

Burze i pioruny

Statystyka burz

Na kuli ziemskiej, w każdej chwili, trwa od dwóch do pięciu tysięcy burz. Co sekundę uderza gdzieś na Ziemi około 100 piorunów. Dwie trzecie z nich przeskakują między obłokami, pozostałe uderzają w powierzchnię planety. Każdy samolot pasażerski jest trafiany przez piorun średnio raz w roku – jak wiadomo, na ogół bez żadnej szkody.

- Tylko co 10 piorun jest doziemny.
- Wśród doziemnych 80% to wyładowania ujemne od chmury do ziemi.
- Pioruny oddolne powstają z wysokich wież, drzew itd.
- Prądy pioruna są zmienną losową o dziedzinie 1 do 250 kA.
- Przykład dla 50 kA na rezystancji 10Ω :
 - (a) moc $(50 \text{ kA})^2 10 \Omega = 25 \cdot 10^9 = 25 \text{ GW}$;
 - (b) napięcie $50 \cdot 10^3 10 = 500 \text{ kV}$;
 - (c) energia $25 \cdot 10^9 50 \cdot 10^{-6} = 125 \cdot 10^4 \text{ Ws} = 1250 \text{ kWs} = 0.35 \text{ kWh}$
(bardzo krótki czas trwania, rzędu mikrosekund)
- Zaobserwowano do 60 wyładowań wtórnych.
- Pożyteczne skutki burzy:

każdy piorun wytwarza 80 do 1500 kg tlenków azotu, które użyźniają glebę; 100 mln ton rocznie;

Początki badań mechanizmu wyładowań piorunowych

To, iż pioruny są potężnymi wyładowaniami elektrycznymi między chmurami a ziemią, wiemy od czasów Benjamina Franklina (1706 – 1790), który pod koniec lat 40-tych XVIII wieku robił swoje słynne doświadczenia z metalowym kluczem przymocowanym do linki latawca. Doświadczenia Franklina zaowocowały, między innymi wynalezieniem przez niego – w 1752 roku – piorunochronu, który to wynalazek rozpowszechniał się tak szybko, że w Warszawie w 1771 roku było już zainstalowanych 6 piorunochronów (nazywanych wówczas konduktorami), a w 1784 roku na polecenie Stanisława Augusta, zainstalowano piorunochron na wieży Zamku Królewskiego w Warszawie. Polski wkład w badania to książka księdza Osińskiego „Sposób ubezpieczający życie i majątek od piorunów” wydana w roku 1784.

Chmury

od góry

CIRRUS 10

CIRRO – STRATUS 9

CIRRO CUMULUS 8

CUMULO – NIMBUS

ALTO – STRATUS

ALTO – CUMULUS 5

STRATO – CUMULUS 4

NIMBO – STRATUS

CUMULUS 2

STRATUS 1 km

Zjawiska w chmurach

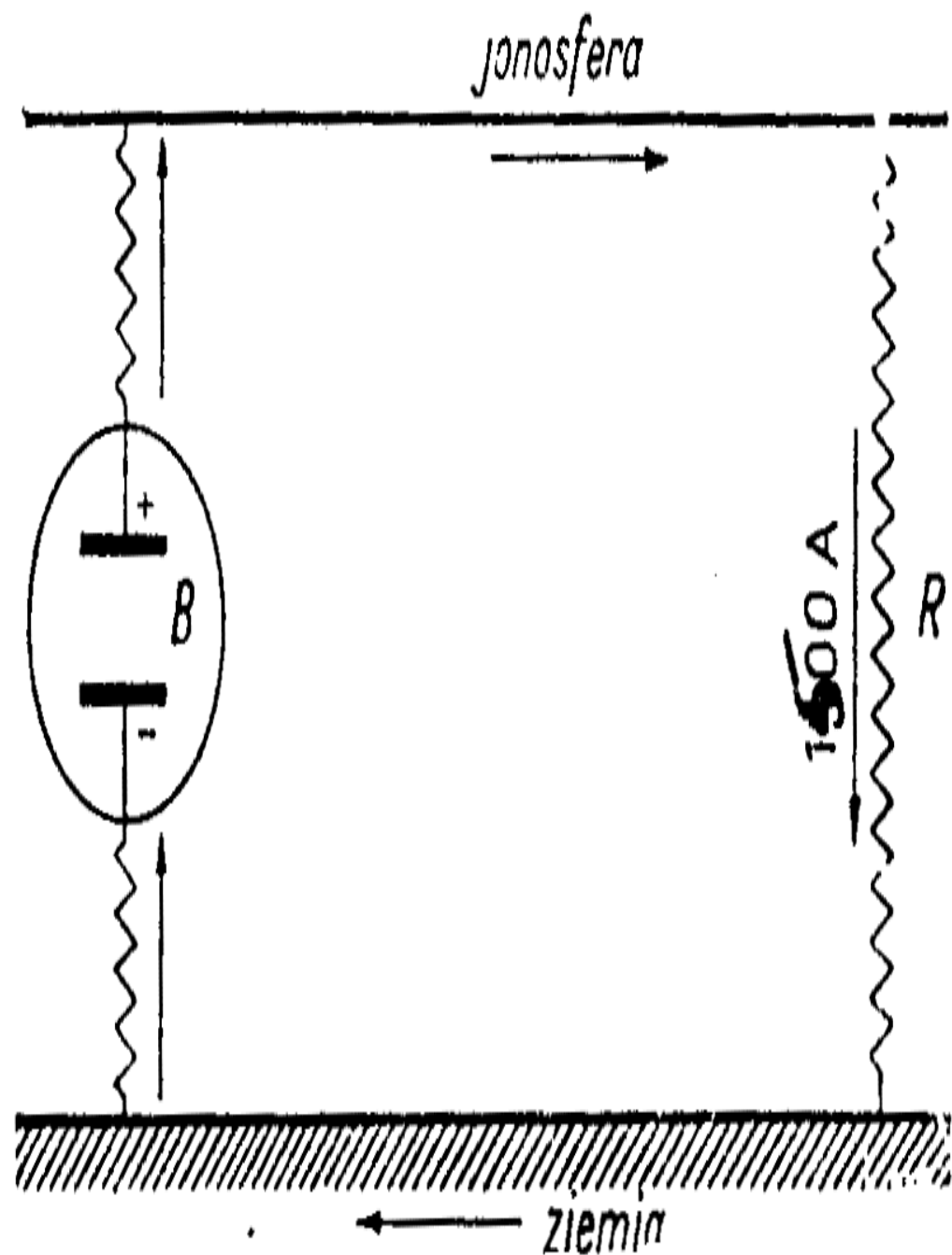
W powietrzu atmosferycznym zawsze i wszędzie znajdują się swobodne nośniki ładunku elektrycznego: jony ujemne (w tym swobodne elektrony) i jony dodatnie. Źródłem tych nośników ładunku jest fotojonizacja, zachodząca w następujących proporcjach, w zależności od źródła promieniowania jonizującego:

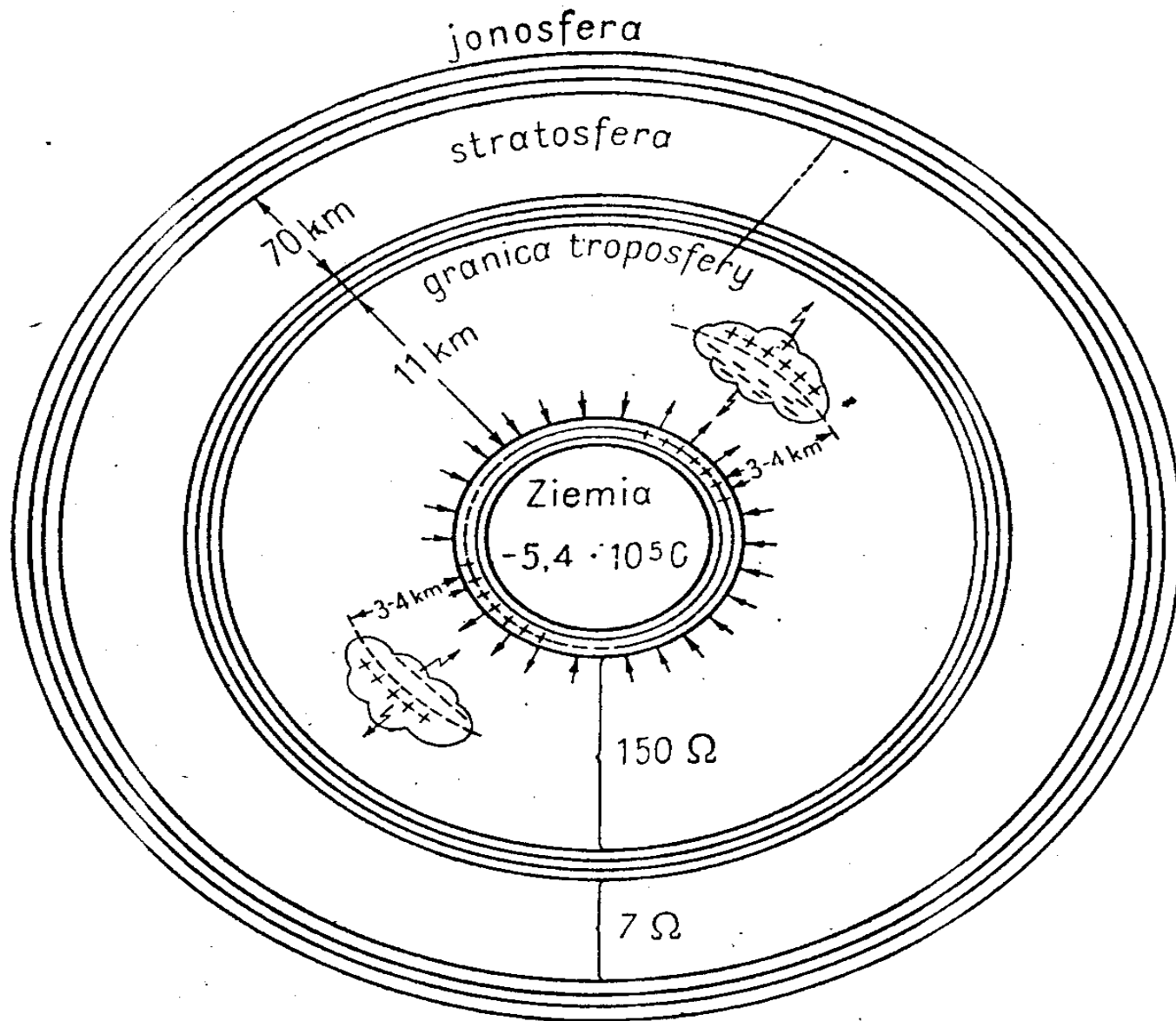
- promieniowanie kosmiczne ≈ 20%
- promieniowanie od pierwiastków promieniotwórczych znajdujących się w skorupie ziemskiej ≈ 30%
- promieniowanie od pierwiastków promieniotwórczych znajdujących się w powietrzu ≈ 50%
- promieniowanie słoneczne, ultrafioletowe powoduje dodatkową fotojonizację na dużych wysokościach; na nizinach ten rodzaj fotojonizacji ma niewielki wpływ wskutek pochłaniania tych zakresów promieniowania przez atmosferę.

Na nizinach, w przybliżeniu, powstaje około 10 jonów na cm^3 i na sekundę. Natomiast gęstość jonów jest rzędu 1000 jonów na cm^3 .

Zatem w powietrzu atmosferycznym ładunki elektryczne są zawsze. W związku z tym pomiędzy warstwą zjonizowanego powietrza, występującą na wysokości około 80 km, zwaną jonosferą, a ziemią płynie nieprzerwanie prąd elektryczny o natężeniu szacowanym na około $3 \cdot 10^{-6}$ A/km², co daje sumaryczny prąd szacowany dla całej kuli ziemskiej na poziomie około 1500 A. Jeśli na drodze tego prądu znajdzie się chmura o odpowiednich właściwościach to może ona gromadzić ładunek elektryczny stając się odpowiednikiem kondensatora w obwodzie elektrycznym. Ilustrują to poniższe rysunki. Wyładowanie w tym kondensatorze to właśnie wyładowane atmosferyczne.

Rys. 57. Układ zastępczy dla przestrzeni jonosfera—Ziemia. Obszary działalności burzowej przedstawione są jako kondensator B , na okładzinach którego zbierają się ładunki. Ładunki te przez opór elektryczny, jaki stawia atmosfera, dochodzą do jonosfery i Ziemi ładując je. Układ jonosfera—Ziemia wyładowuje się przez opór atmosfery R w obszarach pięknej pogody (rys. P. Twierskoj)



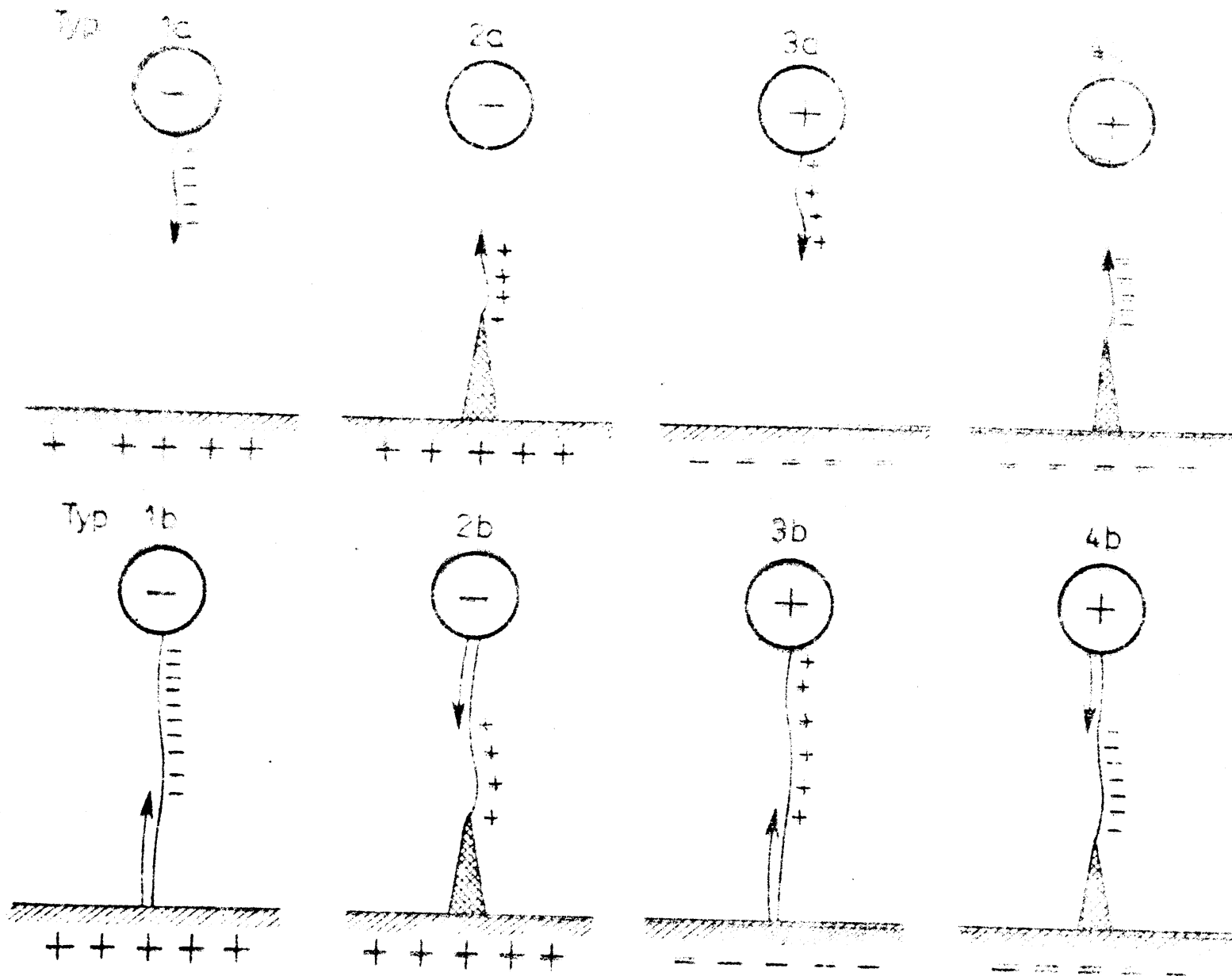


Rys. 55. Kula ziemiska jako okładzina kondensatora (według J. Stiecolnikowa). Drugą okładziną jest jonosfera na wysokości około 80 km. Kondensator jest ładowany przez chmury burzowe. (Uwaga: ze względu na wielkość rysunku nie można było narysować w skali odległości Ziemia-jonosfera)

Mechanizm wyładowań atmosferycznych

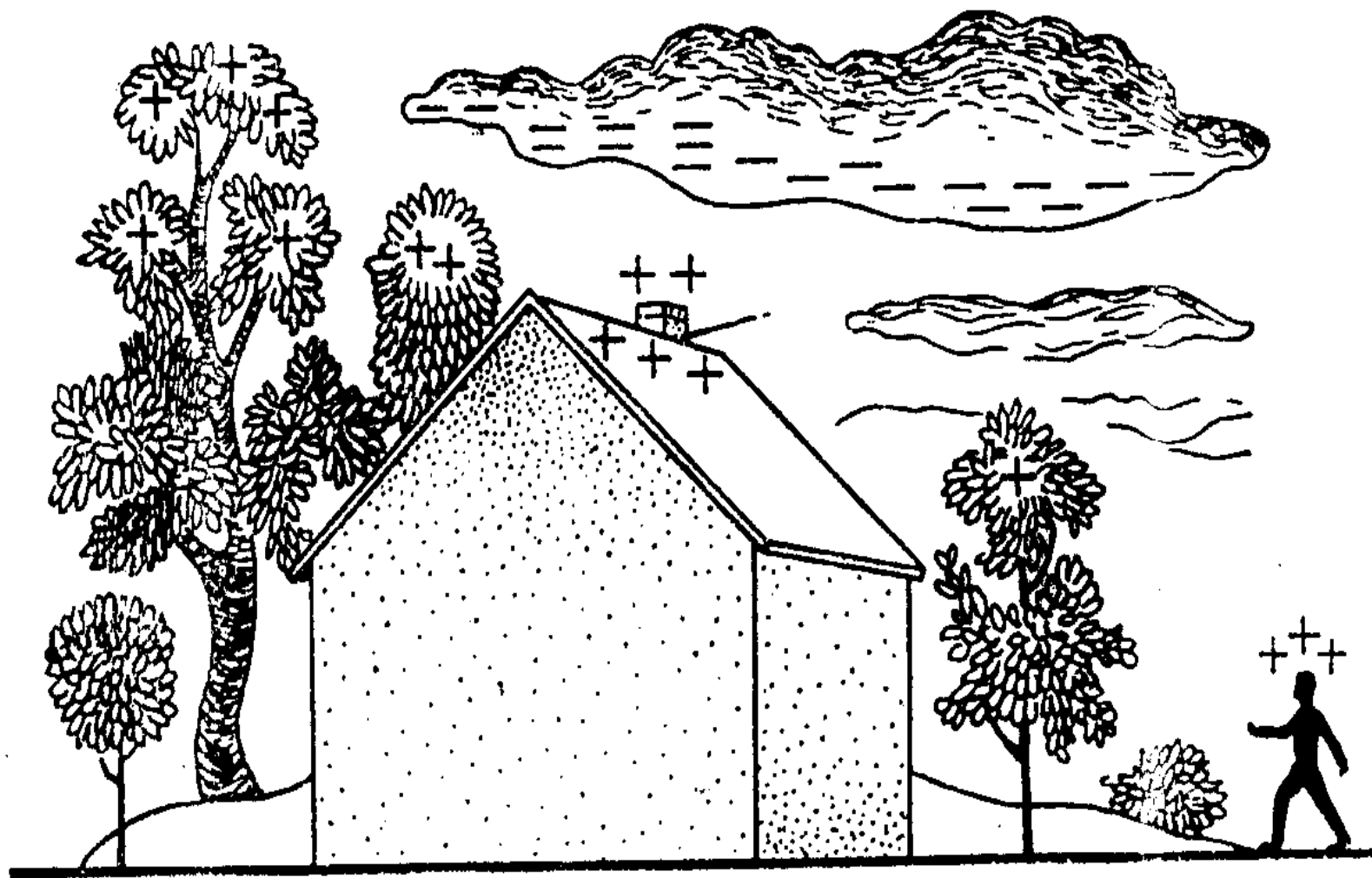
Zatem piorun jest wyładowaniem elektrycznym charakteryzującym się dużą wartością prądu, a polegającym na rozładowaniu się ładunku elektrostatycznego między chmurą, a ziemią lub między dwoma chmurami.

Rodzaje wyładowań doziemnych zestawia rys. B-3. Najczęstszym typem wyładowania jest typ 1 z tego rysunku. Ten rodzaj wyładowania zachodzi w 90% przypadków na terenach równinnych i przy obiektach o wysokości do kilkudziesięciu metrów. Zatem najczęściej ten przypadek jest brany pod uwagę przy omawianiu mechanizmu wyładowań atmosferycznych. Nie oznacza to jednak, że w pozostałych przypadkach mechanizm jest identyczny.

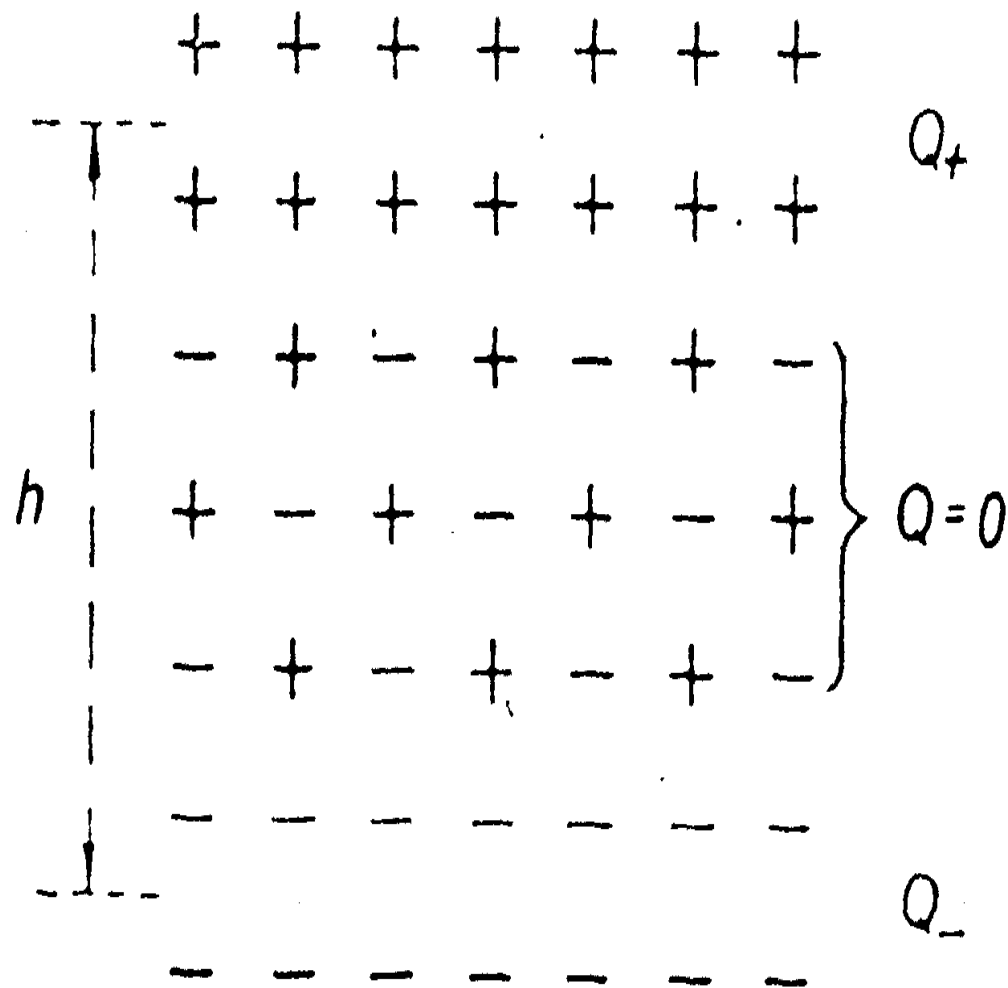


Rys. B_3 Rodzaje wyładowań doziemnych

Mechanizm, wskutek którego chmura burzowa staje się naładowana elektrycznie nie jest jeszcze do końca wyjaśniony. Jednakże wiadomo, że kryształki lodu znajdujące się w górnych partiach chmury są naładowane dodatnio, natomiast małe kropelki wody, zbyt ciężkie by wznosić się ku górze i zbyt lekkie by szybko opaść na ziemię, posiadają ładunek ujemny. Ponieważ przy tym chmura nie jest tworem jednorodnym i w różnych częściach chmury ruchy powietrza odbywają się z różną prędkością i w różnych kierunkach, więc różne obszary w chmurach mogą mieć różne potencjały elektryczne. Jednak, ogólnie rzecz biorąc, chmura burzowa posiada w swej górnej części obszary z nadmiarem ładunków dodatnich, a w dolnej ujemnych. Mówiąc językiem elektrostatyki chmura zawiera dipole elektryczne. Pokazują to poniższe rysunki.



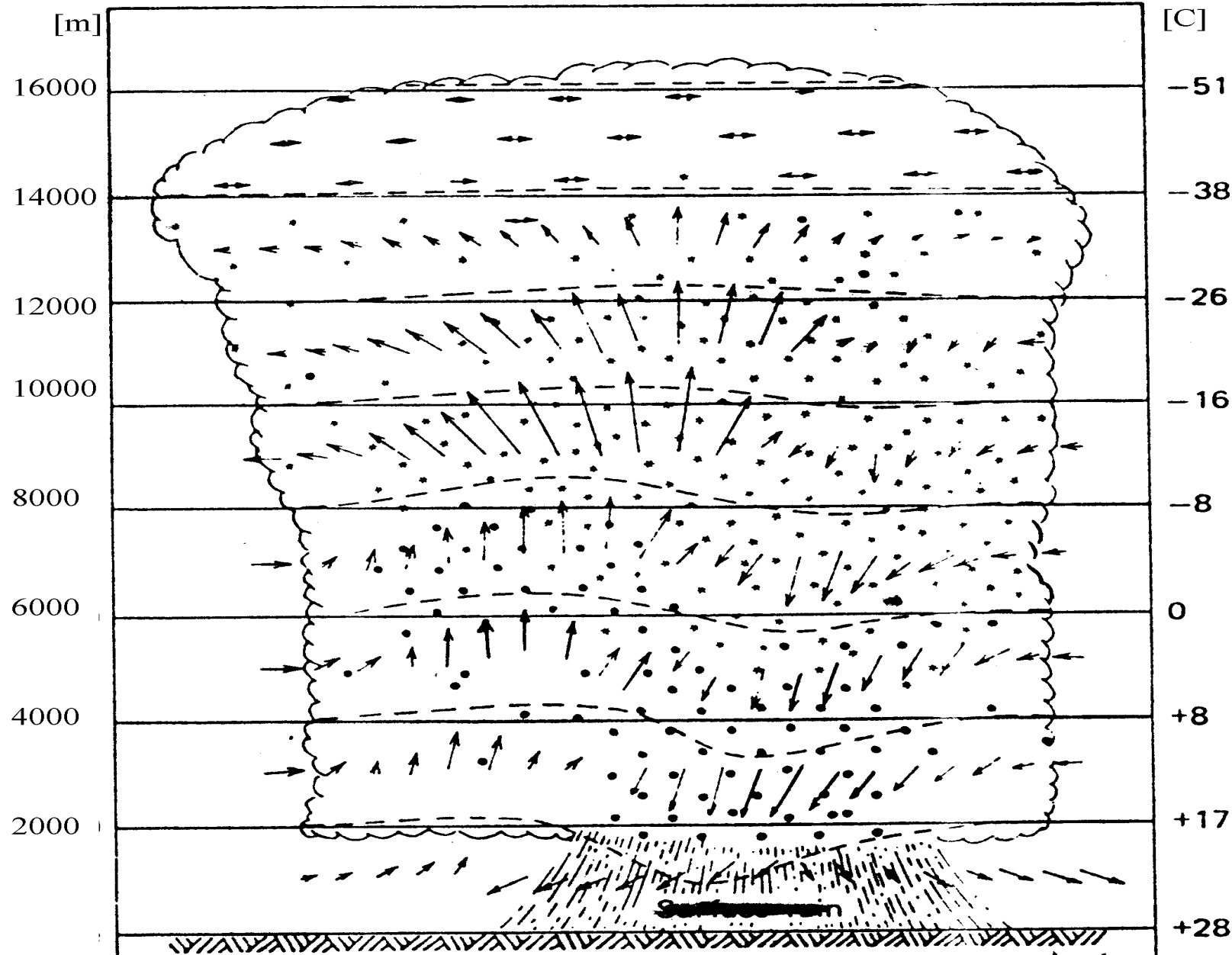
Rys. 9. Układ chmura—ziemia jako kondensator elektryczny. Ładunki dodatnie zbierają się nie tylko w gruncie, ale i w przewodzących lub w półprzewodzących przedmiotach połączonych z ziemią, jak drzewa, dachy, ludzie
(rys. z książki I. Stiekolnikowa „Boure a wichry”)



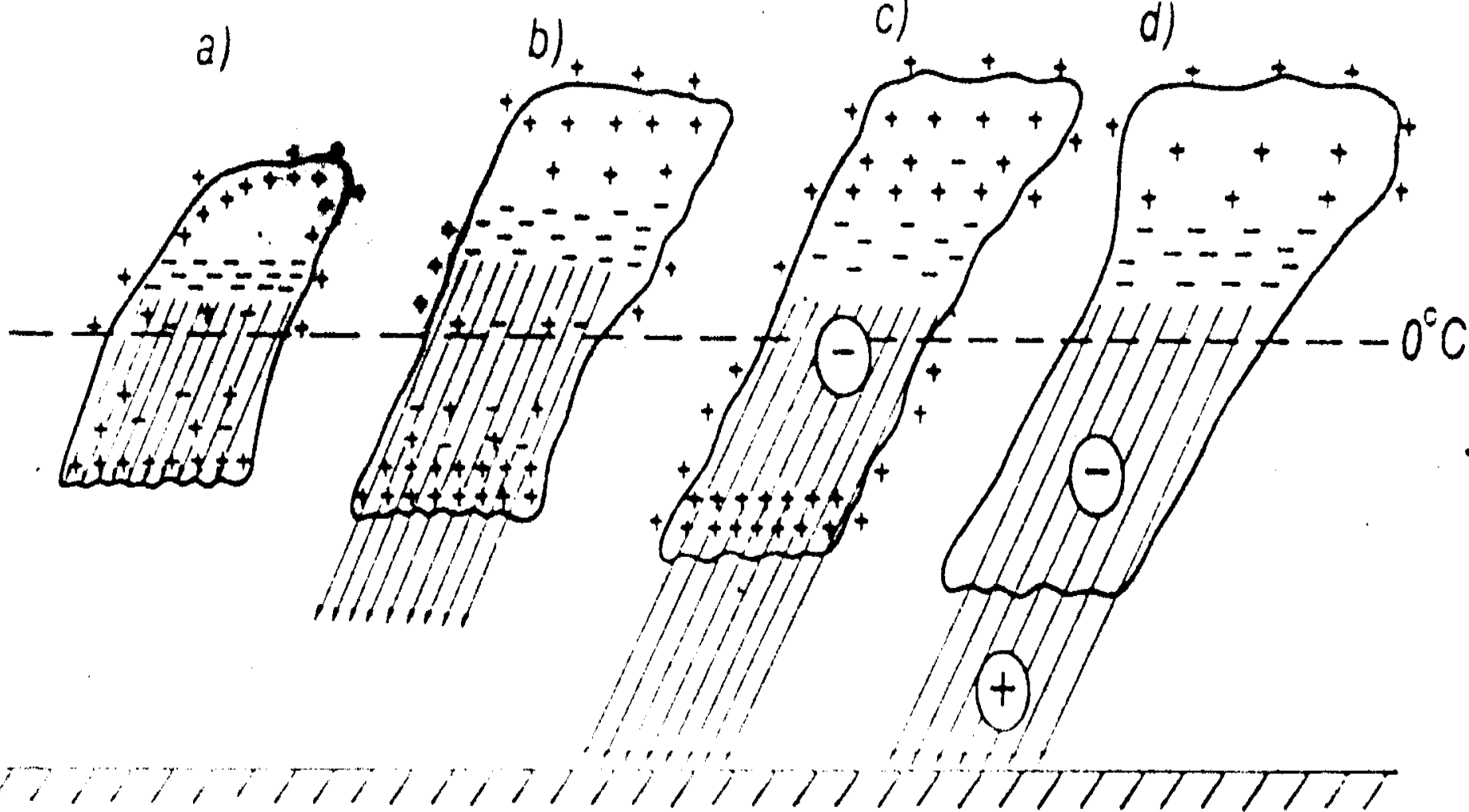
Rys. 2.3. Schemat tworzenia się chmur spolaryzowanych elektrycznie.

Q_+ i Q_- – ładunki elektryczne skupione w górnej i dolnej części chmury.

Schematyczny obraz ruchu cząstek, w zależności od temperatury i wysokości pokazuje rys. B-6, dla chmury burzowej w stanie dojrzałym. Należy zauważyć, że separacja ładunku jest związana z przechłodzeniem, a nawet zamrożeniem kropelek wody. Skłonność do powstawania centrów ładunku jest częściowo spowodowana cyrkulacją pionową, do i odgórnią. Właściwości chmury burzowej zestawiono w tabeli B-1.

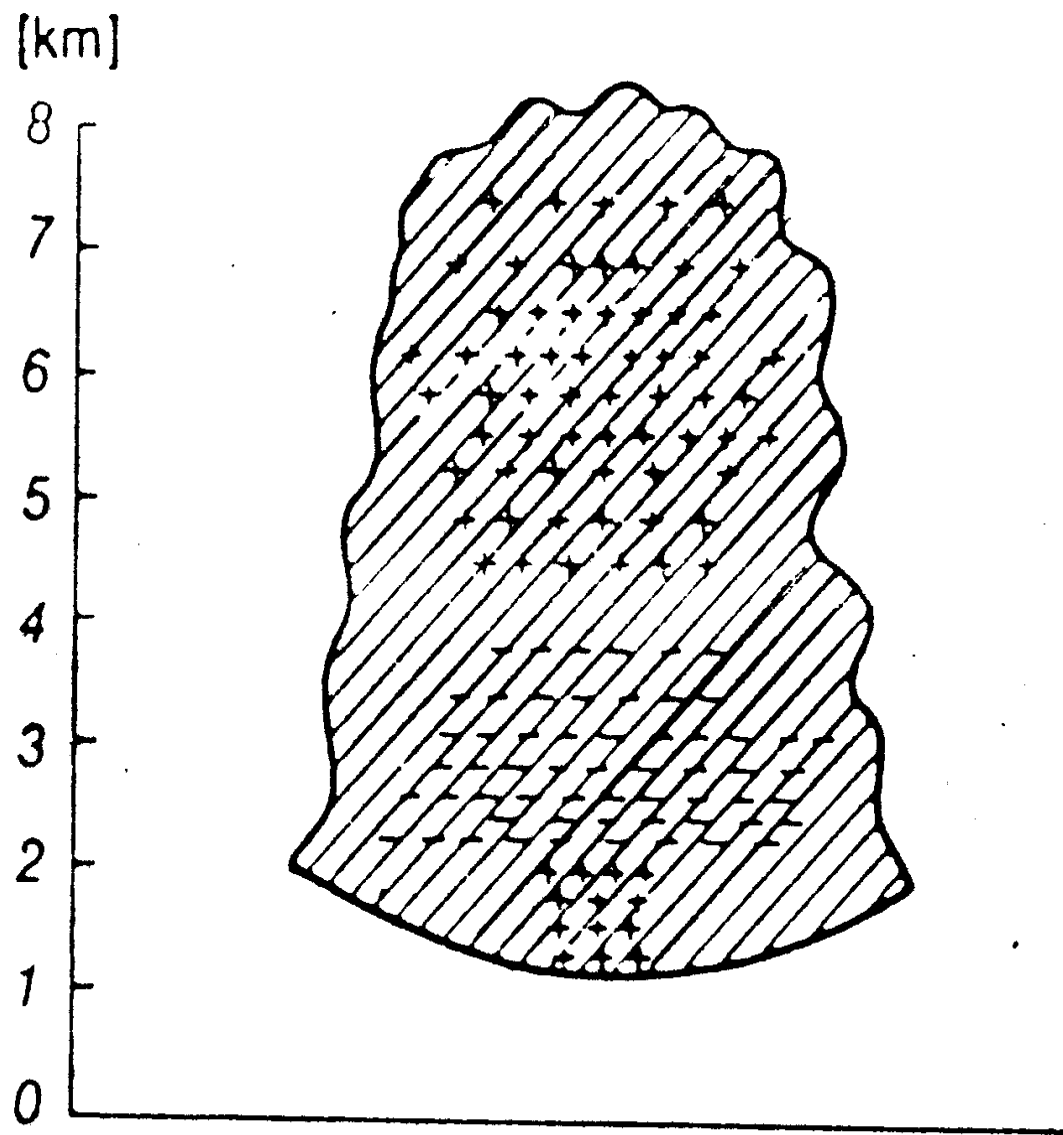


Rys. B_6 Idealizowana chmura burzowa w stanie dojrzałym : • deszcz, * śnieg, ↔ kryształki lodu.



Rys. 2.4. Schemat ładowania kłębiastej chmury deszczowej (według I. Imianitowa).

a, b, c, d – kolejne etapy wypadania opadów.



Rys. 1.10. Struktura elektryczna kłębiastej chmury deszczowej.

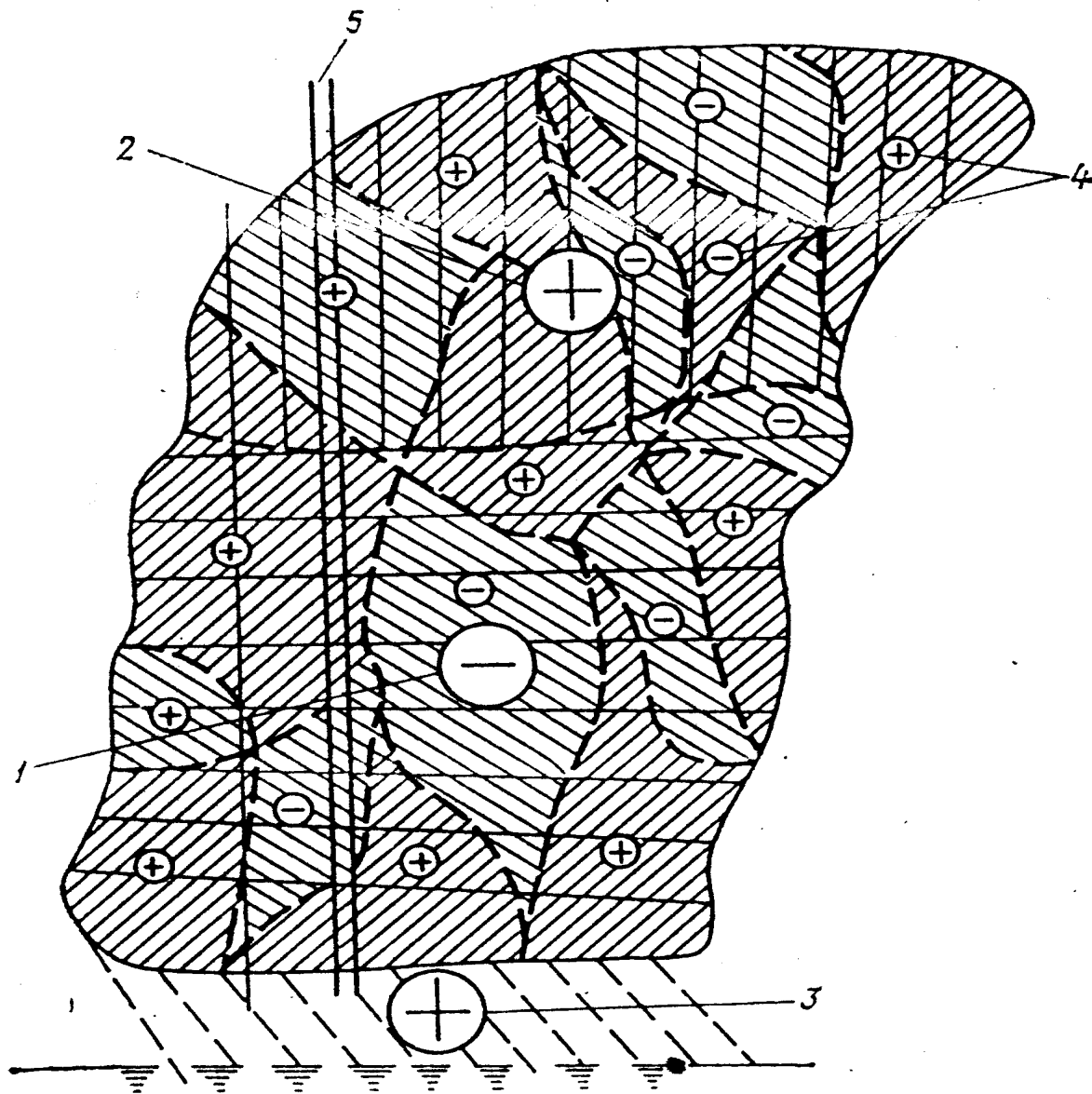


Рис. 1.1. Статическая модель грозового облака в стадии зрелости.

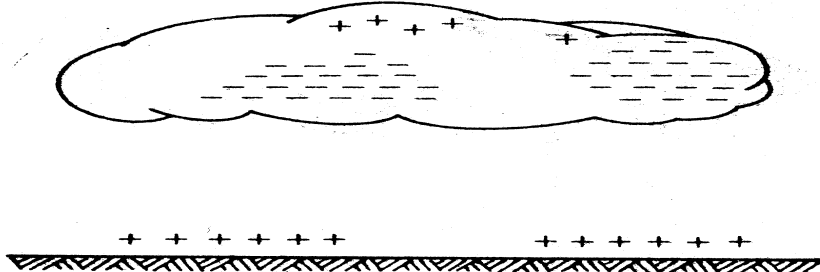
1 — основной электрический заряд облака, 2 — заряд, создаваемый за счет электропроводности атмосферы, 3 — заряд осадков, 4 — заряд электрических неоднородностей облака, 5 — столб единичного сечения.

Tabela B-1

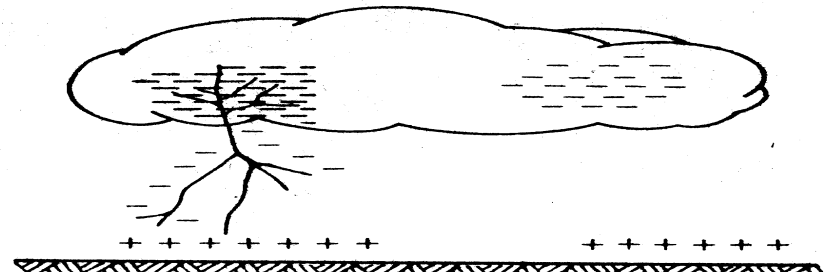
Właściwości elektryczne chmur burzowych

Średnia wartość podstawowych ładunków chmury	C	10 do 13
Średnie prądy – nad chmurą	A	0.05 do 1.00
w chmurze	A	10 do 100
Przewodność elektryczna	S/m	10^{-13} do 10^{-12}
Skrajne wartości natężenia pola elektrycznego		
średnio w chmurze	kV/cm	1
w strefach niejednorodności	kV/cm	10
Minimalne natężenie pola, od którego rozpoczyna się wyładowanie	kV/cm	10
Minimalna energia obszaru, w którym rozpoczyna się wyładowanie	J	10^3
Minimalne wymiary obszaru, w którym rozpoczyna się wyładowanie	m	20
Minimalne natężenie pola konieczne do podtrzymania wyładowania	kV/cm	1

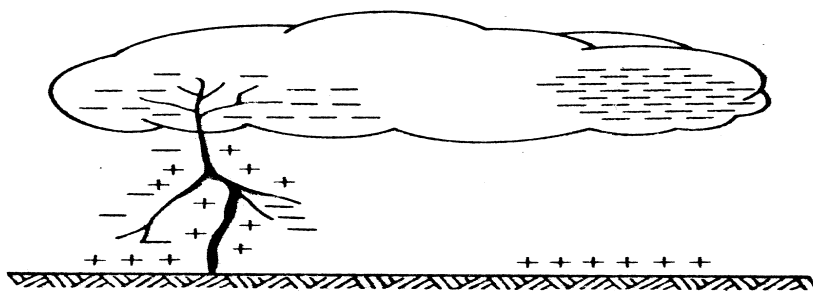
Gradient napięcia, czyli natężenie pola elektrycznego, w powietrzu między centrami ładunków w chmurze (lub w chmurach) lub między chmurą a powierzchnią ziemi, jest nierównomierny i jest tym większy im koncentracja ładunku jest większa. Gdy natężenie to osiągnie wartość z przedziału 5 do 10 kV/cm, to przy obecności kropeł wody znajdujących się w dolnej partii chmury, jest to wystarczające do zainicjowania pierwszego etapu wyładowania zwanego liderem skokowym lub stopowanym (rys. B-10 i B-11).



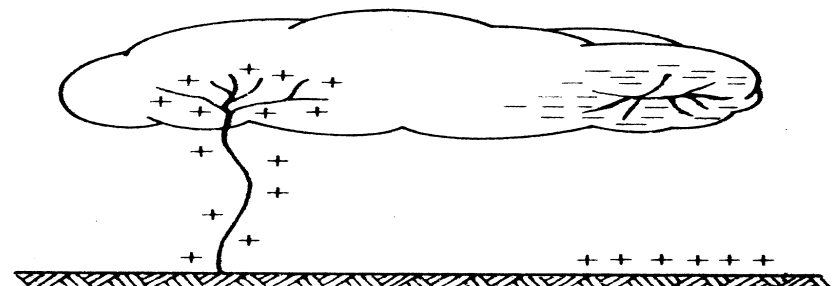
(a)



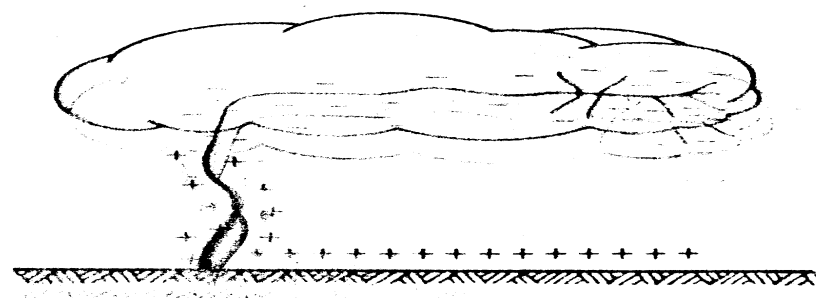
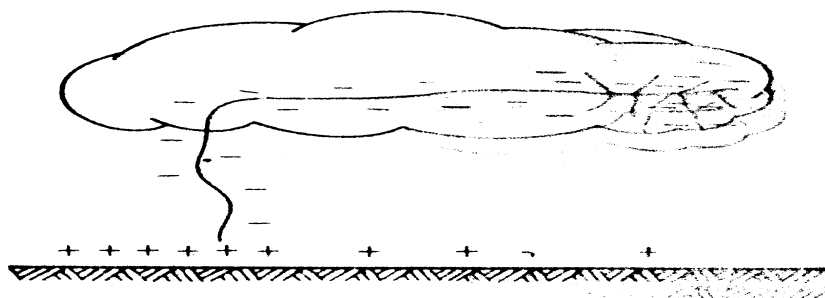
(b)



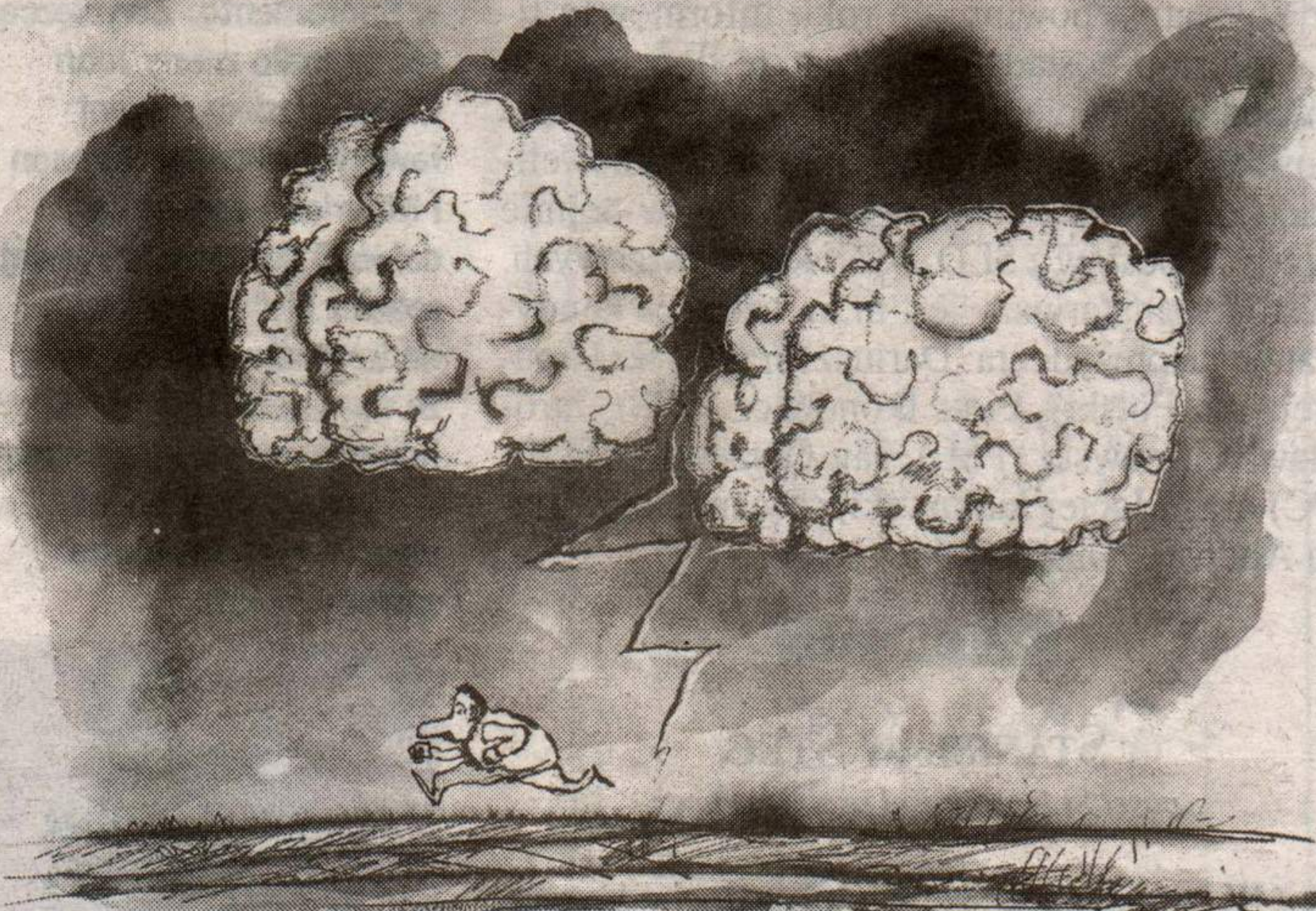
(c)



(d)

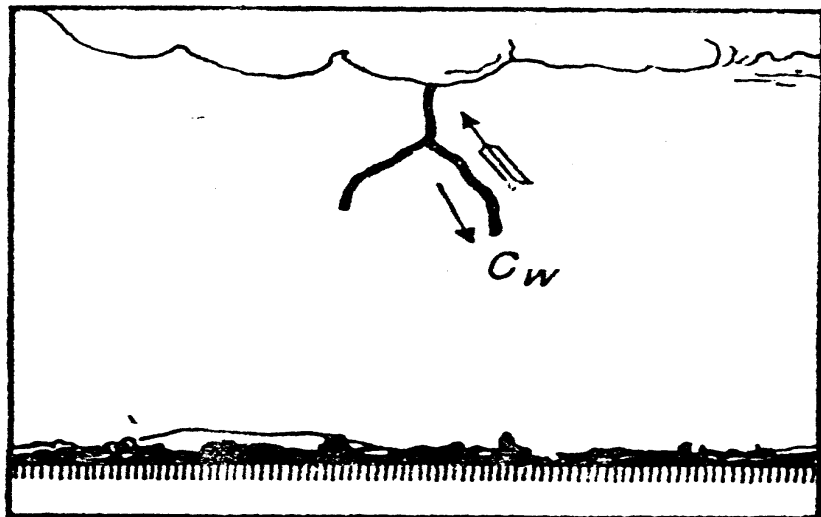


Rys. B-10 Etapy rozwoju lidera stopowanego

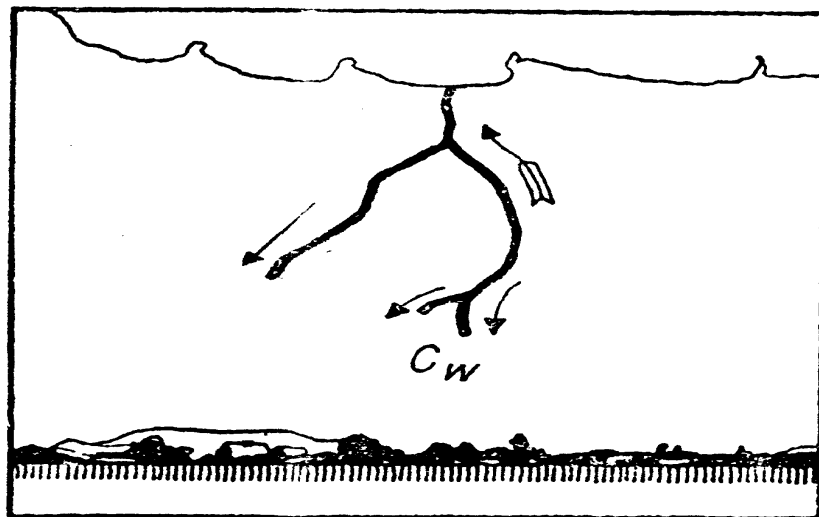


(BURZA MÓZGÓW)

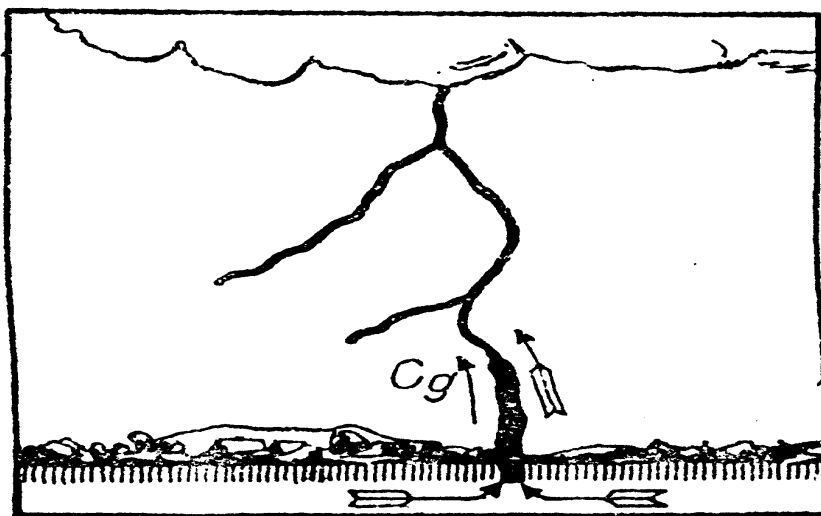
Barisk:



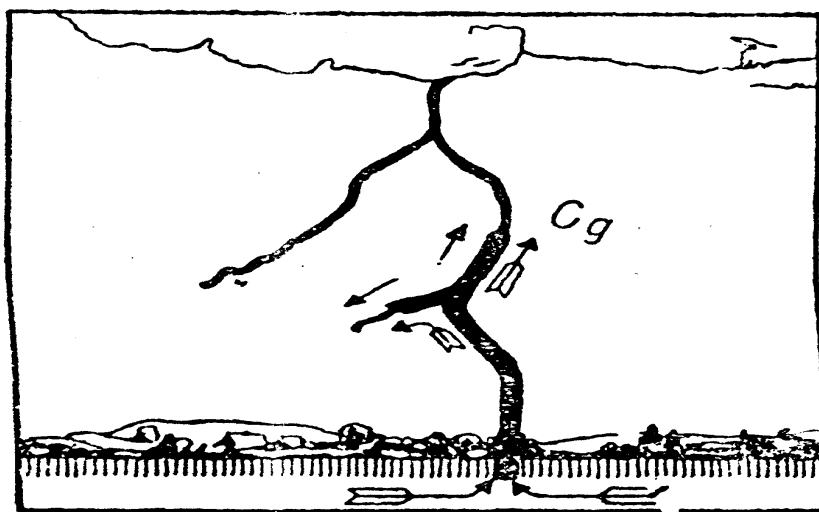
a



b



c



d

Rys. 12. Powstawanie wyładowania wstępnego (a, b) i głównego (c, d). Rysunek ten różni się od rys. 11 tym, że pokazano na nim zwykłymi strzałkami kierunek posuwania się czoła wyładowania wstępnego (oznaczenie C_w) i głównego (C_g), a strzałkami „upierzonymi” — kierunek prądu elektrycznego (kierunek zgodny z ruchem ładunku dodatniego, a przeciwny względem ruchu ładunku ujemnego)

To wyładowanie pilotujące – lider – porusza się szybkimi skokami po 50 do 100 m, z przerwami po każdym skoku, rzędu kilkudziesięciu mikrosekund. Z czoła wyładowania rozwija się tzw. pilotujący strimer, mający niewielką intensywność świecenia i prąd rzędu kilku amperów oraz prędkość około 10^5 m/s. Za pilotującym strimerem rozwija się skokowy lider o średniej prędkości około $5 \cdot 10^5$ m/s i prądzie paruset amperów. Prędkość lidera skokowego jest niemal 1000-krotnie mniejsza od prędkości światła ($3 \cdot 10^8$ m/s). Biorąc pod uwagę prędkość lidera skokowego można określić, że z chmury na wysokości 3 km wyładowanie osiąga powierzchnię ziemi po około 6 ms.

Gdyby sfotografować wylądowanie liderowe za pomocą kamery, to obraz mógłby wyglądać jak na rys. B-11, gdzie zaznaczono kolejne skoki lidera. Skoki te związane są z łączeniem się czoła lidera skokowego z tzw. liderem przestrzennym rozwijającym się przed liderem skokowym, w obu kierunkach (ku ziemi i ku chmurze).

Gdy lider stopowany jest odpowiednio blisko ziemi, wówczas od ziemi ku górze podnosi się wylądowanie dodatnie zwane strimerem, a następnie liderem dodatnim (rys. B-10b). Wylądowanie dodatnie od ziemi jest ułatwione przez punktowe wylądowania z uziemionych obiektów, takich jak wysokie budynki, drzewa czy słupy lub maszty.

Rys. B_11 Stylizowana "fotografia" wyladowania piorunowego w funkcji czasu [7,22]:
a) (1 do 4) - kolejne fazy rozwoju lidera stopowanego, b) (4 do 6) - rozwój wyladowania
głównego, c) obraz na błonie fotograficznej

Gdy dwa lidery, dodatni i ujemny, spotkają się, wówczas następuje wyładowanie zwane głównym lub powrotnym. Wyładowanie to rozwija się od ziemi ku chmurze, ze znaczną prędkością $5 \cdot 10^7 \div 10^8$ m/s, wzdłuż kanału utworzonego przez lider stopowany. Wyładowanie powrotne można obrazowo określić jako zwarcie elektryczne między ładunkiem ujemnym rozłożonym wzdłuż kanału lidera, a zaindukowanym w ziemi ładunkiem dodatnim.

Prąd wyładowania powrotnego jest rzędu kilku do nawet **250 kA**, a temperatura wewnątrz kanału osiąga **15000 do 35000 °C**. To właśnie wyładowanie powrotne jest odpowiedzialne za niszczące skutki pioruna, za jego intensywną jasność i wybuchową ekspansję powietrza. Podstawowe właściwości wyładowania skokowego i wyładowania głównego zestawiono w tabeli B-2

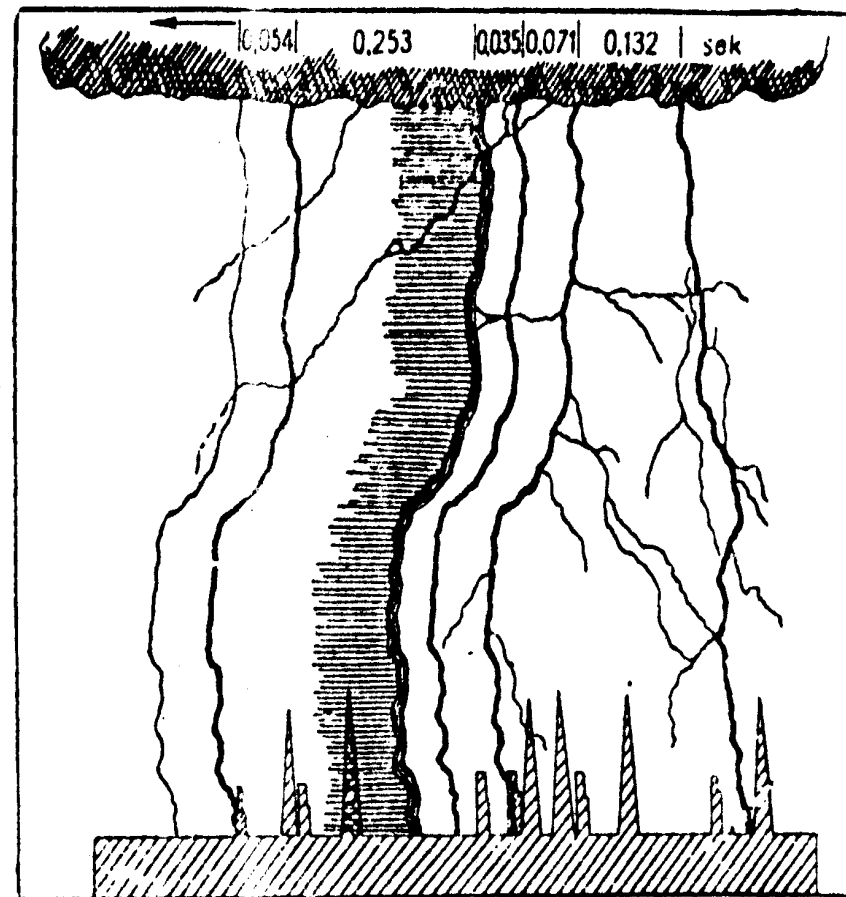
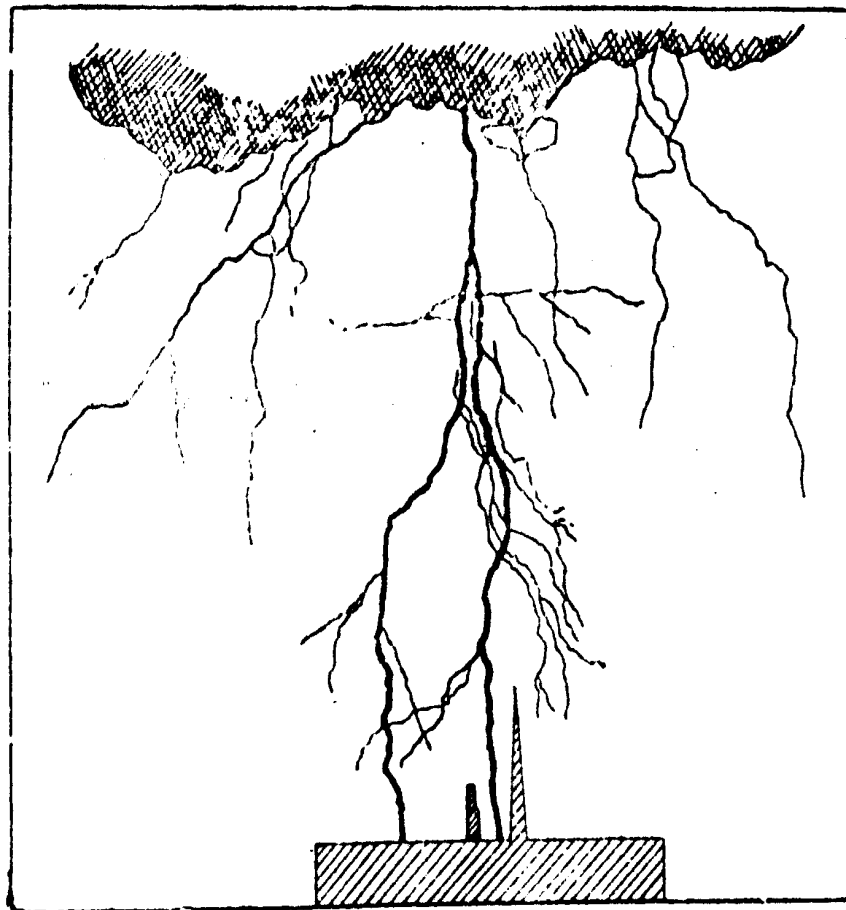
Podstawowe właściwości kanałów pioruna

Parametr	Jednostki	Minimum	Średnio	Maksimum
Długość	m	2000/3	5000/50	14000/200
Średnica kanału	m	0.01/1	0.075/5	0.15/10
Prędkość rozwoju	m/s	$2 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$1.4 \cdot 10^8$
Ładunek przenoszony wzdłuż kanału	C	0.2/3	2.5/5	20/20
Koncentracja swobodnych elektronów	el/m ³	$10^{23}/10^{17}$	$10^{24}/2 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{24}/10^{19}$
Temperatura kanału	K	22000	28000	35000
Wartość szczytowa prądu	kA	-	10 do 20	250
Czas do osiągnięcia maksimum prądu I_{\max}	μs	1	2	30
Czas przewyższenia prądu powyżej $0.5 I_{\max}$	μs	10	40	250

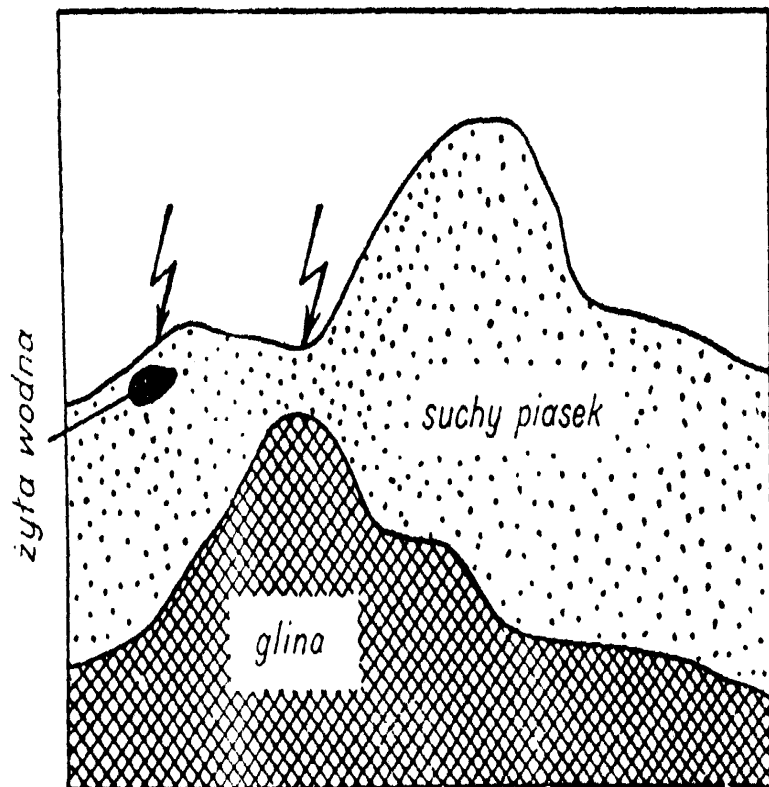
UWAGA: W liczniku podano parametry wyładowania głównego, a w mianowniku parametry lidera stopowanego, podając długość jednego stopnia.

Po wyładowaniu powrotnym następuje kilka do kilkudziesięciu wyładowań, w odstępach czasu 10 do 300 ms (rys. B-12). Lidery drugiego i następnych wyładowań nazywane są **liderami strzałowymi**. Lider strzałowy pokonuje ścieżkę pierwszego lidera skokowego 10 razy szybciej niż lider skokowy i biegnie do ziemi bez rozgałęzień. Po liderze strzałowym następuje kolejne wyładowanie główne itd.

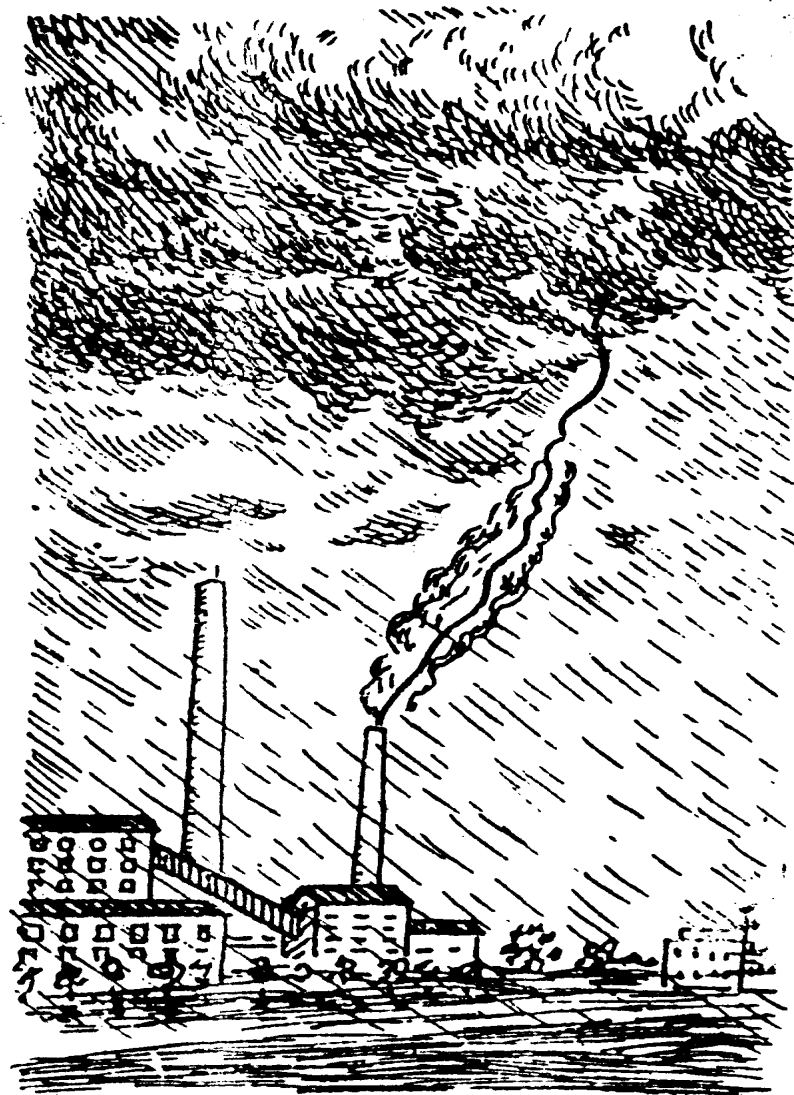
Pomiary prądów pioruna przy ziemi wykazały, że prąd pioruna charakteryzuje się szybkim narastaniem w czasach 1 do 10 μs (tzw. czas trwania czoła)(tab. B-2) i następnie stosunkowo wolnym opadaniem w czasie 50 do 1000 μs do osiągnięcia wartości odpowiadającej połowie wartości szczytowej (tzw. czas do półszczytu).



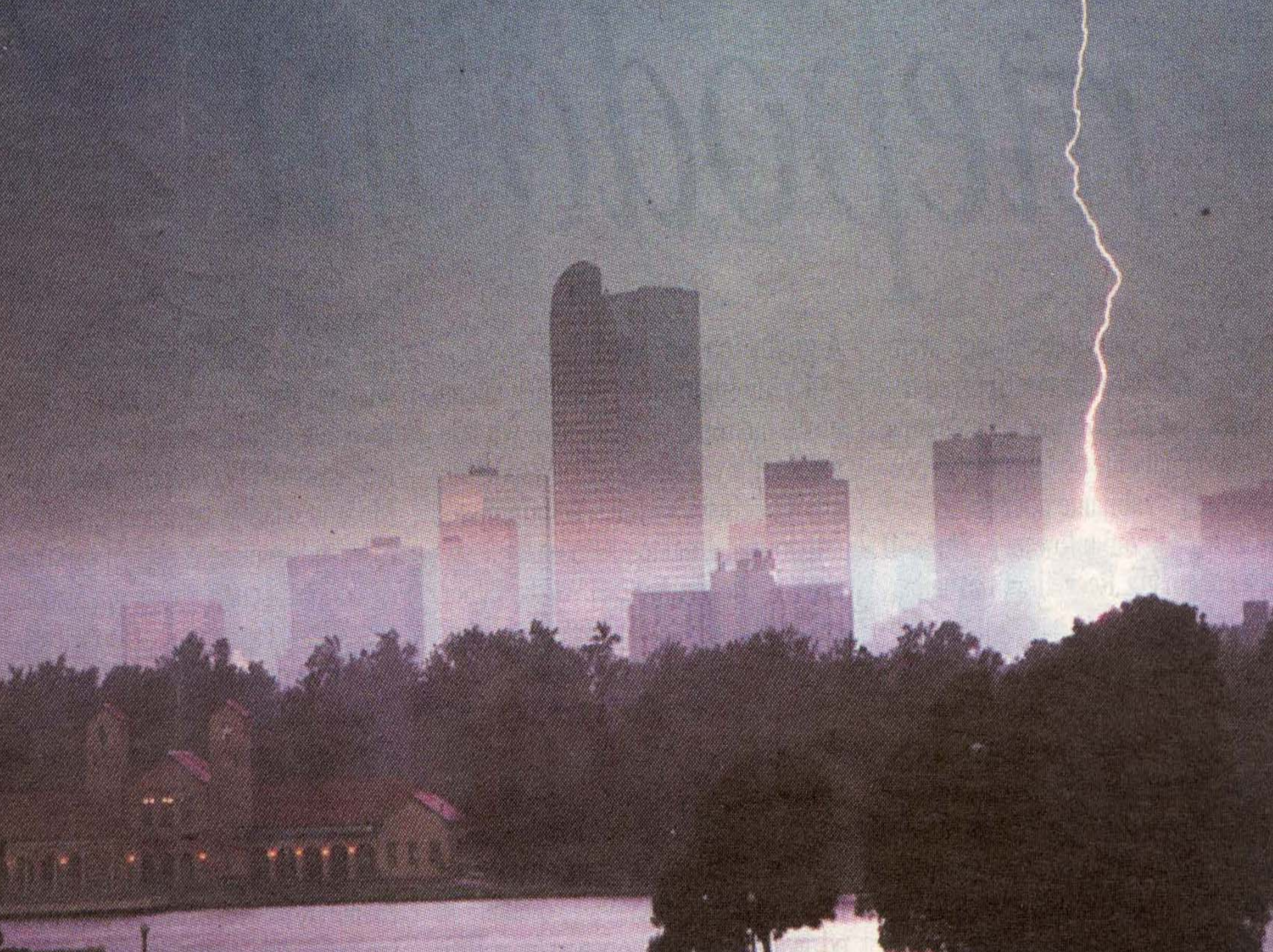
Rys. 14. Zdjęcie pioruna aparatem fotograficznym nieruchomym (rys. lewy) i obracany ręcznie tak powoli, że pełny obrót trwa 18 sekund (rys. prawy). Na zdjęciu lewym widać dwie błyskawice; ze zdjęcia prawego można się zorientować, że wzdłuż tej samej albo prawie tej samej drogi przeszło 6 głównych wyładowań piorunowych. Każde z wyładowań oświetliło wieżę kościelną, toteż widoczna jest ona — wobec obracania aparatem — w 6 miejscach na kliszy. U góry podano odstęp między wyładowaniami głównymi w sekundach (fot. B. Walter)

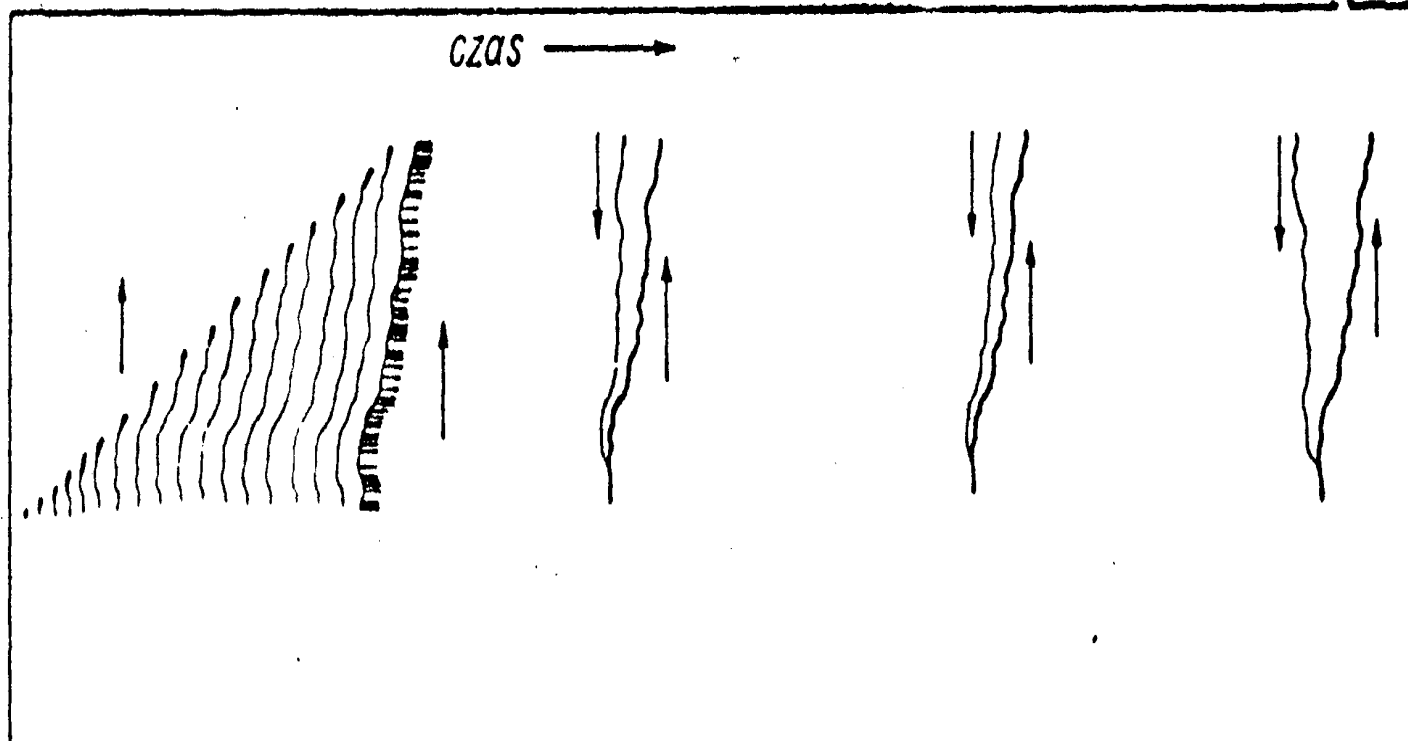
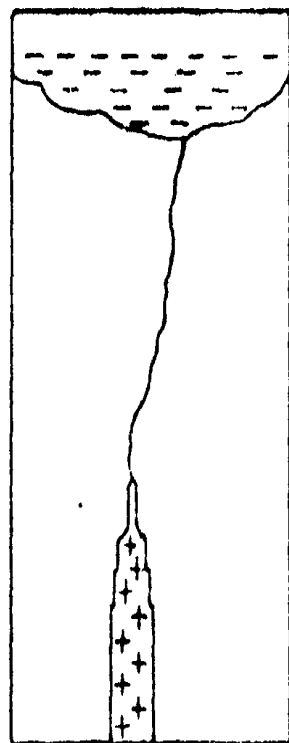


Rys. 60. Zależność miejsca uderzenia pioruna od położenia dobrze przewodzących warstw geologicznych. Piorun trafia w żyłę wodną lub w dolinę, a nie w szczyt, gdyż tutaj ma bliższą drogę do warstwy dobrze przewodzącej (J. Stiekolnikow i A. Bielakow)



Rys. 62. Dym z komina jest silniej przewodzący elektrycznie niż otaczające powietrze i może ułatwić uderzenie pioruna (według N. Kołobkowa)

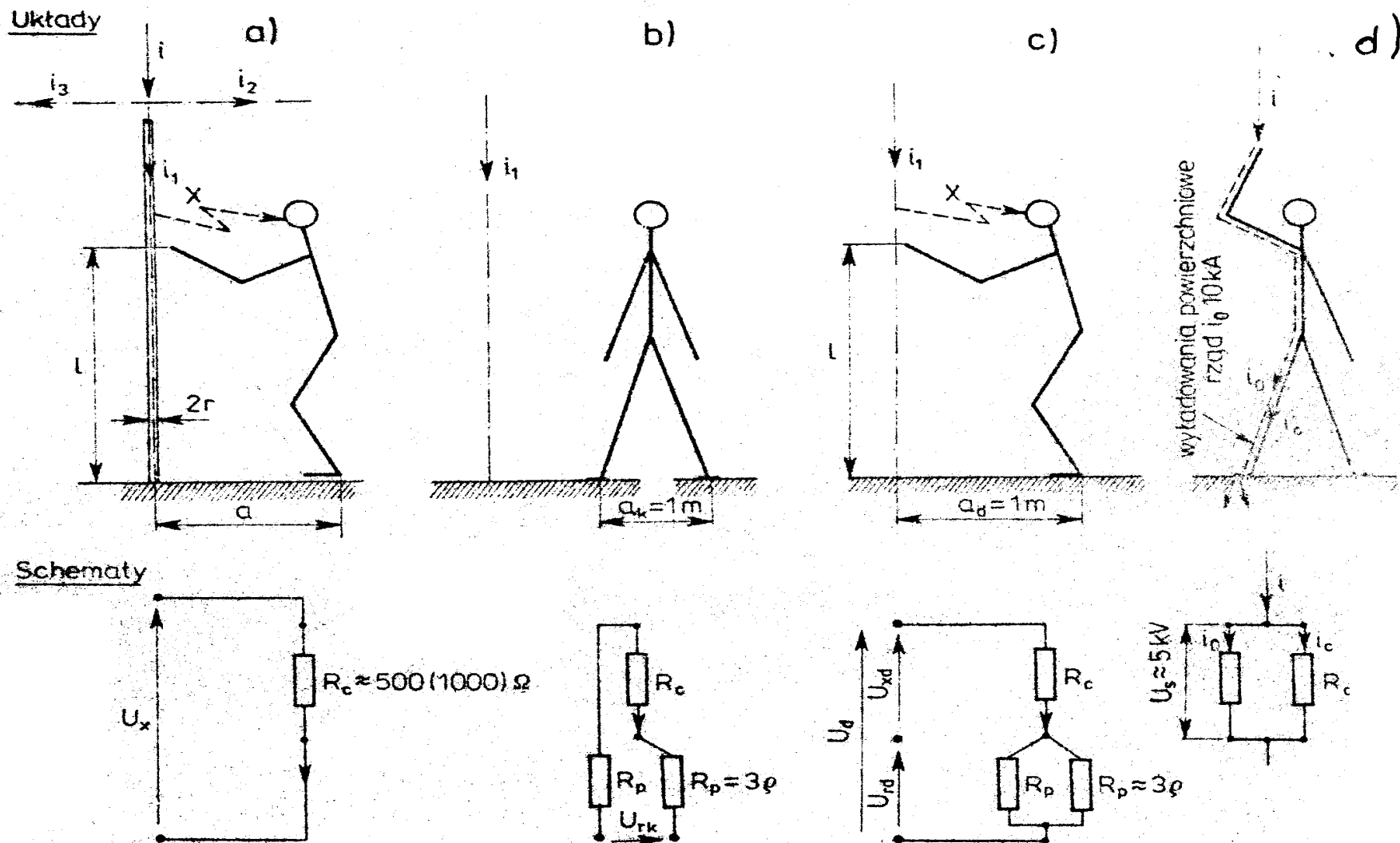




Rys. 22. Fotografia wyładowań wstępnych i głównych na filmie ruchomym w przypadku wysokiego wieżowca. Pierwsze wyładowanie główne jest poprzedzone przez wyładowania wstępne urwane, wychodzące z wieżowca (przeciwnie niż przy uderzeniu pioruna w przedmioty niskie). Pierwsze wyładowanie główne jest długotrwałe, małoprądowe i często bez grzmotu. Następne wyładowania główne są takie same jak przy trafieniu pioruna w niskie przedmioty (według B. F. I. Schonlanda)

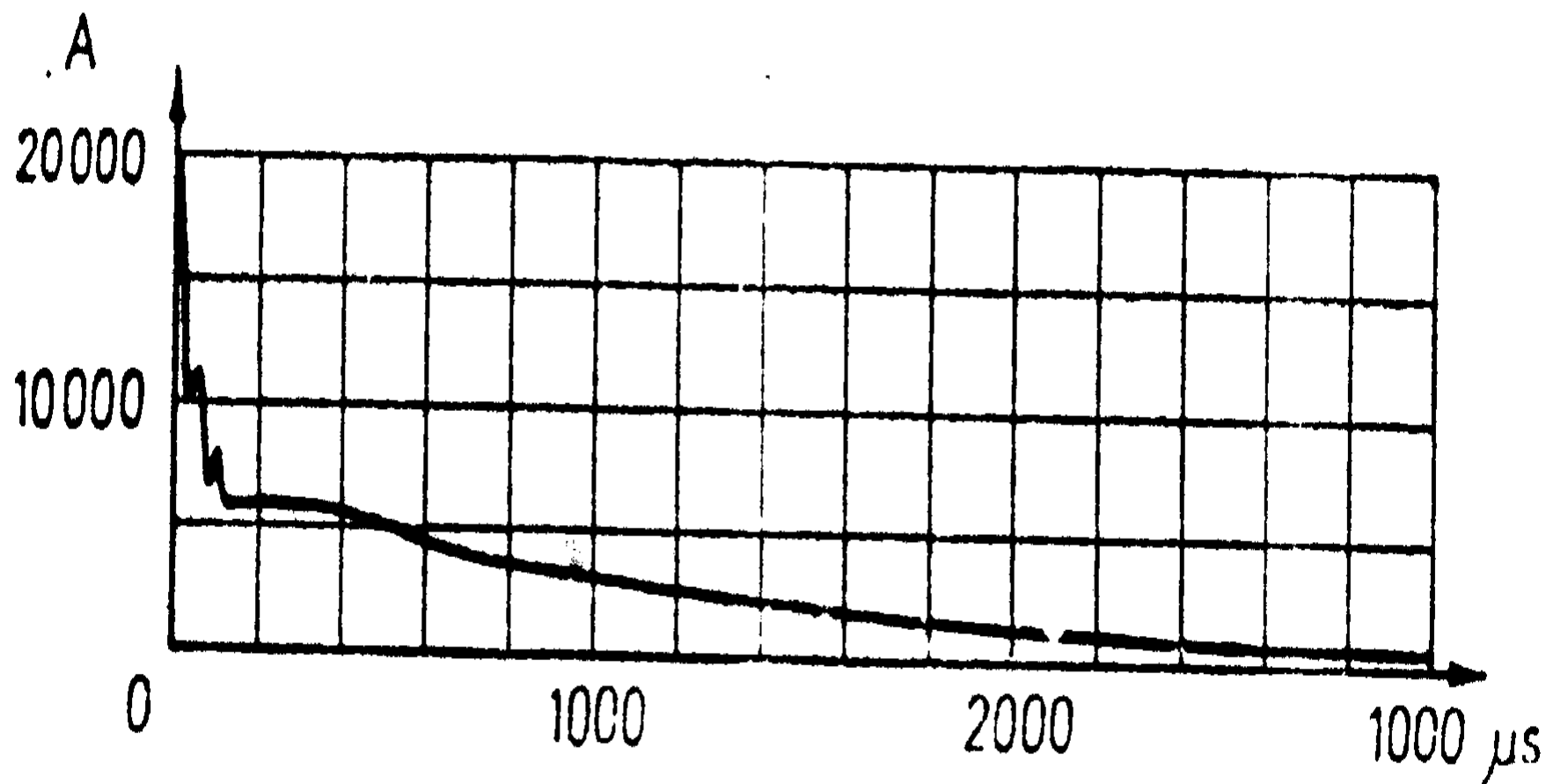


Zagrozenie dla ludzi.

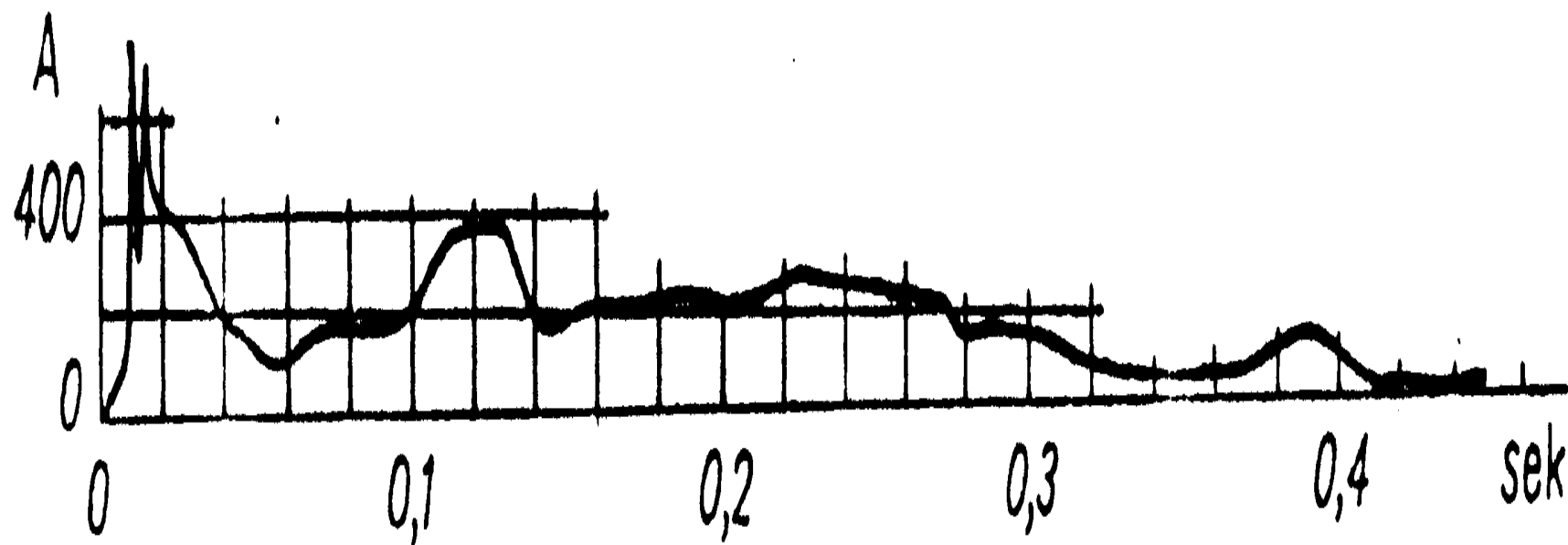


Rys. 3.12. Przypadki rażenia: a — napięciem indukowanym w pętli utworzonej przez człowieka, b — napięciem krokowym, c — napięciem dotykowym (indukowanym w pętli utworzonej przez człowieka i napięciem uziemieniowym), d — prądem przy uderzeniu bezpośrednim, oraz odpowiadające im schematy zastępcze

Straty powodowane burzami.



Rys. 24. Typowy przebieg pioruna długotrwałego
(według R. Bruce i H. Golde)



Rys. 23. Przebieg czasowy prądu pioruna długotrwałego, który w zimie trafił z wieżowca o wysokości 180 m w Pittsburghu (Stany Zjednoczone) w chmurę.

Prąd nie przekracza 750 A, czas trwania wynosi 0,46 sek.

(według G. D. Mc Canna)

Zapobieganie stratom.

Nowe spojrzenie