ten, zwany współczynnikiem ekranowania, osiąga duże wartości i orientacyjnie wynosi  $10^8$  w odniesieniu do naturalnego pola elektrostatycznego 130 V/m i ok.  $10^4$ , w odniesieniu do pola wolnozmiennego związanego z rezonansem Schumana.

Współczynnik ekranowania zależy od oporności właściwej materiałów budowlanych i jest zwykle większy dla budynków wykonanych z prefabrykatów /oporność właściwa prefabrykatów jest zazwyczaj poniżej  $10^5 \Omega \cdot m$ / niż dla budynków drewnianych /oporność właściwa drewna zazwyczaj powyżej  $10^5 \Omega \cdot m$ /.

Jenakże praktycznie można stwierdzić, że naturalne wolnozmienne pola elektryczne nie wnikają do wnętrz mieszkalnych, niezależnie od rodzaju materiałów stosowanych do konstrukcji bryły budynku.

#### Prawdopodobne skutki braku naturalnych pól w mieszkaniach

Uczeni zajmujący się bioelektromagnetyzmem wyrażają pogląd, że naturalne, wolnozmienne pola elektryczne są istotnym składnikiem środowiska życia i odizolowanie człowieka od tych pól jest niekorzystne dla jego zdrowia. Na poparcie tego poglądu wysuwane są różne hipotezy, nad weryfikacją których są podejmowane złożone badania.

Poniżej podano trzy opinie dotyczące istotności znaczenia pól elektrostatycznych:

A. Składowa stała pola elektrostatycznego /130 V/m/ ma wpływ na oczyszczanie powietrza z zanieczyszczeń aerozolowych, które bez pola elektrostatycznego utrzymywałyby się długo w powietrzu, ze względu na zbyt małe sedymentacje grawitacyjne. Pola elektrostatyczne powodują, że dodatnio naładowane cząstki aerozolu opadają na ziemię, a cząstki naładowane ujemnie z obszaru przy powierzchni Ziemi wyrzucane są do atmosfery. Proces opadania aerozolu dodatnio naładowanego wydaje się być szczególnie istotny, gdyż większość zanieczyszczeń aerozolowych, powstających przy pyleniu wykazuje ładunek elektryczny dodatni. Trzeba podkreślić, że siły od pola elektrostatycznego  $F_E = qE$ , działające na naładowane cząstki aerozolu są znaczne w stosunku do siły ciężkości  $F_g = mg$ . Na przykład dla cząsteczki o średnicy  $10^{-8}$  m, mającej ładunek elektryczny tylko jednego elektronu, wartość  $F_E$  przekracza ponad 1000-krotnie wartość  $F_g$ .



B. Synchronizacja biorytmów. Badania prowadzone przez Wevera [5] w bunkrach podziemnych wykazują, że składowe zmienne odpowiadające rezonansowi Schumana /10 Hz/ steruje biorytmem człowieka. Jej zanik w budynkach mieszkalnych może oznaczać desynchronizację ważnych procesów w organizmie.

C. Badania wykazują biologiczny wpływ pól elektrostatycznych. Na przykład badania [2] wykazały, że kilkutygodniowe działanie pola elektrostatycznego o natężeniach składowej stałej, 100-krotnie zwiększonej względem natężenia pola naturalnego, mają widoczny wpływ na rozwój szeregu roślin. Wzrost niektórych roślin jest przyspieszony, innych hamowany wraz z innymi negatywnymi skutkami, np. związane pęki kwiatowe obumierają. Obserwacje te i wyniki innych badań pozwalają ogólnie stwierdzić, że zarówno brak pól elektrycznych, jak i ich podwyższenie powyżej poziomu naturalnego działają ujemnie na organizmy żywe, szczególnie w okresie rozwojowym. Dlatego można założyć, że brak naturalnych wolnozmennych pól elektrycznych w budynkach mieszkalnych jest raczej zjawiskiem niekorzystnym dla zdrowia ludzkiego.

#### E w e n t u a l n e    ś r o d k i    z a r a d c z e

Zbliżone do pól naturalnych tło pól elektrostatycznych można teoretycznie uzyskać w budynkach mieszkalnych dwoma sposobami:

- a/ przez zastosowanie materiałów budowlanych przepuszczających pola naturalne do wnętrza budynków,
- b/ przez umieszczenie w pomieszczeniach źródeł pól zastępujących pola naturalne.

Zastosowanie pierwszego sposobu wydaje się obecnie nierealne, gdyż wymaga on materiałów o właściwościach elektrycznych zbliżonych do właściwości powietrza atmosferycznego. Pewnym polepszeniem sytuacji byłoby uzyskanie materiałów sztucznych o właściwościach zbliżonych do właściwości suchego drewna budowlanego.

Zastosowanie drugiego sposobu wymagałoby wprowadzenia różnicy potencjałów elektrycznych rzędu 300 V pomiędzy sufitem a podłogą /dla pomieszczeń o wysokości 2,5 m/. Dodatkowo, ta różnica potencjałów powinna być modulowana przebiegiem /10 Hz/, zbliżonym do częstotliwości i amplitudy rezonansu Schumana.

Z wielu względów jest za wcześnie, by takie rozwiązanie zalecać do stosowania. Jednakże należałoby rozważyć możliwość wykorzystania tego rozwiązania dla celów badawczych.

Należy tu wspomnieć, że składowe stałe naturalnego pola elektrostatycznego można sztucznie odtworzyć, stosując w mieszkaniach wykładziny z materiałów, które się elektryzują. W tym celu podłoga mogłaby być wykonana z tworzyw sztucznych wykazujących ograniczoną elektryzację ujemną. Z kolei sufit mógłby być wyłożony tworzywem elektryzującym się dodatnio.

Rozwiązanie to ma jednak mankamenty, które omówiono oddzielnie.

#### ELEKTRYZACJA MATERIAŁÓW Z TWORZYW SZTUCZNYCH, STOSOWANYCH W BUDOWNICTWIE

Tworzywa sztuczne w budownictwie mieszkaniowym są źródłem energii elektrostatycznej, której wpływ na zdrowie człowieka wydaje się być większy niż wpływ wynikający z braku w mieszkaniach naturalnych wolnozmennych pól elektrycznych.

#### Z j a w i s k o    e l e k t r y z a c j i    -    e l e k t r y c z n e g o ł a d o w a n i a    s i ę    c i a ł

Zjawisko elektryzacji występuje powszechnie na powierzchniach stykania się ze sobą dowolnych materiałów. Mechanizm przebiegu zjawiska jest bardzo złożony i w zasadzie do chwili obecnej nie mamy jego zadowalającego wyjaśnienia fizycznego i analitycznego.

W wyniku elektryzacji, stykowa powierzchnia jednego materiału uzyskuje nadmiar ładunków elektrycznych dodatnich, a stykowa powierzchnia drugiego materiału - nadmiar ładunków ujemnych. Ten stan elektrycznego naładowania może się utrzymywać po odsunięciu materiałów od siebie.

Ładowanie powierzchni jest prawdopodobnie wynikiem dwóch niezależnych procesów:

- a/ przechodzenia ładunków elektrycznych z powierzchni jednego materiału na stykową powierzchnię drugiego materiału,
- b/ skróśnej polaryzacji ładunków zawartych oddzielnie w każdym ze stykających się materiałów w wyniku zjawiska indukcji.

Wydaje się, że pierwszy proces ma decydujące znaczenie w większości przypadków praktycznych. Jest on prawdopodobnie związany z przechodzeniem przez styk zarówno jonów ujemnych, jak i dodatnich, przy czym:

- przechodzenie jonów ujemnych /elektronów/ zależy od wartości przenikalności elektrycznych  $\epsilon$  stykających się materiałów. Według reguły Coehna elektrony przechodzą z materiału o większej przenikalności elektrycznej /ładując go dodatnio/ na materiał o mniejszej przenikalności elektrycznej,
- przechodzenie jonów dodatnich zależy od ścieralności stykających się materiałów i intensywności ścierania. Przy ścieraniu, oderwane od materiału cząstki kilkatomowe mają na ogół ładunek elektryczny dodatni /stąd materiał ścierany ładuje się ujemnie/.

Ogólnie biorąc, każdy materiał może elektryzować się zarówno ujemnie, jak i dodatnio. Znak nagromadzonego ładunku zależy od własności fizycznych obydwu każdorazowo stykających się materiałów oraz od sposobu ich stykania się i wzajemnego pocierania. Ilość ładunku nagromadzonego na powierzchni danego materiału zależy decydująco od oporności właściwej tego materiału. Stwierdzono, że nadmiernie elektryzują się te materiały, których oporność właściwa zawiera się w orientacyjnych granicach od  $10^8$  do  $10^{13} \Omega \cdot m$ , przy czym przy oporności właściwej rzędu  $10^{11} \Omega \cdot m$  występuje maksimum gromadzenia się ładunku elektrycznego na materiałach [1].



## Szczególne znaczenie elektryzacji tworzyw sztucznych

Tworzywa sztuczne od kilkudziesięciu już lat występują jako tani substytut wielu wcześniej stosowanych materiałów, służących do wykańczenia i wyposażenia wnętrz. Są to przede wszystkim wykładziny podłogowe, okładziny ścienne, obicia i tapety /płyty laminowane, tkaniny syntetyczne, PCW itp./, tworzywa używane jako okładziny poręczy, uchwytów itp. /PCW typu winidur, polistyren, poliamid ewentualnie polietylen/, tkaniny i folie na obicia meblowe, lakiery syntetyczne, szkło zwykłe i organiczne /"plexi"/, elementy armatury oraz urządzeń sanitarnych /winidur, poliamid, polistyren/ i inne. Tworzywa te szczególnie silnie mogą się elektryzować, gdyż ich oporność właściwa w wielu przypadkach zawiera się w przedziale  $10^8 - 10^{13} \Omega \cdot m$ . Ilustruje to następująca tablica [3]:

Lp.	Materiał	Oporność właściwa, $\Omega \cdot m$
1	Poliakrylany	$10^8 - 10^{12}$
2	Poliamidy	do $10^{12}$
3	Polichlorek winylu plastyfikowany	$10^{11} - 10^{13}$
4	Polichlorek winylu twardy, nie plastyfikowany	$10^{12} - 10^{15}$
5	Polipropylen	$10^{12} - 10^{15}$
6	/Polistyren/	/ $10^{15} - 10^{16}$ /
7	Polietylen	$10^{13} - 10^{15}$
8	PCW płytki	$10^7 - 10^9$
9	PCW - taśma	$10^6 - 10^{10}$
10	Linoleum	$10^6 - 10^{10}$
11	Lakiery poliestrowo-epoksydowe	ok. $10^{12}$

Na skutek elektryzacji na powierzchni tworzyw sztucznych występować mogą wysokie potencjały elektryczne - o wartościach dochodzących do 20-30 kV. Z kolei w otoczeniu naelektryzowanych tworzyw mogą występować silne pola elektrostatyczne o natężeniach dochodzących do kilkudziesięciu kilowoltów na metr /kV/m/, a w skrajnych przypadkach nawet i do kilkuset kV/m.

Zagrożenia wynikające z elektryzacji zachodzącej z udziałem tworzyw sztucznych

Stosowanie tworzyw sztucznych jako materiałów wewnątrz mieszkalnych, potencjalnie stwarza co najmniej trzy rodzaje zagrożeń dla zdrowia ludzkiego:

a/ niebezpieczeństwo wywołania iskry inicjującej pożary i wybuchy, np. przy ułatwianiu się gazu opałowego lub stosowaniu rozpuszczalników benzynowych, nitro itp. - jest to zagrożenie życia ludzkiego;

b/ uciążliwe rażenia mieszkańców prądem rozładowań elektrostatycznych przy poruszaniu się po mieszkaniu;

c/ narażenie mieszkańców na działanie silnych pól elektrostatycznych, występujących w otoczeniu naelektryzowanych przedmiotów; dodatkowo, pole to może niekorzystnie wpływać na rozkład przestrzenny naładowanych elektrycznie cząstek aerozoli w pomieszczeniach mieszkalnych.

Przeskok iskry i rażenie prądem są przejawem tego samego procesu impulsowego rozładowania nagromadzonej wcześniej energii elektrostatycznej. Skutki zależą od wartości energii rozładowania, przy czym:

- do wywołania zapłonu materiałów łatwopalnych, stosowanych w gospodarstwach domowych, wystarcza energia iskry rzędu dziesiątych części milidżule /mJ/;

- do wywołania odczuwalnego rażenia prądem potrzebna jest minimalna energia 1,5 mJ;

- do wywołania bolesnego rażenia prądem - energia 80 mJ;

- do wywołania rażenia śmiertelnego - energia 10 J.

Powyższe dane wskazują, że energia iskry potrzebnej do spowodowania zapłonu gazów, par lub pyłów może być kilkakrotnie mniejsza od energii iskry odczuwanej przez człowieka. Jest to bardzo istotne stwierdzenie, pozwalające na podkreślenie dwóch faktów; a mianowicie, że:

- w każdym mieszkaniu, w którym człowiek odczuwa przeskok iskry rozładowania elektrostatycznego możliwy jest zapłon szeregu mieszanin łatwopalnych;

- zapłon jest również możliwy od elektryczności statycznej, która występuje na poziomie dużo niższym od zauważalnego przez człowieka.

## Dopuszczalna elektryzacja tworzyw sztucznych

W świetle informacji zawartych w rozdziale i można postawić hipotezę, że powstawanie elektryczności statycznej w budynkach mieszkalnych - jeśli następuje w określonym, ograniczonym zakresie - może być korzystne dla człowieka. Za taką hipotezę wydaje się przemawiać to, że sztucznie wytworzona elektryczność statyczna mogłaby częściowo zastąpić nie występujące w budynkach naturalne pole elektrostatyczne. Ogólnie jednak, występowanie elektryzacji tworzyw jest zjawiskiem niepożądanym. Dla wyeliminowania, a przynajmniej istotnego zmniejszenia wymienionych poprzednio zagrożeń, należy ograniczyć wielkość potencjału powstającego na tworzywach sztucznych.

Najstarsze i najbardziej rozpowszechnione zalecenia odnośnie zapobiegania powstawaniu iskry zapłonowej opierają się na badaniach Paschena i stwierdzają, że zapłon od iskry elektrostatycznej nie wystąpi, jeśli potencjał elektrostatyczny powierzchni materiału nie przekroczy 300 V. Są to zalecenia ogólne, stosowane w przemyśle od kilkudziesięciu lat.

W odniesieniu do budownictwa mieszkaniowego oddzielne zalecenia opracowano w ZSRR [3], które mówią, że potencjał powstający na powierzchni tworzyw sztucznych nie powinien przekroczyć wartości rzędu 100±200 V. /w dalszej części rozważań przyjęto do porównań wartość 200 V jako poziom odniesienia, a zarazem dopuszczalny/.



Utrzymanie potencjału powierzchni tworzyw sztucznych w granicach  $100 \pm 300$  V prawdopodobnie oznacza, że eliminowane są praktycznie wszystkie wymienione zagrożenia łącznie z niekorzystnym wpływem na organizm ludzki pól elektrostatycznych.

Wyniki badań elektryzacji niektórych tworzyw sztucznych stosowanych w budownictwie mieszkaniowym

Badania elektryzacji tworzyw sztucznych stosowanych w budynkach mieszkalnych prowadzono w Warszawie w latach 1976-1977 [4]. Mierzono szereg wielkości, a między innymi natężenie pola elektrostatycznego w pobliżu powierzchni kilkudziesięciu różnych tworzyw sztucznych, pochodzących z 6 krajów. Wyniki tych badań zawierają znak ładunku elektrycznego gromadzącego się na tworzywach i pozwalają oszacować wartość i znak potencjału powierzchni tworzyw sztucznych.

Poniżej podaje się wyniki tego szacowania, z rozróżnieniem materiałów uzyskujących przy pocieraniu potencjał do 200 V i większy niż 200 V.

Dla tych ostatnich podano stosunek potencjału występującego na tworzywie  $\phi_1$  do potencjału  $\phi_0 = 200$  V. Dla dalszych rozważań stosunek  $\phi_1/\phi_0$  nazwano współczynnikiem nadmiaru.

Uzyskano następujące wyniki:

1. Wykładziny ściennie /tapety/ - Skantil /Szwecja/, Storeys /Anglia/, Connet /Holandia/, VIHURI /Finlandia/, Buflon /Francja/, Sommer /Francja/, jak również okleiny drewnopochodne i ściany malowane farbami emulsyjnymi - w badaniach elektryzowały się z reguły ujemnie /z wyjątkiem wykładziny Viguri, która elektryzowała się dodatnio/.

Potencjał powierzchni był niewielki i nie przekraczał 10 V.

2. Wykładziny podłogowe dywanowe - Dynamit kabel /RFM/, Nipolam 6400, WV Braun 6405, Topiflex ciemnobrązowy /Francja/ Sommer Topison 1011 /Francja/ - elektryzowały się silnie dodatnio. Współczynnik nadmiaru zawierał się w granicach 13-33, co oznacza, że na wykładzinach występował potencjał  $2600 \pm 6500$  V.

3. Wykładziny podłogowe Sommer Topiflex 5202, 8922, 8903 elektryzowały się nieznacznie ujemnie. Potencjał nie przekraczał -50 V.

4. Wykładzina podłogowa Teppich Boden 81851 elektryzowała się silnie ujemnie, osiągając potencjał rzędu -1600 V.

5. Plastikowe ścianki rozsuwane /harmonia/ elektryzowały się ujemnie, osiągając największą wartość współczynnika nadmiaru rzędu 88, co oznacza, że potencjał tych ścianek osiągnął wartość rzędu 18000 V. Niewiele mniejszy potencjał ujemny rzędu -13000 V wykazywały plastikowe ściany wanny.

6. Ściany w kabinie sanitarnej wykonane z poliestru zbrojonego włóknem szklanym wykazywały potencjał dodatni o wartości rzędu 8000 V.

7. Imitacja drzewa wykazywała potencjał ujemny rzędu -400 V.

Zastawione wyniki wskazują, że stosowane w mieszkaniach materiały z tworzyw sztucznych mogą elektryzować się zarówno dodatnio, jak i ujemnie. Znacznie wyższe potencjały powierzchni materiałów, dochodzące nawet do kilkunastu kilowoltów, stwierdzono w przypadku części wykładzin podłogowych /pkt 2/ i badanych ścianek działowych /pkt.5,6/. Są to potencjały zdecydowanie za wysokie. Materiały te nie powinny się znaleźć w budynkach mieszkalnych.

Ochrona mieszkańców przed elektrycznością statyczną tworzyw sztucznych

Środowisko życia człowieka powazecznie jest dziś "zatrwane" elektrycznością statyczną. Nosimy elektryzującą się odzież z tworzyw sztucznych, stykamy się z elektryzującymi się wykładzinami w mieszkaniu, w pomieszczeniach zakładu pracy, wreszcie obsługujemy różnorodne urządzenia mające coraz więcej części wykonanych z elektryzujących się tworzyw sztucznych. Prawie przez całą dobę znajdujemy się w zasięgu oddziaływania ładunków i pól elektrostatycznych, które zaburzają stan elektryczny organizmu. Skutki tych zaburzeń nie są łatwe do wydzielenia z ogólnych codziennych zmian stanu zdrowia. Z perspektywy lat mogą być bardzo istotne. Dla ich zaobserwowania i prześledzenia konieczne są systematyczne badania medyczne i biologiczne, których niestety w naszym kraju się nie prowadzi.

Wiedza współczesna o działaniu elektryczności statycznej sprowadza się do oczywistych i nie budzących wątpliwości spostrzeżeń natury technicznej - o iskrzeniach oraz o rażeniu człowieka impulsowo przepływającym prądem. Zjawiska te przy współczesnym stanie techniki ujęte są w zależności ilościowej, które pozwalają stwierdzić, że tworzywa sztuczne, stosowane w budownictwie mieszkaniowym elektryzują się nadmiernie. Stwierdzenie to dotyczy zarówno tworzyw produkcji krajowej, jak i importowanych, które były przedmiotem badań [4].

Zwalczanie elektryczności statycznej, prowadzone dotychczas w zakresie ochrony przemysłu, stopniowo poszerza się na zagadnienia ochrony zdrowia na stanowisku pracy i w miejscu zamieszkania. W tym kierunku konkretne przedsięwzięcia są realizowane w wielu bardziej rozwiniętych krajach.

Wyraża się pogląd, że tego rodzaju badania powinny być w naszym kraju prowadzone systematycznie i na znacznie większą skalę niż to ma miejsce dotychczas.

Zagadnienie zwalczania elektryczności statycznej jest zbyt złożone do rozwiązania jednorazowego.

Obecny stan wiedzy, chociaż bardzo niepełny, pozwala określić rodzaj i zakres rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych i organizacyjnych, które powinny być podjęte w celu ochrony mieszkańców przed elektrycznością statyczną, będącą wynikiem powszechnego stosowania tworzyw sztucznych. Widzi się tutaj dwa kierunki działania:

1. W budynkach mieszkalnych, w których zastosowano nieodpowiednie tworzywa sztuczne, powinno się zapobiegać elektryzacji i jej skutkom przez wpro-



wadzenie środków ochrony antystatycznej, odprowadzających ładunek elektryczny z powierzchni tworzyw sztucznych, względnie korzystnie wpływających na powierzchnię tworzyw. Przydatne więc byłyby rzeczowe informacje dla mieszkańców o istniejących do dyspozycji środkach ochrony.

Wiadomo na przykład, że wilgotność powietrza ma bardzo duży wpływ na zjawisko elektryzacji, które praktycznie nie występuje przy wilgotności rzędu 70%. Badania krajowe [4] wykazały, że natężenie pola elektrycznego przy powierzchni tworzyw sztucznych, stosowanych w mieszkaniach, gwałtownie spada przy wzroście wilgotności do 40-50%. Stąd w mieszkaniach elektryzację można byłoby istotnie ograniczyć utrzymując wilgotność powietrza na poziomie ok. 50% - zgodnie z wymaganiami komfortu mikroklimatycznego. Ten warunek nie zawsze jest w mieszkaniach, zwłaszcza w porze zimowej, spełniony.

Należy wprowadzić nadzór nad stosowaniem tworzyw sztucznych w budownictwie, oparty o przepisy normujące metody badań materiałowych, aparaturę pomiarową i zakres stosowania poszczególnych tworzyw, w zależności od ich podatności na elektryzację. Konieczne są dalsze starania o opracowanie dla budownictwa niezbędnego asortymentu tworzyw sztucznych o ograniczonej elektryzacji. Zadania z tego zakresu powinny być prowadzone przez stale działający zespół specjalistów, zajmujący się systematycznym rozpoznawaniem wyników badań zagranicznych i możliwościami ich wykorzystania w warunkach krajowych oraz wzbogacający wiedzę o powstawaniu, zwalczaniu i biologicznym działaniu elektryczności statycznej, w oparciu o własne prace teoretyczne i eksperymentalne.

#### LITERATURA

- [1] Electricité statique d'incendie et d'explosion en présence de liquides et de poussières inflammables. Travail et securite nr 6/1973, przedruk w "Bezpieczeństwie Pracy" nr 6/1974
- [2] Korniewicz H., Bednarz S.: Badanie wpływu pól elektrostatycznych na kiełkowanie i wzrost roślin, maszynopis, CIOP, Warszawa 1972
- [3] Kowalski J.M.: Zaburzenia wywołane elektryzacją tworzyw sztucznych stosowanych we wnętrzach mieszkalnych, maszynopis, IKS-6/01/03/0090, Warszawa 1976
- [4] Michnowski S., Warzecha S., Wajdowicz A., Chrobak M., Kozłowski W.: Badania warunków elektrycznych w mikrośrodowisku mieszkań nowego budownictwa z zastosowaniem tworzyw sztucznych. Cz. I i II, maszynopis, Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa 1978
- [5] Wever R.: Einflüsse schwacher elektro-magnetischer Felder auf die circadiane Periodik des Menschen, Die Naturwissenschaften, nr 1/1968, s.29-32

Henryk Korniewicz, Jan Maria Kowaleki  
Stanisław Michnowski

#### WPLYW ROZWIĄZAŃ MATERIAŁOWO-KONSTRUKCYJNYCH NA ZAGROZENIE ZDROWIA PRZEZ ELEKTRYCZNOŚĆ STATYCZNĄ

##### Streszczenie

Bryła budynku praktycznie nie przepuszcza do wnętrza mieszkalnych naturalnych pól elektrycznych, występujących w wolnej przestrzeni, a mogących mieć wpływ m.in. na synchronizację rytmów biologicznych i oczyszczanie powietrza z naładowanych elektrycznie aerozoli. Z drugiej strony tworzywa sztuczne, stosowane w mieszkaniach na obudowy i wykładziny, silnie elektryzują się stwarzając zagrożenie dla zdrowia, a nawet życia mieszkańców. Mogą powodować pożary i wybuchy, bolesne rozładowanie elektrostatyczne i długotrwałe oddziaływanie na mieszkańców silnych pól elektrostatycznych, zmieniających naturalny rozkład ładunków elektrycznych w ciele ludzkim. Zagadnienia te są problemem ogólnosięciowym, nie w pełni rozpoznany, który w kraju powinien znaleźć wyraz w badaniach podstawowych i ściśle użytkowych. W tym zakresie zgłaszano szereg postulatów, zwracając szczególną uwagę na konieczność wprowadzenia ochrony antystatycznej w istniejących budynkach i na opracowanie technologii produkcji tworzyw sztucznych o ograniczonej elektryzacji. Podano również wyniki badań elektryczności statycznej w budynkach mieszkalnych, w których zastosowano różne tworzywa sztuczne.

Henryk Korniewicz, Jan Maria Kowaleki  
Stanisław Michnowski

#### EFFECT OF BUILDING MATERIALS AND STRUCTURES UPON HEALTH HAZARD FROM STATIC ELECTRICITY

##### Abstract

The body of a building does not practically let through into the residential interior of a building, the natural electric fields that occur in free space, and may have an effect, among other things upon the synchronization of biological rhythms and purification of the air from the electrically charged aerosols. On the other hand, plastics used in flats for fitmens and lining, become intensely electrified and constitute a danger to the inhabitants' health and even life. They may cause fires and explosions, painful electrostatic discharges and sustained effect upon inhabitants of strong electric fields that change the natural distributions of electric charges in the human body. These are world-wide problems not yet fully known, which in this country should find their expression in both fundamental and strictly functional research. Many requirements have been made in this respect, special attention being paid to the necessity for introducing antistatic protection in the existing buildings, and for developing the production technology of plastics with limited electrification. The results are also given of studies on static electricity in residential buildings, wherein different plastics have been applied.

Henryk Korniewicz, Ян Мария Ковальски  
Станислав Михновски

#### ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-КОНСТРУКЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ НА ОПАСНОСТЬ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ИЗ-ЗА СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

##### Резюме

Масса здания не пропускает практически в жилые интерьеры электрических полей, имеющих в свободном пространстве и могущих оказывать влияние, между прочим, на синхронизацию биологических ритмов и очистку воздуха от электрически заряженных аэрозолей. С другой стороны, синтетические материалы, применяемые в квартирах для облицовки ограждений и обшивок, сильно электризируются, создавая опасность для здоровья, а даже угрозу для жизни жителей. Они могут быть причиной пожаров и взрывов, электростатического разряда, жгущего боль, и длительного воздействия, на жителей, сильных электростатических полей, изменяющих естественное распределение электрических зарядов в теле человека. Эти вопросы являются всемирной проблемой, не вполне изученной, которая должна найти в стране выражение в основных и точно потребительских исследованиях. В этой области был внесен ряд предложений, причем обращалось особое внимание на необходимость введения противостатической защиты в существующих зданиях и на разработку технологии производства пластика с ограниченной электризацией. В работе приведены результаты исследований статического электричества в жилых зданиях, в которых были применены разные искусственные материалы.



PARTLY INSULATED WIRE ANTENNA FOR ELECTRIC FIELD  
AND AIR-EARTH CURRENT MEASUREMENTS IN THE FREE ATMOSPHERE

Jerzy BERLINSKI

Institute of Electronics, Warsaw Technical University, Warszawa

Stanisław MICHNOWSKI

Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Warszawa

A b s t r a c t

A model of partly insulated wire antenna for free-atmospheric electric field and air-earth current measurements is discussed. The method of measurement is briefly outlined. The effects of insulation of part of antenna on the electric field and current distribution as well as the effects of induction interaction between the upper and lower antenna are preliminarily analyzed.

The results of test soundings and estimated measurement errors are presented.

1. Introduction

For the balloon-borne measurements of air-earth current density in the free atmosphere a wire antenna is commonly used. This antenna consists of two conducting wires: one hanging on the insulated nylon cord from the balloon that carries the radiosonde, and the other hanging down from the screened payload of the radiosonde. A measuring device placed in the payload measures the current between the upper and lower antenna electrode, which is in the known relation to the vertical current density (Olson,



1971). Long wire antennas have been also applied for the measurement of the electric field but for this purpose their parameters were different (Ogawa, 1973; Gras, 1978).

In order to get one instrument to be used for both measurements, i.e., the vertical air-earth current and vertical component of the electric field, we designed a model of wire antenna radiosonde in which, the central part of the wires was covered by insulation. The applied antennas are believed to give some measuring advantages, but they involve some additional not well known effects of insulation on the collected current and electric field distribution.

Bare and partially insulated antennas have been applied for atmosphere electric measurements for some time, although there is till a lack of detailed description how such probes operate. In this report we give a preliminary assesment of changes in operation of wire antennas by introducing their partial teflon insulation. The results of the first testing are given.

## 2. An antenna for electric field and current balloon-borne measurements

The applied antenna consists of two 12 m long conducting wires suspended far enough below a balloon so that the balloon does not affect the measurement. Midway between the upper and lower antenna wire a payload of meteorological type radiosonde is installed (Berliński and Michnowski, 1980). The antennas are connected to the MOSFET type electrometer through the input circuit shown Fig. 1. Indication of the electrometer and pressure-altitude device is transmitted to the receiver and recorder on the ground (Berliński et al., 1978).

The function of antenna is to convert the measured current density  $\vec{J}_A$  or electric field  $\vec{E}$  into recorded voltage  $U$ . In our case the conducting wires playing the role of antennas are placed into a poorly conducting medium. In the steady state the potentials of antennas will come to equilibrium with potentials of surrounding medium. The corresponding antenna potentials are indicated by this equipotential layers which reaches the conductor in the so-called neutral points consistent with the original and induced currents. There are two ways to derive the one-dimensional current evoked in the real antenna probes, from the values of the three-dimensional atmospheric field or current.



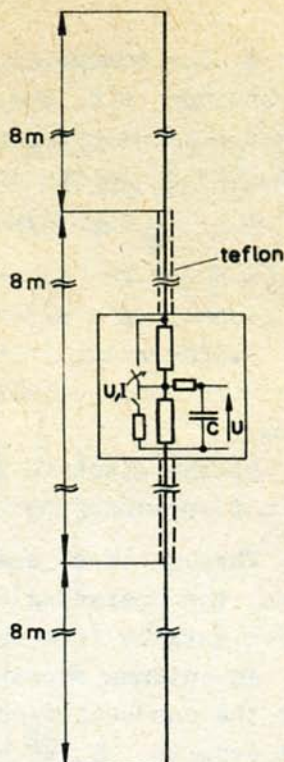


Fig. 1. Partially insulated wire antenna for balloon-borne measurements of the vertical air-earth current and electric field in the free atmosphere.

It is possible to treat the antenna as an active two-terminal and to determine experimentally the characteristic parameters of antenna by open circuit voltage  $U_0$ , the short-circuit current  $J_0$ , and the internal impedance (Kasemir and Ruhnke, 1958).

Alternatively, these parameters can be calculated for simple probe geometry if the input impedance of the electrometer is known from measurement. For this purpose and for further consideration the following simplification of the measuring conditions will be assumed:

1. There is no convection current, no photo-emission and Ohm's law is valid in the medium surrounding the antenna;
2. The antenna is placed parallelly to the measured vertical component of the electric field; other components are neglected. The original local field in the absence of the probe is a quotient of the vertical air-earth current density,  $j_A$ , and the conductivity  $\lambda_A$ , where  $\lambda_A$  is the sum of both polar conductivities,  $\lambda_A = \lambda_+ + \lambda_-$ , in the region of interest.



3. The conductivity  $\lambda$  is uniform in the surrounding of the antenna, i.e. the height of the conductivity in the range of the antenna sizes are negligible for assumed distribution of conductivity in the lower atmosphere

$$\lambda = \lambda_g \exp(z/H)$$

where  $H = 7$  km is the height scale,  $\lambda_g$  - conductivity at the ground;  $z$  - altitude.

4. The spatial changes in the electric field and current with time occur simultaneously over the whole surface of the antenna;

5. The electric fields are low-frequency fields for which the emf. produced by magnetic induction is negligible.

Through these assumptions deviate from reality in some aspects, the operating conditions in practice are not expected to differ greatly from the typical real situations.

An antenna exposed to atmospheric electric field receives both the conduction-current density  $j_A$  and the displacement current density  $\epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{d}{dt} (j_A/\lambda)$ . A current  $dJ_s$  (Fig. 2) flowing through each surface element of antenna  $ds$  is:

$$dJ_s = A_s j_A ds + \frac{d}{dt} [A_s \epsilon_0 (j_A/\lambda_0)] ds \quad (1)$$

where  $A_s$  proportionality constant is a part, corresponding to each  $ds$  element of antenna, of so called the effective operating area dependent on the probe geometry and orientation relative to the field, and  $\lambda_0$  is the conductivity of the air at the antenna surface (Gras, 1978). This conductivity is mono-signed owing to the electrode effect (Chalmers, 1967). The total collecting current over the whole surface of either antenna is:

$$J = \int_s dJ_s = \int_s A_s j_A ds + \int_s \frac{d}{dt} [A_s \epsilon_0 (j_A/\lambda_0)] ds \quad (2)$$

In the case of the assumed constant relation of the antenna geometry to the field during a measurement, i.e. neglecting a swinging of the antenna, current density function  $j_A$  can be separable into time and space components. Then equation (2) can be written in the following form:



$$J = A J_A + A \epsilon_0 \frac{d}{dt} (J_A / \lambda_0) \quad (3)$$

where  $A$ , the effective operating area or the effective collecting surface, relates the magnitude of the collected current in the probe to the atmospheric current density.

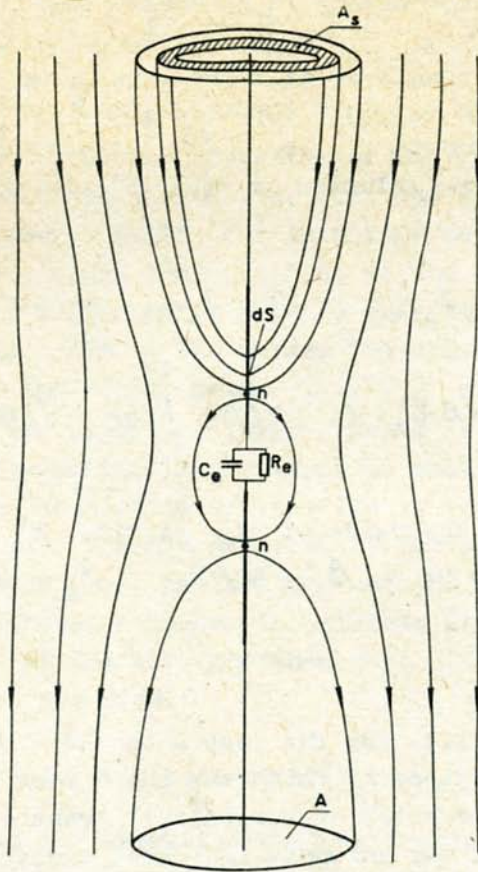


Fig. 2. A simplified model of the passive bare antenna in poorly conducting medium.  $R_e$  and  $C_e$  are input resistance and input capacitance of the measuring electrometer connected to the antennas. Points  $n$  denote position of the neutral points.

This collected current  $J$ , consisting of steady and displacement components, has to flow between the upper and lower antenna i.e. through the air surrounded them and through  $R_e$  and  $C_e$  of the measuring device. Hence



$$J = J_R + C \frac{dU}{dt} \quad (4)$$

where  $U$  is the potential difference across  $RC$  of the total impedance between the antennas. Comparing the expressions (3) and (4) for current  $J$  we obtain equation for the response of the probe

$$J_R + C \frac{dU}{dt} = A J_A + A \epsilon_0 \frac{d}{dt} (J_A / \lambda_0). \quad (5)$$

In the case of constant conductivity  $\lambda$  when the local atmospheric time constant  $\tau_A = \epsilon_0 / \lambda$  is constant, it is possible to express the solution of eq. (5) in the following form (Gras, 1978):

$$U = \frac{A \beta_2}{C_2} \left[ \tau_A J_A(t') - \tau_A J_{A(0)} \exp(-t' / \beta \tau_A) + \exp(-t' / \beta \tau_A) (1 - 1/\beta) \int_0^{t'} \exp(t' / \beta \tau_A) J_A dt \right] \quad (6)$$

where  $J_A(t')$  is the value of  $J_A$  at time  $t' = t/2$ ,  
 $J_{A(0)}$  - at  $t = 0$ ;  $\beta_1 = RC / \tau_A$ ;  $\beta_2 = \lambda / \lambda_0$ ;

$$\beta = \beta_1 / \beta_2.$$

For  $\beta = 1$ , i.e. for the case when  $RC = \epsilon_0 / \lambda_0$ , we have the matching conditions in which the third term of (6) equals zero, and after the decay of the initial transients, the potential difference of the antennas indicates variation in measured current density  $J_A$ . In such conditions  $J_A$  may be determined by

$$U(t) = A J_A(t) R \quad (7)$$

Errors introduced by in exact matching resulting from changes in air conductivity (including the electrode effect) might be numerically analyzed on the basis of eq. (6). We will not consider these problems now. Instead of evaluating the probe parameters by means of experimental data for the antenna in open and short cir-



cuit conditions, we will now follow the previously mentioned alternative way of assessing and comparing the operation of the two types of antennas.

Keeping the simplifications described above we will calculate the values of operational area  $A$  and some other properties of wire antennas. This approach was used by Kasemir (1960) and Olson (1971) in measurement of air-earth current density by means of bare, long antennas.

As mentioned above, wire antennas were used also for the electric field measurement in the free atmosphere. It seems highly advantageous to extend the operation of one instrument for measurement of both these quantities, i.e. the air-earth current density and the electric field. For this purpose we introduced a partly insulated antenna shown in Fig. 1. The antennas were made of conducting wires of length  $a$  with a thin teflon coating along  $b$  from the internal ends of the wires. The drastically different input impedance of the electrometer ( $R_e, C_e$ ) governing the total impedance between the upper and lower antenna is now changed by means of suitable switching in the input circuit. In a suitable time sequences, the connection of very low or very high input resistance enables us to measure alternately the current density or the electric field by means of the same antenna probes. This gives, under some restrictions, a chance to estimate indirectly also the conductivity  $\lambda$  of the air, provided that time variations of the measured values are slow.

### 2.1. Air-earth current measurements

By introducing the insulated antenna segments we change the distribution of the current flow. In the case of bare wire antenna for air-earth current measurement, the effective surface,  $A$ , through which the atmospheric current enters the antenna, may be estimated according to Kasemir's formula

$$A = \frac{\pi a^2}{\ln(2a/d) - 1} = K a^2 \quad (8)$$

where  $d$  is a diameter of wire antenna and  $a$  is the antenna wire length. For  $d$  much smaller than  $a$  ( $10^4$  times) we adopt the approximation:



$$A = a^2/3 \quad (9)$$

Insulating the closer segments of the antenna we are able to collect only that part of the current which flows toward the noninsulated wire. The current flowing in the bare segment of the antenna is smaller than that for the whole noninsulated length of the wire. In first approximation we assume this reduction to be proportional to the ratio of  $J_{A1}/(J_{A1} + J_{A2})$ , where  $J_{A1}$  and  $J_{A2}$  are, respectively, to the values of the current collected by the bare (conducting) part of the wire and the current which would be collected by the rest of the antenna if it were not insulated (Fig. 3).

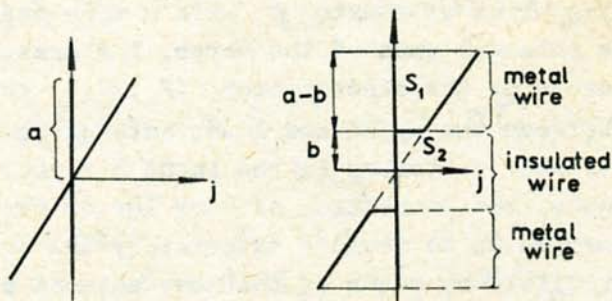


Fig. 3. Simplified current density distribution on a surface of the antenna: a) bare wire (according to Kasemir, 1960); b) partially insulated wire ( $a = 12$  m,  $b = 8$  m).

In order to get a better estimation of the effective collection area for a partially insulated antenna we will delineate the field distribution around such antenna. In our case for a conducting medium, using the Ohm's law

$$\vec{I} = \lambda \vec{E} \quad (10)$$

the Maxwell's equation may be written as

$$\text{curl } \vec{H} = (\lambda \vec{E} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) \quad (11)$$

when the convection current is neglected. By taking the divergence of (11) at the steady field  $\vec{H}$  we get



$$\operatorname{div} (\lambda \vec{E} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) = 0, \quad (12)$$

i.e. the continuity equation for the currents, saying that the sum of conduction and displacement current

$$\vec{J}_M = \lambda \vec{E} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (13)$$

is divergence free. Provided that the temporal variation of E is slow compared to the atmospheric time constant

$$\tau_n = \epsilon_0 / \lambda$$

and that  $\vec{E}$  can be described only by scalar potential V

$$\vec{E} = - \operatorname{grad} V \quad (14)$$

the solution of (12) presents us a description of temporal variation of  $\vec{E}$  (Böstrom et al., 1973). There will appear the terms proportional to  $\lambda$ , which stem from the conduction current, and those proportional to  $\epsilon_0$ , which stem from the displacement current. Depending on temporal variation of  $\vec{E}$  and on conductivity (or altitude), one or the other of these currents may dominate. For the assumed slow variation of  $\vec{E}$  at the temporal scale much smaller than atmospheric constant  $\tau = \epsilon_0 / \lambda$  the conduction current dominates. In the real soundings, the displacement current arises solely from small (slow) change of conductivity with altitude and should cause little concern. However, the soundings can be carried out not all time only in passive regions of the atmosphere but also in areas with the electric field sources varying with time in an arbitrary way (Maynard et al., 1981) or in regions with discernible local changes of conductivity. For such cases a thorough analysis of time variations is needed, especially when the operation of the antenna is extended for the measurement of VLF electric fields.

According to the adopted simplifications, let us consider only the steady state when (12) reduces to:

$$\operatorname{div} \vec{J} = 0, \quad \vec{J} = \lambda \vec{E} \quad (15)$$



On the other hand, in a dielectric medium without electric sources we have the following equations

$$\operatorname{div} \vec{D} = 0, \quad \vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (16)$$

where  $\vec{D}$  is the electric induction vector and  $\epsilon_0$  is the electric permittivity. As equations (15) and (16) have identical form, there is an exact analogy in the determination of the distribution of  $\vec{J}$  and  $\vec{D}$ . Consequently, the results of considerations for  $\vec{D}$  in the medium with permittivity  $\epsilon$  (for conductor  $\epsilon = \infty$ ) can be referred to  $J$  in a medium of conductivity  $\lambda$  (for conductor  $\lambda > 0$ ).

The antenna under study can be treated as a system of two bodies, the conductor of surface  $S_p$  and a dielectric of surface  $S_d$ , placed in a conducting medium of electric permittivity  $\epsilon_z$ , in which a homogeneous electric field  $\vec{E} = a\vec{i}_z$  is present. The potential  $U$  satisfies the equation

$$\nabla^2 U = 0 \quad (17)$$

with boundary conditions

$$U|_{S_p} = \text{const}, \quad \epsilon_z \left( \frac{\partial U}{\partial n} \right)_+ = \epsilon_w \left( \frac{\partial U}{\partial n} \right)_-$$

and

$$U_+ = U_- \quad (18)$$

where

$$\begin{aligned} U_+ &= \lim_{X \rightarrow x_0} U & U_- &= \lim_{X \rightarrow x_0} U \\ & \text{(X outside)} & & \text{(X inside)} \end{aligned}$$

$$X = x, y, z$$

For potential  $U$  we can write:







and placed in a medium of permittivity  $\epsilon_z$  in which a homogeneous electric field directed along the z-axis is present. Taking into account the symmetry and considering eq. (18) we obtain the following boundary conditions for equation (20) at particular edges:

at AE  $v = az$

at EF  $v = ap$

at BC  $\epsilon_z \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)_+ = \epsilon_w \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)_-$

at CD  $\epsilon_z \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)_+ - \epsilon_w \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)_- = (\epsilon_w - \epsilon_z) a$  (22)

at FG  $\frac{\partial v}{\partial r} = 0$

at OH  $v = 0$

at line HIG  $v = 0$  if the points H, G and I are sufficiently far away from the respective axes of the coordinate system (21').

According to (19) the total potential U is

$U = -az + v$ . (23)

Putting (23) to eq.(20) and using the boundary conditions (22) we obtain for the total electric field

$\vec{E}_c = a\vec{i}_z - \vec{\nabla} v = \left[ a\vec{i}_z - \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} - \frac{\partial \vec{v}}{\partial r} \right]$ . (24)

If  $\epsilon_w \gg \epsilon_z$ , than at the boundary surface BC we have

$\left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)_+ \gg \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)_-$  (25)

and the radial component of the electric field inside the dielectric can be neglected (Majewski, 1980). The described problem has been solved numerically by using the finite differences method for a thin wire antenna covered by a dielectric in the area as shown in Fig. 4.



Numerical computation was carried out on the axial cross-section of the antenna. The plane dimensions (78 x 880 units) make the edge effect negligible near the antenna whose dimensions taken for calculation were 1 x 20 units. The size of the cross-section was limited by the computer memory (CDC Cyber 72). As a result, the node potentials on the cross-section were obtained (Fig. 5). Based on the equipotential lines, the boundary line of

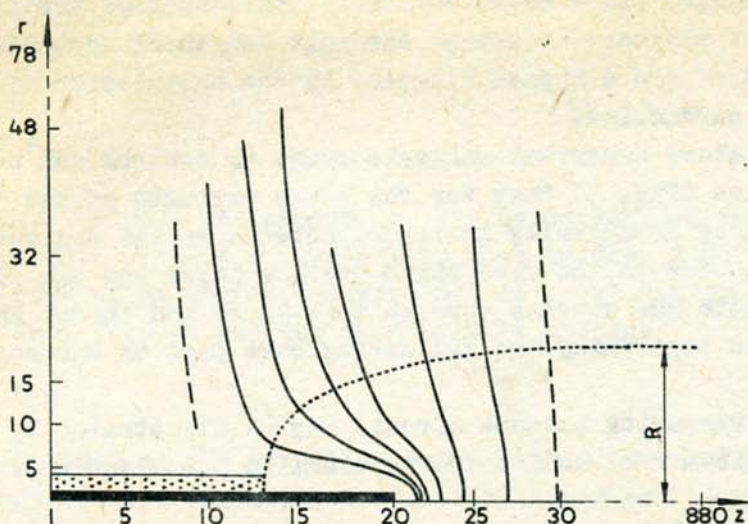


Fig. 5. Outline of the equipotential line distribution obtained on the basis of numerical analysis. Continuous lines present the equipotential lines; dotted line shows the calculated effective area collecting the current.

the current received by the antenna was traced manually. The errors of computation were estimated by comparing the result of computation made at various dimensions of the cross-section plane. Based on the determined boundary streamline, the calculated effective cross sectional area collecting the current is as follows:

$$A_n = \pi R_n^2 = 275 \text{ m}^2 \quad (26)$$

For an antenna length  $a = 20 \text{ m}$  and a wire diameter  $d = 1 \text{ m}$  (corresponding to the values used in numerical analysis) the effective area calculated from formula (8) is  $A'_n = 468 \text{ m}^2$ . Using



the previously assumed rough correction for the presence of a dielectric cover, we get

$$A_s = 0.64 \cdot A_n' = 299.5 \text{ m}^2$$

where coefficient 0.64 is the factor corresponding to the value of  $J_{A1}/(J_{A1} + J_{A2})$  in the first tentative estimation of effective operating area of the antenna. The surfaces  $A_n$  and  $A_s$  differ by about 10%. It is reasonable to expect that the difference may be reduced if we adopt the finite thickness of the teflon coating of the wire (equal to one unit length of the numerical net) and attain a higher accuracy in the calculation of the boundary streamline.

The above numerical analysis seems to confirm our previous supposition (Fig. 3) that for the rough estimate of the current collected by a partially insulated antenna we can neglect the distortion due to the dielectric coating layer and the current flowing into the antenna through this layer and treat the field distortion concerning the collecting bare part of antennas as not large.

The measuring antenna circuit may be illustrated by a substitute circuit of active two-terminal as a current source (Fig. 6).

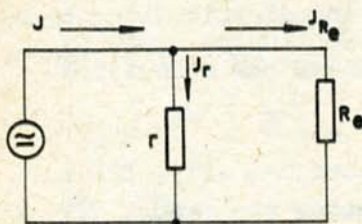


Fig. 6. Simplified equivalent circuit of an antenna for the current measurement.

The atmospheric current  $J$  collected by the antenna consists of two currents: the antenna leakage current  $J_r$  and the recorded current  $J_{R_e}$

$$J = J_r + J_{R_e} = (1 + R_e/r) J_{R_e} \quad (27)$$



where  $J$  is the air-earth current collected by antenna,  $r$  is the internal antenna resistance (Übergangwiderstand) which may be complex (impedance) and  $R_e$  represents the electrometer input resistance which may be also complex as input impedance of the electrometer. The fraction  $R_e/r$  is in general a complex quantity which, in the case of the same phase angle of respective impedances, becomes a real number. This case, defined as the phase matching, corresponds to matching conditions mentioned in eq. (6). If  $R_e$  is very much lower than  $r$  we have nearly a short circuit case in which  $J_{R_e}$  is tending to the value of short circuit current  $J_{ns}$

$$J_{ns} = A_n \cdot J_A \quad (28')$$

Antenna internal resistance  $r$  may be determined from another substitute circuit equivalent to that in Fig. 7 but presented in the form of an active two-terminal as a voltage source (Fig. 7). From this we get the open circuit voltage

$$U_0 = E h \quad (28'')$$

where  $2h$  defined as the effective separation of the antennas is the distance between the neutral points of upper and lower antennas. If we set  $R_e = 0$  then  $J_{ns}$  is the short circuit conduction current which flows through  $r$  if the matching condition is fulfilled. It follows from Ohm's law that

$$r = \frac{U_0}{J_{ns}} = \frac{E h}{J_A A_n} \quad (29')$$

$$\text{Since } J_A = \lambda E, \quad A'_n \approx \frac{a^2}{3}, \quad h = a, \quad A_n = A'_n \frac{J_{A1}}{J_{A1} + J_{A2}}$$

then

$$r \approx 3/\lambda a \left( \frac{J_{A1}}{J_{A1} + J_{A2}} \right) \quad (29'')$$

Because the antenna resistance depends on the air conductivity which changes with altitude, the correction for this resistance has been calculated.



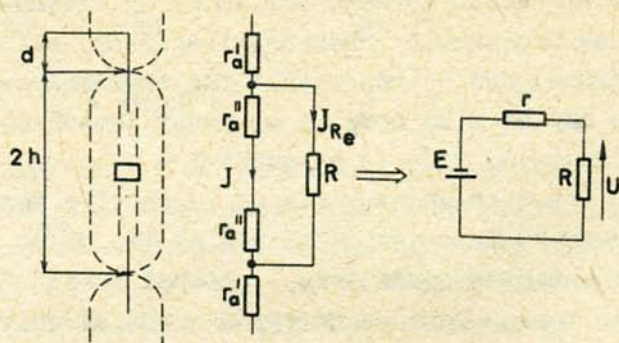


Fig. 7. Simplified equivalent circuit of an antenna for the electric field measurement.

## 2.2. Measurements of vertical component of electric field

If the same antennas are used for the measurements of vertical component of the electric field, the impedance between the upper and lower antenna (governed by the input impedance of the electrometer circuit) must be much higher than the internal antenna resistance. In practice the most convenient way is to make  $R_e \approx \infty$ ,  $C_e \approx 0$  compared with the impedance of the open antenna (Slamanig, 1981). Then the effective separation distance is usually treated as the distance between the geometrical centers of the antennas, and the electric field distribution is such as in the case of an open antenna circuit (Ogawa, 1973).

If the resistance values  $R_e$  are finite, the electric field distribution is different: the neutral points of antennas, being the potential points for each antenna, do not coincide with their geometrical center points, but approach each other. This causes a decrease of resistance  $r_a'$  (increasing the collecting length of antenna) and an increase of resistance  $r_a''$ . These resistances and the equivalent circuit for electric field measurement are shown in Fig. 7. As it is seen from the equivalent circuit, current  $J_{Re}$  should be negligible in comparison to antenna current  $J$  flowing through  $r_a'$  and  $r_a''$ . Thus, the conditions for the electric field measurements are:

$$R_e \gg 2 r_a' , \quad R_e \gg 2 r_a'' . \quad (30)$$



The value of  $r_a$  depends on the antenna collecting length and the air conductivity  $\lambda$ . In the case of close and short bare wires, the values of  $r'_a$  are large, which makes it difficult to fulfill equations (30). If these conditions are not fulfilled, we must apply the load corrections. They can be made on the basis of the parameters of measuring circuit (Berliński and Michnowski, 1980).

Another correction should be introduced to account for the effect of the electric induction between the upper and lower antenna. The induction causes the neutral points of each antenna not to coincide with the antenna's geometrical center but approach each other. A value of this shift,  $\Delta a/2a$ , (where  $\Delta a = \frac{x}{2}$  from Fig. 8), is estimated on the basis of numerical analysis using the model shown in Fig. 8).

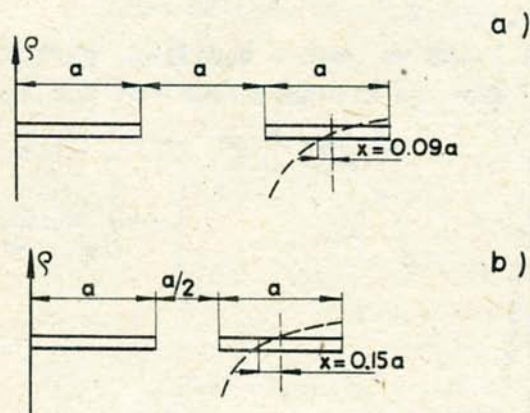


Fig. 8. A model used for estimating the induction between the upper and the lower antenna.

The computations showed that these shifts are about 5% in case a), corresponding to the antenna used, and about 7,5% in case b), when the distance between the antennas was two times shorter than in case a). For our partly insulated antennas error coming from this kind of shift gives an increase in the obtained value of  $E$  by about 6.7%. It may be expected that the error due to this effect is much larger for bare wire antennas.



### 3. Experimental sounding and comparison with other results

Measurements of the air-earth current and vertical component of the electric field by means of discussed antenna were tested in balloon soundings in the free atmosphere at Laramie. Two flights, W-185 and W-189, were performed on July 30, 1976 and August 4, 1978, during the International Workshop of Atmospheric Electricity, together with soundings made by means of bare antennas.

The results obtained are presented in Figs. 9 and 10. Figure 9 shows the electric field strength during both ascent and descent determined from the probe output voltage, using  $h$  with corrections for load and induction between the top and bottom antennas. The differences between the field strength on ascent and descent are not large, being noticeable only between 7 and 22 km. The results of air-earth current measurements on the same flight 185 were obtained by our bare antenna used separately and are not presented here.

In flight W-189 we used a modified, partially insulated antenna (Fig. 1) for the air-earth current and electric-field mea-

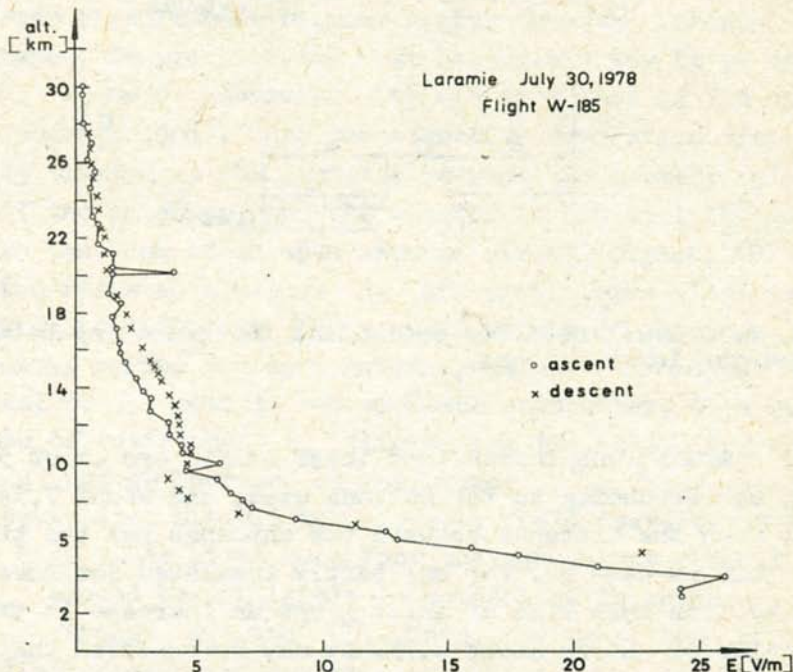


Fig. 9. Profile of the vertical component of electric field in the atmospheric obtained in the flight W-185.



surements. Unfortunately, in this flight the electric field was not measured, and only the vertical air-earth current as a function of height during ascent and descent is presented in Figure 10. The comparison of current values on descent of both flights shows good agreement (Rosen et al., 1979). Average current values corrected for the change in conductivity with height are  $3,1 \text{ pA/m}^2$ .

The results of soundings indicate that the current density was almost constant, at least in the stratosphere, and its values were consistent with those obtained by other groups in Laramie (Rosen et al., 1982). The agreement concerning slow changes of the measured air-earth current and vertical component of the electric field does not mean that the errors of all the instruments are not large. It was noticed that by using the long wire antenna, the direct measurements of air-earth current give about half value indicated indirectly by the measured total conductivity and electric field values. The problem of this discrepancy, in which the

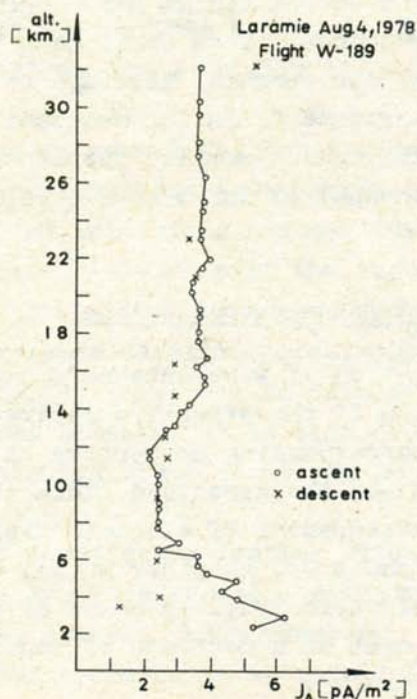


Fig. 10. Air-earth current density values as a function of altitude in flight W-189.



electrode effect is involved, has not been reasonably interpreted (Ogawa, 1985).

It is known that studies on error problems should be continued if we want to make measurements comparable. Such measurements are needed for better understanding of the large-scale effects concerning global circuit, electrical coupling between the upper and lower atmosphere, effects of solar events on the distribution of electric fields and currents in the lower atmosphere, etc., as well for observation of various important small-scale effects. Considering these demands and low costs of instrumentation it may be expected that probes for electric field and current measurements will attract more attention in broader programs.

In the last two decades, passive probes for measurement of horizontal component of the electric field in the stratosphere have been developed (Mozer, 1969). The large sensitivity and shorter length of partly insulated antennas are especially advantageous for such measurements. In a pursuit to get more coherent data obtained by different measurements it is necessary to improve balloon-borne measurements of electric fields and currents in the dense layers of the lower atmosphere. They still have to go through theoretical and further experimental testings in order to be comparable with the measurements in the mesosphere and higher layers of the atmosphere, where similar partly insulated antenna's technique has been applied for a long time (Aggson, 1969; Maynard et al., 1981).

#### 4. Remarks and preliminary conclusions

The partial insulation of wire antenna's causes an increase and better stabilization of the effective separation of antennas in comparison to the corresponding properties of the bare antennas of the same length and the same load. This gives a chance to get a more accurate measurement of electric field by means of the same length of antennas or, in other words, to measure the same small values of electric field by means of shorter antennas. It is obtained on the cost of a decrease of sensitivity of the air-earth current measurement.

As the distance between neutral points increases simultaneously, the effective collecting area becomes smaller, which reduces



the measuring signal. Since this confinement is to be acceptable by the electrometer used, the partial insulation of antennas makes it reasonable to apply the same antenna for both measurements, of the electric field and of air-earth current. Such solution necessitates, however, to have a very high input impedance in the electrometer needed for the electric field measurement. Fortunately, this condition is now rather easily satisfied due to modern electronics.

The extension of the distance of the neutral points to the payload makes it possible to avoid a distortion of the electric field distribution produced by the payload. This property of partly insulated antenna is important because, as compared to the antenna diameter, the payload dimensions have to be large and sometimes the payload may be charged. This distortion can be especially harmful if the loading of the antenna is not much greater than the antenna resistance.

Another evident advantage of partly insulated antennas is the decrease of the error produced by the inductive interaction between the upper and lower antenna. The preliminary calculations indicated that the error produced by this effect in tested antennas is by several percent smaller for partially insulated than for bare antennas.

On the other hand, partly insulated antenna bring some changes in its operation in comparison to a bare antenna. It was shown by calculations that the insulation reduces the effective collecting area of the antenna. In the case of the tested model this decrease was less than ten percent. It is necessary to improve this preliminary estimation by more detailed calculations and experimental tests. It is especially important to examine the time response of the partly insulated antenna. It is also necessary to get a better estimate how the assumed simplifications on the measuring conditions fit the reality.

The results of comparative testing of our partly insulated antenna and other instruments showed a relatively good agreement. We should be aware, however, that there are still various methodical and instrumental problems to be solved if we want to have more exact and comparable measurements by means of relatively easily attainable balloon soundings with inexpensive passive wire probes.



A c k n o w l e d g e m e n t s. We would like to express our thanks to Professors J. Rosen and D. Hofmann for enabling us to take part in the International Workshop of Atmospheric Electricity Measurements. We are also thankful to Prof. T. Ogawa for his suggestions and to Dr. H. Kasemir for his assistance.

Problem: FPBP 03.4 - Rp. 6

Received: June 10, 1986

### R e f e r e n c e s

- Aggson T.L., 1969, Probe measurements of electric field in space; in "Atmospheric emissions", B.M. Mc Cormac and A. Omholt (eds.), Van Nostrand Reinhold Co., Oslo.
- Berliński J., Gierasimowicz H., Gadecki R., Michnowski S., 1978, Czujnik elektryczny i przetwornik radiosondy do pomiaru pionowego pola elektrycznego pionowego prądu w stratosferze, Archives of the Institute of Geophysics, Pol. Acad. Sc., Warszawa.
- Berliński J., Michnowski S., 1980, Vertical current density and electric field measurements in the free atmosphere; Report for the International Workshop on Atmospheric Electricity at Laramie, Dept. Phys. a. Astron., Wyoming University, USA.
- Böstrom R., Fahleson U., Olausson L., Hallendal G., 1973, Theory of time varying atmospheric electric field and some applications to field of ionospheric origin, Dept. Plasma Phys. Roy. Inst. Techn., TRITA-EPP-73-02.
- Chalmers J.A., 1967, Atmospheric electricity, Pergamon Press, Oxford.
- Gras J.L., 1978, A model passive probe for free atmosphere electric field measurements, J. Atmos. Terres. Phys., 40, 1057-1063.
- Kasemir H., 1960, A radiosonde for measuring the air-earth current density, US Army Signal Research and Development Laboratory, New Jersey.



- Kasemir H.W., Ruhnke L.H., 1958, Antenna problems of measurements of the air-earth current; in "Recent Advances in Atmospheric Electricity", L.G. Smith (ed.), 137-148, Pergamon Press, London - New York - Paris - Los Angeles.
- Majewski A., 1980, Obliczanie rozkładu pola elektrycznego wokół układu oś w polu elektrycznym, Archiwum Inst. Podstaw Elektroniki PW. 29, 1, 267-269.
- Michnowski S., 1974, Transient variation of electric field after sudden discharge of an electric pole above a conductive plane in nonhomogenous medium, Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. A, 23, 333-347.
- Mozer F.S., 1969, Balloon measurements of electric field, J. Geophys. Res., 74, 19.
- Maynard N.C., Croskey C.L., Mitchell J.D., Halle L.C., 1981, Measurement of volt/meter vertical electric fields in the middle atmosphere, Geophys. Res. Letters, 8, 8, 923-926.
- Ogawa T., 1973, Analyses of measurement techniques of electric fields and current in the atmosphere, Contr. Geophys. Inst. Kyoto Univ., 13.
- Ogawa T., 1985, Fair-weather electricity, J. Geophys. Res., 90, D4, 5951-5960.
- Olson D., 1971, The evidence for auroral effects on atmospheric electricity, Pageoph, 84, 118.
- Rosen J.M., Hofmann D.J., Gringel W., 1979, Atmospheric electrical measurements workshop data, Report No. AP-49, Dept. Phys. a. Astron., Wyoming Univ., USA.
- Rosen J.M., Hofmann D.J., Gringel W., Berliński J., Michnowski S., Morita Y., Ogawa T., Olson D., 1982, Results of an international workshop on atmospheric electrical measurements, J. Geophys. Res., 87, 1219-1227.
- Slamanig H., 1981, Messung elektrischer Felder in der Stratosphäre, Institute für Weltraumforschung Graz, Österreich. Akad. Wissen., IWF 8108.



CZĘŚCIOWO IZOLOWANA ANTENA DO POMIARU NATEŻENIA POLA ELEKTRYCZNEGO  
I GĘSTOŚCI PRĄDU PIONOWEGO W WOLNEJ ATMOSFERZE

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

Przedstawiono zmodyfikowaną antenę przewodową do pomiarów składowych pionowych pola i prądu elektrycznego w dolnej atmosferze. Antena składa się z dwóch współliniowych przewodów metalowych, izolowanych płaszczem dielektrycznym w częściach przyśrodkowych i dołączonych do elektrometru o przełączalnej cyklicznie impedancji wejściowej. Szybkie przełączenia pozwalają, w wielu przypadkach, wyznaczone wartości pola i prądu uznać za prawie równoczesne. Przy powolnych ich zmianach można ponadto obliczać pośrednio przewodnictwo powietrza, przy założeniu jednorodności ośrodka w otoczeniu układu.

Wstępną analizę metody pomiaru ograniczono do warunków quasi-stacjonarnych, gdy wektor pola elektrycznego jest zgodny z osią anteny. Za pomocą przeliczeń modelowych dla częściowo izolowanych i nie izolowanych anten oszacowano błędy pomiaru wniesione przez izolację. Wykazano, że jej wprowadzenie umożliwia zmniejszenie indukcyjnego oddziaływania dolnej i górnej anteny, a zarazem wpływ gondoli na działanie anten. Umożliwia to zwiększenie precyzji pomiaru pola, pomimo zmniejszenia skuteczności energetycznej anteny. Wskazano na potrzebę dalszych badań nad dokładnością pomiarów prądu i pola elektrycznego w wolnej atmosferze, wykonywanych za pomocą różnych układów.



## THE FIELD-DEPENDENT CURRENTS DERIVED FROM THE ELECTRIC FIELD VARIATION FOLLOWING LIGHTNING DISCHARGES OBSERVED AT THE EARTH SURFACE

Piotr BARANSKI, Stanisław MICHNOWSKI

Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences  
01-452 Warsaw, ul. Księcia Janusza 64

### A b s t r a c t

The field-dependent current density, FDCD, is estimated according to Krider and Musser's approach on the basis of the variation of the electric field,  $E$ , measured at the ground after lightning discharges. The relation between the FDCD and  $E$  so derived is examined for two groups of discharges. The best-fitting approximation functions, their peculiarities and coefficients are discussed. When the corona current dominates in the FDCD, the transient space charge density at the field jump is estimated at  $-6 \text{ nC/m}^3$  and, on the other hand, the quasi-steady space charge density for the field,  $E$ , approaching sometime later the quasi-steady value  $E_s$ , is evaluated at  $+4 \text{ nC/m}^3$ . In the last case, the FDCD is equal to the Maxwell current density of  $-8.5 \text{ nA/m}^2$ . Characteristic features of the relation of FDCD and  $E$  for individual discharges are noticed and discussed. A possibility of estimation of convective current density from the field recovery variations is suggested. As a result, a characteristic velocity of the order of  $0.45 \text{ m/s}$  is obtained for convection air motions accompanying the observed thunderstorm.



### 1. Introduction

As we know, an analysis of surface electric field variation following lightning discharges may give some information of fundamental value about the thundercloud and electrical conditions at the ground resulting from ion production by corona (Krider and Blakeslee, 1985). The experimental estimation of field-dependent current density ( $j_E$ ), i. e., the conduction and corona current density is of great importance for theoretical models of the field recovery and their testing (Kasimir, 1978; Chauzy and Soula, 1987).

Assuming that height  $z$  is low compared with the altitude of the cloud electric charges, and that the current densities and the electric field are vertical and uniform, then, according to Standler and Winn (1979) the Maxwell current density below the cloud is height-independent and quasi-constant in the time span between the flashes. The Maxwell current  $j_M(z, t)$  is the sum of all current densities resulting from moving charges  $j(z, t)$ , and displacement current  $\epsilon_0 \partial E(z, t) / \partial t$ , where  $\epsilon_0$  is the permittivity and  $E(z, t)$  is the electric field intensity. Aloft, over the space charge layer produced by the corona,  $j(z, t)$  is assumed to be small compared to the displacement current (Standler, 1980). At the ground, in the time interval between the flashes, the Maxwell current presents the sum of displacement current  $\epsilon_0 \partial E(0, t) / \partial t$ , field-dependent current density  $j_E(0, t)$  and convection current  $j_{cv}$ , produced by mechanical transport of net space charge by air motion and/or by precipitation.

When the values of the electric field crosses zero at time  $t_0$ , or when they approach a quasi-steady value  $E_S$  afterwards, then the FDCD or the displacement current component of the Maxwell current vanishes, respectively. Besides, using the previously mentioned relations  $j_M(z, t) \cong j_M(0, t)$  and  $j_M(0, t) \cong j_M(0, t_0)$ , Krider and Musser (1982) demonstrated that  $j_E(t)$  can be expressed as follows:

$$j_E(t) = \epsilon_0 \left[ \left[ \frac{\partial E}{\partial t} \right]_{t_0} - \left[ \frac{\partial E}{\partial t} \right]_t \right] - [j_{cv}(t) - j_{cv}(t_0)]. \quad (1)$$

If, additionally, the change in convection current density at the time

$(t - t_0)$  is negligible compared to the corresponding change in displacement current density, then:

$$j_E(t) \cong \epsilon_0 \left[ \left( \frac{\partial E}{\partial t} \right)_{t_0} - \left( \frac{\partial E}{\partial t} \right)_t \right]. \quad (2)$$

For the first approximation we applied equation (2) to estimate the FDCD on the basis of the measured field regeneration rates using all the above mentioned assumptions. In practice the convection current disappears rarely, and then the FDCD will include the decrement of convection current density at time  $(t - t_0)$ .

Our present aim is the examination of FDCD for a few cases of the observed field recovery.

## 2. Measuring conditions and results

Measurements with a field mill were performed at Pasteura 3, Warsaw, on the top a 16-m high building. There are a lot of metallic points on the roof and the building is surrounded by about 15-m high trees. The grounded head of field mill was suspended near the edge of the roof of the building on a 2-m boom and was faced downwards to protect it against rain.

The building, being an elevated object on the flat earth surface, enhances the electric field above the flat and wide roof. This enhancement is characterized by the ratio of the electric field strength in the measuring site to that at the nearest flat earth surface. In our case, this reduction factor is 7.7 (Barański, 1985). However, we do not use that factor in the present paper, taking into consideration only the relationship between  $j_E$  and  $E$ . So we are not interested in their absolute values but in relative ones only. From the point of view of the considered problem it is mainly important that the space charge released by corona from points near the field mill sensor does influence the measured electric field time-variations following lightning discharges. We further assume, according to Standler and Winn (1979), that the corona current density at the rooftop level, which can be consider-



ed as a equipotential surface, has to be a function only of the electric field strength existing at that place. Thus we obtain an enhancement of the corona current density at our measuring place, in comparison to the one which might occur at the flat earth surface at the same time. Moreover, it should be noticed that the values of all constants (for parameterization of the corona current density) which have been obtained in our considerations are related to the place of our field mill measurements, similarly as in Whipple and Scrase's (1936) or Jhwar and Chalmers' (1967) expressions. The numerical values of these constants determined by the measuring site environment differ from those obtained in others places (see, e.g., Kasemir, 1978; Standler and Winn, 1979; Chauzy and Soula, 1987). As a matter of fact, these differences reveal effects produced by non-uniform electric field configuration that appears near edges of the rooftop and changes the conditions of corona creation.

The sign of the electric field and current is taken positive if the positive charge moves downwards. This sign convention corresponds to the normal fine-weather conditions (Chalmers, 1967).

In 1985 we found the cases in which the observed recovery field variations of successive near lightning discharges have crossed the zero line of  $E$ , but have not been accompanied by heavy rainfall that could markedly affect the measured field values. Such records are shown in Fig. 1. On August 18, only the first two discharges were entirely free from rain. The third one was accompanied by a very weak rain (intensity  $R = 1.5$  mm/h). Similar situation occurred on August 26, when after a heavy rainfall the rain intensity decreased to the value  $R = 3.6$  mm/h, which was noted from 18<sup>h</sup>10<sup>m</sup> to 18<sup>h</sup>35<sup>m</sup>. Measuring the rain rates we are able to exclude from our considerations the time of occurrence of heavy rain, when large space charge is produced by splashing of raindrops on the roof of the building in the presence of high electric field.

From the lower part of Fig. 1 it is seen that five complex discharges in regular sequence have the same positive polarity as the main field jump  $\Delta E$  of similar amplitude and high values of the predischARGE

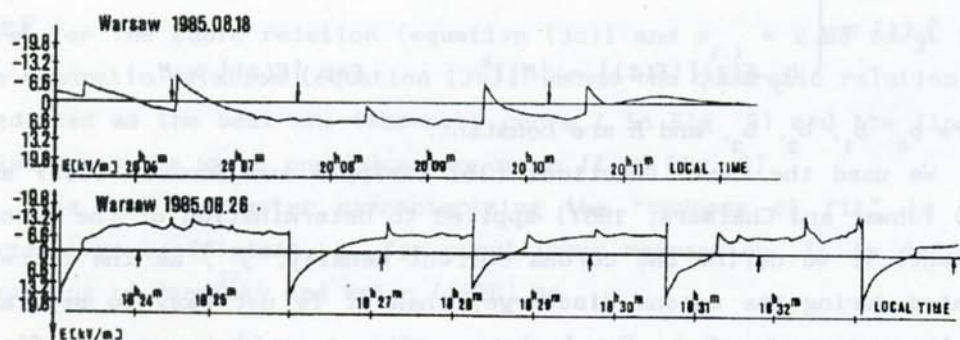


Fig 1. Surface electric field variations in Warsaw during nearby thunderstorm on August 18 and August 26, 1985. The instants of the main jump  $\Delta E$  and arrow mark indicate the beginning and the end of the recovery curves used to the estimations of  $j_E(t)$

negative field  $E_0$  (less than  $-6.6$  kV/m). Small recovery variations produced by distant discharges have been smoothed by hand interpolation to the main slow recovery course of the electric field. Probably all flashes with large  $\Delta E$  were produced by the same mature thunderstorm cell with negative charge source at the cloud base above the measuring site. For five such flashes  $j_E$  was estimated and plotted versus field values  $E$  in Fig. 2. Points were taken for successive few-second intervals in the period from the discharge to the arrow marked in Fig. 1. To examine the obtained values of  $j_E$  and to find approximate relation between  $j_E$  and  $E$ , the least square method was used for fitting the assumed three types of approximation function:

$$j_E(t) = b_0 + b_1 E(t), \quad (3a)$$

$$j_E(t) = \begin{cases} 0 & \text{for } |E(t)| \leq M \\ b_2 [E^2(t) - M^2] & \text{for } |E(t)| > M, \end{cases} \quad (3b)$$



$$j_E(t) = \begin{cases} 0 & \text{for } |E(t)| \leq M \\ b_3 E(t)[|E(t)| - |M|]^2 & \text{for } |E(t)| > M, \end{cases} \quad (3c)$$

where  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ , and  $M$  are constant.

We used the known functions (3b) (Whipple and Scrase, 1936) and (3c) (Jhwar and Chalmers, 1967) applied to determination of the corona current. If we define the corona current density,  $j_{cr}$ , as the current created during the corona discharge, then it is not easy to separate the two components of  $j_E$ . For instance, after a rapid decrease of field  $E$  and the associated rapid decay of the corona, the ions formed by corona previously are still for some time participating in the conduction current  $j_{con}$ . In our recordings (see Fig. 1) each recovery field variation is followed by nearly quasi-static field change which precedes the next nearby lightning discharge. Not going now deeper into these problems, we will simplify our present analysis by considering only the sum of  $j_{cr}$  and  $j_{con}$  in the FDCD.

According to equation (3a), the conduction current is dominant and exceeds largely the corona current density. Equations (3b) and (3c) indicate that the corona current density is dominant and conduction current could be neglected. The values of parameter  $M$  in the above quadratic and cubic relations were established as a mean value of electric field of each polarity, when  $j_E \cong j_{cr}$  estimated from equation (2) (see the subsequent equation (4)) becomes zero for the considered recovery curves. For fixed values of  $M$ , the related values of parameter  $b_2$  or  $b_3$  were determined by the fitting. The "badness of fit" can be measured by the value of  $s_{2.1}$ , defined according to Panofsky and Brier (1958) as

$$s_{2.1} = \left[ \frac{\sum (X'_2 - X_2)^2}{N} \right]^{1/2}$$

where the summation extends over the  $N$  values of the sample analyzed,  $X'_2$  denotes the value given by the approximation function (i. e., the regression curve),  $X_2$  is the actual value of observation. For our first case examined, in which  $N = 133$  and  $X_2$  denotes value of  $j_E$ , we obtain

$s_{2.1} = 3.15 \text{ nA/m}^2$  for the linear relation (equation (3a)),  $s_{2.1} = 2.99 \text{ nA/m}^2$  for the cubic relation (equation (3c)) and  $s_{2.1} = 2.26 \text{ nA/m}^2$  for the quadratic relation (equation (3b)). Hence the quadratic relation is predicted as the best one (shown by curve I in Fig. 2) and the linear relation as the worst one (shown by curve II in Fig. 2).

The next parameter characterizing the "badness of fit" is the correlation coefficient,  $\eta$ , for curvilinear regression. It is defined according to Panofsky and Brier (1958) as

$$\eta^2 = \frac{s_2^2 - s_{2.1}^2}{s_2^2},$$

where  $s_2^2$  measures the total variance of  $X_2$ , whereas  $s_{2.1}^2$  measures the variance about the approximation function. The values of  $\eta^2$  obtained for the considered case with equations (3a), (3b) and (3c) are 0.67, 0.83 and 0.7, respectively. As it is seen from these values, the quadratic relation is the best approximation function between  $j_E$  and  $E$ .

For the quadratic relation (3b), presented in Fig. 2, the obtained values of parameter  $b_2$  together with the calculated 90% confidence interval (Pollard, 1977) are:

$$b_2 = (1.6 \pm 0.16) \cdot 10^{-17} \text{ A/V}^2 \text{ when } E(t) > 2.6 \text{ kV/m},$$

$$b_2 = (-1.4 \pm 0.175) \cdot 10^{-17} \text{ A/V}^2 \text{ when } E(t) < -2.9 \text{ kV/m}.$$

The obtained mean values of parameter  $M$  together with mean-square errors are:

$$M = 2.6 \pm 0.96 \text{ kV/m} \text{ when } E(t) > 2.6 \text{ kV/m},$$

$$M = -2.9 \pm 0.58 \text{ kV/m} \text{ when } E(t) < -2.9 \text{ kV/m}.$$

A small asymmetry of positive and negative value of  $M$ , i. e., of the corona onset (threshold) value, was noticed.

The second examined group of recovery variations (see the upper part of Fig. 1) concerns field jumps  $\Delta E < 0$  and  $E_0 < 0$  for the first flash but  $E_0 > 0$  for the others. Recordings before these discharges indicated that our measuring site was approached by a thundercloud cell



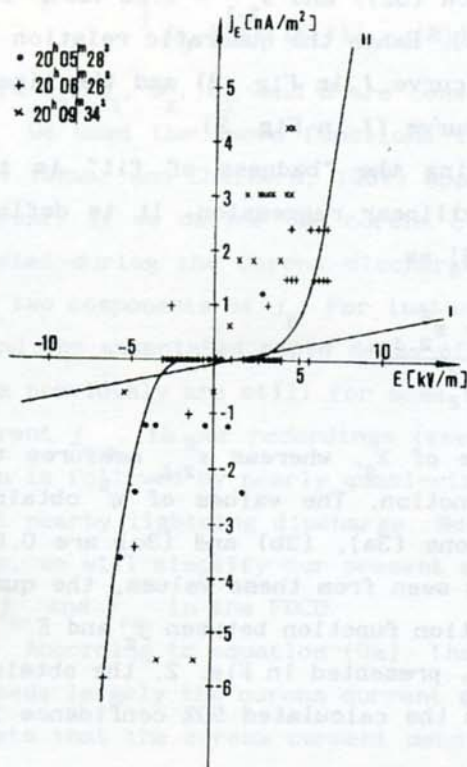


Fig. 2. The values of the estimated field-dependent current density  $j_E$  versus the corresponding values of electric field  $E$  measured at successive 1-s, 2-s or 2.5-s (according to the recovery rate) intervals after five lightning discharges on August 26, 1985. Lines I and II illustrate the quadratic and the straight-line approximation function

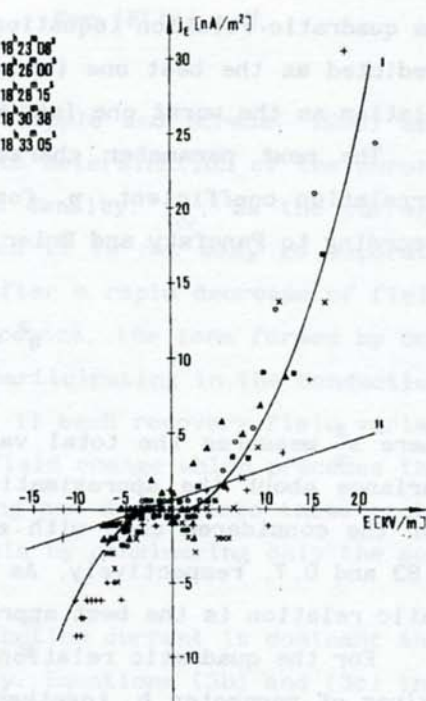


Fig. 3. The values of the estimated  $j_E$  versus the corresponding values of  $E$  at successive 2-s or 3-s (according to the recovery rate) intervals following three lightning discharges on August 18, 1985. The straight-line and the cubic approximation function are illustrated by I and II, respectively

with positive charge in the base. The recovery variations were examined as previously, and the values of estimated  $j_E$  and measured  $E$  are plotted in Fig. 3. Now  $N = 69$  and we obtained  $s_{2.1} = 1.49 \text{ nA/m}^2$  for the linear relation (equation (3a)),  $s_{2.1} = 1.6 \text{ nA/m}^2$  for the quadratic re-

lation (equation (3b)) and  $s_{2.1} = 1.73 \text{ nA/m}^2$  for the cubic relation (equation (3c)). The values of  $\eta^2$  for the considered approximation functions according to equations (3a), (3b) and (3c) are 0.48, 0.4 and 0.3, respectively. Hence, the linear relation appears to be the best one (shown by curve I in Fig. 3) and the cubic relation the worst one (shown by curve II in Fig. 3).

Coefficients together with the calculated 90% interval (Pollard, 1977) for the linear relation presented in Fig. 3 are:

$$b_0 = -0.079 \pm 0.38 \text{ nA/m}^2 \text{ and } b_1 = (0.212 \pm 0.054) \cdot 10^{-12} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}.$$

Very large confidence interval for  $b_0$  is caused by large dispersion of values  $j_E$ , as it is seen in Fig. 3.

### 3. Discussion and remarks

The square function is the best fitted relation between  $j_E$  and  $E$  for the recording of August 26, 1985, and is of the same shape as that obtained by Whipple and Scrase (1936) for quasi-stationary conditions. Thus, we may infer that for the considered case the corona discharges from some metallic objects on the roof of the building affected our electric field data more strongly than the corona discharges from trees and other natural vegetation objects surrounding the measuring site.

The dispersion of data in Fig. 2 might be expected because our data concern instantaneous variations of  $E$  and changes in convection current were neglected (equation (1)). Data from the second group of discharges with smaller amplitudes of  $\Delta E$  and  $E_0$  are best approximated by the other, this time linear relation shown in Fig. 3. The dispersion is observed as well. In that case the corona current may coexist with the conduction current. The obtained linear relationship for  $j_E(E)$  gives a possibility to make a rough estimation of the total conductivity  $\lambda_t = \lambda_+ + \lambda_-$  at the measuring site; the result is:  $\lambda_t = 2.12 \cdot 10^{-13} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ . A similar estimation was done by Krider and Musser (1982) and



the limitation of that approach was considered in details by Blakeslee (1984).

Using curve I of Fig. 2, the largest approximated value of estimated  $j_E$  is about  $30 \text{ nA/m}^2$ . It corresponds to the largest value of  $E = \Delta E - E_0 = 22 \text{ kV/m}$  just after the field jump. For such a value of  $j_E$ , the corona current density  $j_{cr}$  is dominant. Linear relation (curve II of Fig. 2), which is adopted for all values, does not approximate the conduction current because it was estimated in the range of  $E$  larger than the corona threshold values, i.e.,  $|E| > |M|$ . Thus, for  $|E| > |M|$ , we can write:

$$j_E \cong j_{cr} = k E \rho \quad (4)$$

where  $k$  is the mobility of ions. Because  $j_{cr}$  is the unipolar current, relation (4) enables us to estimate the space charge density just after its creation by corona. Assuming for negative ions  $k = -2.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$  and neglecting the attachment of ions to aerosol particles within 30 s after their creation (Adkins, 1959), we get the negative space charge density  $\rho = -6 \text{ nC/m}^3$  with  $E = 22 \text{ kV/m}$  and  $j_E \cong j_{cr} = 30 \text{ nA/m}^2$ . The above value of  $\rho$  corresponds to its transient value just after the large jump of the electric field. Similarly, for the negative values of  $E$  approaching sometime later the quasi-steady value  $E_0 = -10.45 \text{ kV/m}$ , the estimated  $j_E \cong j_{cr}$  is  $-8.5 \text{ nA/m}^2$ . With  $k = 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$  and without processes of ions attachment in time interval less than 30 s, the corresponding positive space charge density is  $\rho = +4 \text{ nC/m}^3$ . This value is of the same order as that given by Chauzy and Raizonville (1982).

The errors of the calculated values of the space charge density can be obtained from the expression  $|\Delta\rho| = |\Delta j_E|/kE + |\Delta E|j_E/kE^2$  derived from equation (4). Here  $|\Delta j_E|$  should be taken as  $s_{2.1}$  for quadratic relation in Fig. 2 and  $|\Delta E|$  is the precision of our measurements of the electric field, and is down 5%.

Then for  $|\Delta j_E| = 2.26 \text{ nA/m}^2$ ,  $k = -2.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$  and  $E = 22 \text{ kV/m}$ ,  $|\Delta\rho_-|$  is  $0.6 \text{ nC/m}^3$ . The same calculation is carried out for  $|\Delta j_E| = 2.26 \text{ nA/m}^2$ ,  $k = 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$  and  $E = -10.45 \text{ kV/m}$ . Then  $|\Delta\rho_+|$  equals

1.6 nC/m<sup>3</sup>.

The validity of equation (1) is based on the assumption that the Maxwell current density at the ground level in the time interval between lightning flashes is quasi-static. The direct measurements of this current density  $j_M$  carried out by Blakeslee (1984) and Krider and Blakeslee (1985) have confirmed such a quasi-static behaviour of  $j_M$ . For the considered by us thunderstorms we did not have at our disposal such measurements of  $j_M$  carried out simultaneously with the field mill recordings to indicate directly a quasi-stationary course of  $j_M$  in the time interval between the successive near lightning flashes.

We are able, however, to show that the above-mentioned assumption is also fulfilled during our recordings. We can compare two values of  $j_M$  estimated from each recovery curve: one for time  $t = t_0$  (when  $E$  crosses zero line), i.e.,  $j_M(t_0) \cong \epsilon_0(\partial E/\partial t)_{t_0}$  and the other for time  $t = t_s$  (when  $E$  approaches a quasi-static value and  $(\partial E/\partial t)_t \cong 0$ ), i.e.,  $j_M(t_s) \cong j_E(t_s)$ . So, e.g., for the first discharge of Fig. 1 (lower part) we obtained  $j_M(t_0) \cong -8.3 \text{ nA/m}^2$  and  $j_M(t_s) \cong -8.5 \text{ nA/m}^2$ . The same situation exists for other discharges examined in Fig. 1. For all those cases the numerical values of  $j_M(t_0)$  and  $j_M(t_s)$  are nearly the same. The small differences between them could be due to the time fluctuations of the convection current density  $j_{cv}$ .

An asymmetry of corona threshold values for positive and negative electric field values ( $\Delta E - E_0$ ) and threshold dispersion for individual flashes seem to be related to the upward transport of  $\rho$  of opposite sign to the polarity of  $\rho$  formed after previous discharges. Besides, in these differences the local environmental configuration around the measuring site is probably involved, as the electric field sensor is installed at different height than the points which produce the corona charge (Michnowski, 1955).

The differences in parameter  $|b_2|$  that describes the rate of increase for quadratic function  $j_E(E)$  are remarkable. This parameter is larger (see Fig. 2) for positive values of  $(\Delta E - E_0)$  than for negative ones. This is due to the still existing corona space charge which has been created before the considered flashes. Just after flashes this



space charge accelerates the production of new corona charges, with the polarity reverse to the previous one, by increasing the electric field around the discharging points. The same trend could be observed for the second group of discharges under study.

An interesting feature is observed for the groups of points representing the same value of  $j_E$  for  $E$  changing over a quite large range of values. This may happen at different levels of  $j_E$  and for different ranges of  $E$ , but occurs especially often for the data corresponding to that section of recovery curves which approaches  $E_0$ . Such groups of points with equal FDCD correspond to linear sections of recovery curve.

If the recovery curve is convex instead of concave, the differences in the displacement currents (see eq. (2)) have opposite sign to the sign of  $E$ . Such shapes of recovery curves observed previously by Michnowski (1974) might exist on account of strong convection currents directed against the electric field.

The results that we have presented are limited to the single measuring site at the earth surface. Nevertheless, it seems useful to consider the dispersion of  $j_E$  raised up by the convection current density which cannot be negligible compared to the change in the displacement current density.

Using the obtained values of FDCD as a function of  $E$ , we can estimate the characteristic velocity for a convection air motion  $|\bar{v}|$ . Here we do not specify the direction of the air motion, using only the absolute value of its velocity. We do not have any data from the vertical wind distribution near the earth surface at that time. But it is reasonable (see, e.g., Standler and Winn, 1979; Standler, 1980; Krider and Musser, 1982) to expect that a vertical mechanical transport of space charge, even in time without heavy precipitation, is due to the air turbulence at the ground level. With a view to the turbulent nature of that electric charge motion near the earth surface, the limited area in which the corona occurs beneath a thundercloud, and the short time interval (of the order of few tens of seconds) taken into analysis, it is more adequate from the point of view of single-point electric field measurements to consider the above charge transport as a flow of sepa-

rate charge parcels driven by eddies than as a movements of a whole, homogeneous, broadly extended space charge layer. Thus, that form of the convection current can influence the surface electric field both when it brings the electric charges down to the ground or aloft, towards a thundercloud. Assuming that  $s_{2.1} \cong |\Delta j_{cv}|$  we can get  $|\bar{v}|$  from the relation  $|\Delta j_{cv}| = |\bar{\rho}\bar{v}|$ , where  $\bar{\rho}$  denotes the mean value of space charge density. Then for the quadratic relation (see Fig. 2) when  $s_{2.1} = 2.26 \text{ nA/m}^2$  and  $|\bar{\rho}| = 5 \text{ nC/m}^3$  we obtain  $|\bar{v}| = 0.45 \text{ m/s}$ .

This result agrees well with the value  $|\bar{v}| = 0.4 \text{ m/s}$  reported by Standler and Winn (1979) as a characteristic velocity of eddies driven by convection air motions accompanying the thunderstorm. Additionally, our recent estimates (Barański and Michnowski, 1990), using simultaneous surface measurements of  $j_M$  and  $E$ , also show that the value of  $j_{cv}$  is of the order of a few nanoamperes per square meter.

#### R e f e r e n c e s

- Adkins C. J., 1959, *The small-ion concentration and space charge near the ground*, Q. J. R. Met. Soc., 85, 237-252.
- Barański P., 1985, *Effect of precipitation on the electric field variations of thunderclouds observed at the ground*, Przegl. Geofiz., 30, 161-175.
- Barański P., and Michnowski S., 1990, *The vertical convective current density estimation and the electric field and Maxwell current density changes at the earth surface*, Ann. Geophys., special issue - - XVth General Assembly of EGS, Copenhagen, sIII, 1-6, 272.
- Blakeslee R. J., 1984, *The electric current density beneath thunderstorms*, Ph.D. Thesis, Univ. of Arizona.
- Chalmers J. A., 1967, *Atmospheric Electricity*, 2-nd ed., Pergamon Press, New York.
- Chauzy S., and Raizonville P., 1982, *Space charge layers created by coronae at ground level below thunderclouds: measurements and modelling*, J. Geophys. Res., 87, 3143-3148.



- Chauzy S., and Soula S., 1987, *General interpretation of surface electric field variations between lightning flashes*, J. Geophys. Res., 92, D5, 5676-5684.
- Jhwar D. S., and Chalmers J. A., 1967, *Point-discharge currents through small trees in artificial fields*, J. Atmos. Terr. Phys., 29, 1459-1463.
- Kasemir H. W., 1978, *Corona discharge and thunderstorm fields*, Proc. Conf. on Cloud Phys. and Atmosph. Electr., Issaquah, Washington, Amer. Met. Soc., 569-573.
- Krider E. P., and Musser J. A., 1985, *Maxwell currents under thunderstorms*, J. Geophys. Res., 87, C13, 11171-11176.
- Krider E. P., and Blakeslee R. J., 1985, *The electric currents produced by thunderclouds*, J. Electrostat., 16, 369-378.
- Michnowski S., 1955, *The influence of point-discharge currents on the earth electric field*, Acta Geophys. Pol., 4, 115-130.
- Michnowski S., 1974, *An analysis of electric field variation following lightning discharges*, Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci., 81, 1-104.
- Panofsky H. A., and Brier G. W., 1958, *Some applications of statistics to meteorology*, Pennsylvania State Univ., University Park.
- Pollard J. H., 1977, *A handbook of numerical and statistical techniques*, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Standler R. B., 1980, *Estimation of corona current beneath thunderclouds*, J. Geophys. Res., 85, 4541-4544.
- Standler R. B., and Winn W. P., 1979, *Effects of coronae on electric fields beneath thunderclouds*, Q. J. R. Met. Soc., 105, 285-302.
- Whipple F. J. W., and Scrase F. J., 1936, *Point discharge in the electric field of the earth*, Geophys. Mem. Lond., 68, 1-20.

Manuscript received 27 March 1991