

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И КОНТРОЛЮ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

ТРУДЫ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
им. А. И. ВОЕЙКОВА

Выпуск

424

АТМОСФЕРНОЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Под редакцией
д-ра геогр. наук В. П. КОЛОКОЛОВА
и Л. Г. МАХОТКИНА



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1980

Сборник посвящен в основном вопросам исследования грозовой деятельности и явлений, связанных с эффектом электризации. Разработанные методы наблюдений за грозами и изучения процессов электризации основываются на данных измерений как в естественных, так и в лабораторных условиях. Обращено внимание на условия практического применения получаемых данных. Рассмотренные методы могут быть использованы для контроля природной среды по атмосферно-электрическим параметрам.

Сборник предназначен для специалистов в областях геофизики и техники, требующих получения сведений о грозовой деятельности и данных для оценки статической электризации.

The publication deals mainly with the problems of studying thunderstorm activity and phenomena related to electrization effect. Techniques developed for observing thunderstorms and studying electrization processes are based on measurements in nature and laboratory. Attention is paid to the conditions of practical application of data obtained. The methods considered can be used for control of environment by atmospheric electrical parameters.

The publication is meant for specialists in geophysics and technology requiring information on thunderstorm activity and data for estimation of static electrization.

306916

Ленинградский
Гидрометеорологический ин-т
БИБЛИОТЕКА
Л-д 193196, Малоохтенский пр., 98

*И. М. Имянитов, Г. П. Павлова,
Ю. Ф. Пономарев, Е. В. Чубарина*

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ПОРАЖЕНИЯ САМОЛЕТА АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ ВНЕ КУЧЕВО-ДОЖДЕВЫХ ОБЛАКОВ

Многочисленные попытки рассчитать или хотя бы оценить по данным об электрических параметрах облака и самолета опасность поражения самолета линейной молнией не привели к положительным результатам. Проведению анализа препятствовал ряд обстоятельств и в первую очередь:

— недостаточность сведений о характеристиках облака и самолета в момент, предшествующий разряду;

— невозможность теоретического анализа, обусловленная тем, что физика разряда, особенно безэлектродного, в аэрозольном облаке изучена совершенно недостаточно.

Известно, что в аэрозольных облаках, в частности в грозовых, разряд возникает и развивается при напряженностях поля много меньших тех, которые требуются для развития разряда между электродами. В то же время условия развития разряда в аэрозольном облаке существенно затруднены по сравнению с условиями, возникающими при междуэлектродном разряде.

Исследования последних лет показали, что в ряде случаев молнии возникали также и в облаках слоистых форм и начало разряда в этих случаях нередко связано с воздействием самолета [1].

Отсутствие численных, хотя бы самых приблизительных оценок условий развития разряда привело к невозможности выявить грозоопасность облака для самолета.

Достаточно сказать, что в литературе встречаются утверждения, что молниевый разряд в облаке начинается с разряда с капли и что даже современный самолет длиной $l \approx 50$ м, способный при полете в облаках накопить электрическую энергию в 10^{14} — 10^{15} раз большую, чем капля, и создающий при этом непрерывно разряды с его заостренных концов, не может вызвать разряд в облаке из-за недостаточности электрической энергии самолета.

Для решения поставленных вопросов необходимы непосредственные измерения электрических характеристик облака, самолета во время разряда молнии, до него и после.

В 1977 г. самолет Ил-14, оборудованный отделом атмосферного электричества Главной геофизической обсерватории под лабораторию, был поражен атмосферно-электрическим разрядом. Проведенный впоследствии анализ этого поражения показал, что рассматриваемый случай не только пополнил весьма скудные сведения, но и позволил получить ряд характеристик облака и самолета, близких к предельным.

Метеорологическая обстановка в день полета

Для анализа условий поражения самолета молнией рассмотрим сначала общую синоптическую обстановку в районе поражения, а затем конкретные условия полета. Чтобы получить наглядное представление о характере погоды в течение дня, был проведен анализ синоптических карт погоды, высотных карт барической топографии, аэрологических диаграмм, радиолокационной метеорологической информации.

22 июня 1977 г. над Баренцевым морем располагался глубокий циклон с давлением в центре 995 мбар, который проследивался до высоты 5 км. На юго-запад распространялся холодный фронт с волнами. Общие циклонические процессы на севере ЕТС определили наблюдаемый режим погоды и его изменения в Ленинградской области, где проходила трасса полета.

Еще в 9 ч утра в Ленинградской области наблюдалась только кучевая облачность 4—5 баллов. Барическая тенденция не достигала 1 мбар/3 ч. Контрасты температур в зоне фронта были 1—2°С. Вообще в период 19—22 июня наблюдалось резкое похолодание за счет вторжения холодного арктического воздуха. Средняя суточная температура была всего лишь 7—12°С, ночью отмечались заморозки. 22 июня в течение дня почти не происходило дневного прогрева воздуха. Температура близ Ленинграда была 9—12°С. После 9 ч отмечалось резкое обострение фронтального раздела. По картам барической топографии было проанализировано пространственное барическое поле. В зоне циклона наблюдались значительные динамические преобразования барического поля, вследствие которых возникло волновое возмущение в районе Финского залива. Температурные контрасты в зоне фронта по карте барической топографии значительны и составляют 8—10°С. В тылу циклона располагалась высотная ложбина холода, распространяющаяся с Баренцева моря, а в передней части циклона — гребень тепла.

Преобразование высотных полей повлекло за собой изменение направления и скорости ветра. Ветер на высотах в циклоне северо-западный и юго-западный, 60—80 км/ч; происходит обострение фронта. К 12 ч фронтальная зона сместилась к востоку со ско-

ростью около 60 км/ч у земли. В теплом секторе давление начало падать примерно на 1,9—2,5 мбар/3 ч.

Таким образом, если в 9 ч утра в Ленинградской области отмечались только отдельные кучевые облака, то в 12 ч уже по всему району наблюдались ливни и конвективная облачность. Интересно, что гроза в 11 ч дана только в одном пункте — Любани, расположенной на 30 км южнее зоны поражения самолета. К 15 ч грозы отмечены на нескольких станциях области, а к 18 ч грозовая деятельность совершенно прекратилась и наблюдались лишь отдельные ливни.

Для прогноза развития грозы одним из обязательных условий является наличие энергии неустойчивости, выраженной скоростью вертикальных движений более 10 м/с с дефицитом точки росы не более 22° С.

В нашем случае на эмаграмме, построенной по подъему радиозонда, отмечено наличие положительной и отрицательной энергии неустойчивости. В слое от 1,5 до 4,3 км конвективный поток равен 4,8 м/с. В этом случае отмечается неустойчивая стратификация атмосферы и наличие незначительной доли положительной энергии неустойчивости. Выше наблюдается устойчивое состояние атмосферы. По прогнозу на день расчетными методами по эмаграмме был дан ливень, но не гроза.

Был проведен метеорологический анализ радиолокационных характеристик облачности. В радиусе действия МРЛ (до 300 км) можно выявить эволюцию конвективных облаков, для чего необходимо провести сопоставление изменений отражаемости и площади радиозахвата за несколько сроков наблюдений. Чем опаснее явление, сопровождающее облачность, тем, как правило, больше отражаемость.

По данным МРЛ за 11 ч, на юге и юго-востоке от Ленинграда по отражаемости и верхнему уровню облачности отмечается лишь возможность ливней. На севере и западе области возможны были и грозы. По более ранним срокам наблюдений МРЛ за 03 ч, зона радиозахвата конвективной облачности очерчивается только на западе района, площадью 5 тыс. км² с отражаемостью 1,9. По критерию «грозоопасности» была предусмотрена тенденция возникновения только ливневых осадков.

Таким образом, все рассмотренные материалы позволяют сделать вывод о том, что гроза в 11 ч в районе Любани была локальным явлением, связанным с потенциальной разрешающей способностью воздушной массы, благоприятствующей развитию вертикальной мощности конвективных облаков в зависимости от конкретных свойств воздуха в данном районе. В районе Тосно, где произошло поражение самолета молнией, грозовых разрядов метеостанцией и постами наблюдения не отмечено.

Описание условий полета самолета на участке поражения

22 июня 1977 г. в 10 ч. 57 мин самолет-метеолaborатория Ил-14 был поражен молнией в районе Тосно.

К 10 ч 30 мин надвигавшаяся с юго-запада в район аэродрома мощная кучевая облачность сместилась на северо-восток. По наблюдению наземного метеорадиолокатора в это время в районе Тосно скорость изменения характерной отражаемости зоны радиолокационного эха несколько увеличилась. По критерию «грозоопасности» в этом районе фиксировались ливневые осадки. После взлета (в 10 ч 41 мин) самолет-лаборатория набирал высоту параллельно гряде облаков As—Ns, которая визуальнo и по самолетному радиолокатору находилась приблизительно в 20 км к востоку от трассы полета. На высоте 600 м самолет вошел в интенсивный дождь, а затем в облачность типа Ns. Болтанки в облаках практически не отмечались. Напряженность электрического поля, отмечаемая приборами, была несколько десятков вольт на сантиметр и в отдельных зонах достигала 100 В/см. В 10 ч 50 мин напряженность электрического поля выросла до 500—1000 В/см. На бортовом радиолокаторе по курсу отмечены диффузные засветки на удалении ~15—20 км. Болтанки по-прежнему не отмечались. В 10 ч 55 мин на высоте 1,5 км начались смешанные осадки: дождь, крупа, снег.

В 10 ч 57 мин в 5 км восточнее Тосно на высоте приблизительно 1,75 км в самолет ударила молния. Скорость самолета была около 240 км/ч, курс примерно 20°. Во время полета самолет не совершал виражей и двигался с постоянной скоростью. И до, и после удара молнии полет проходил в спокойной нетурбулизованной атмосфере, экипаж болтанки не отмечал, температура на уровне полета была около 0° С.

При осмотре самолета после посадки в Новгороде были обнаружены следующие разрушения:

- 1) оплавлен датчик термометра наружного воздуха (стержень почернел);
- 2) оплавлена и почернела верхушка правой УКВ антенны;
- 3) у датчиков температуры и влажности в нескольких местах отлетела никелировка поверхности;
- 4) обнаружен прожег в обтекателе радиолокатора $\varnothing \approx 1$ мм.

Анализ данных атмосферно-электрических измерений

Во время полета работали четыре прибора для измерения напряженности электрического поля, установленные сверху ($E_{\text{верх}}$), снизу ($E_{\text{низ}}$) и сбоку ($E_{\text{бок}}$) фюзеляжа самолета, а также в хвостовой части ($E_{\text{хвост}}$). Такое расположение приборов позволяет измерять заряд Q самолета и три составляющие вектора напряженности электрического поля атмосферы: продольную E_x , направленную вдоль фюзеляжа, поперечную E_y , направленную вдоль крыльев, и вертикальную E_z , направленную перпендикулярно фюзеляжу самолета. Надо иметь в виду, что начало координат и орты отсчета составляющих всегда совмещены с самолетом.

На рис. 1 приведены вариации напряженности электрического поля, зафиксированные каждым из датчиков. Каждый датчик фик-

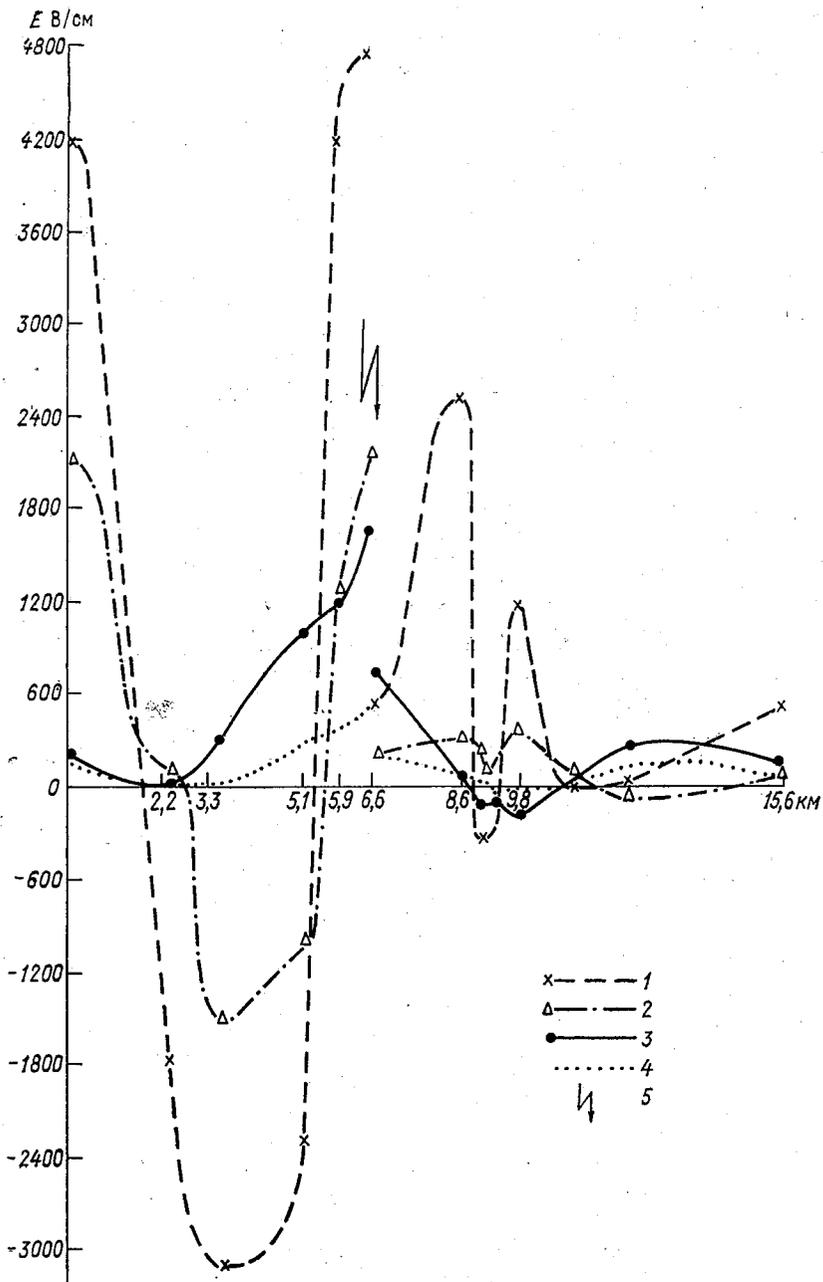


Рис. 1. Изменения напряженности электрического поля, отмеченные каждым датчиком

1 - $E_{\text{хвост}}$, 2 - $E_{\text{низ}}$, 3 - $E_{\text{верх}}$, 4 - $E_{\text{бок}}$, 5 - момент разряда.

сирует суммарную напряженность поля — соответствующую составляющую напряженности электрического поля зарядов облака и напряженности электрического поля от заряда самолета. Самые большие напряженности электрического поля (приблизительно 5000 В/см) отмечены хвостовым датчиком, но даже и они почти в 2 раза меньше обычно принятых пробойных значений.

Надо полагать, что в носовой части усиление составляющей вектора напряженности электрического поля больше, чем в хвостовой, и здесь в момент разряда суммарное поле зарядов облака и заряда самолета могло достичь пробойных значений порядка 10^4 В/см [1].

Чтобы решить вопрос, что же явилось основным фактором, спровоцировавшим разряд, — большая напряженность электрического поля в облаке или большая напряженность поля от заряда самолета, — мы рассчитали значения этих компонент поля.

Результаты такого расчета приведены на рис. 2. Из расчетов следует, что модуль вектора напряженности электрического поля в облаке непосредственно перед разрядом был равен примерно 2330 В/см. Скачок поля во время разряда $\Delta E \approx 1500$ В/см. Причем основной вклад в общую величину внесла продольная составляющая вектора (перед разрядом $E_x \approx 2120$ В/см, а $\Delta E_x \approx 1330$ В/см). Поперечная составляющая почти вдвое меньше ($E_y \approx 1000$ В/см, $\Delta E_y \approx 900$ В/см). Вертикальная составляющая электрического поля облака непосредственно перед разрядом была близка к нулю, а после разряда возросла более чем на 200 В/см.

Заряд самолета непосредственно перед разрядом был равен примерно 10^{-3} Кл, изменение заряда в момент разряда $\Delta Q \approx 10^{-3}$ Кл. Напряженность электрического поля за счет заряда самолета перед разрядом $E_Q \approx 8000$ В/см, а изменение ее в разряде $\Delta E_Q \approx 6300$ В/см.

Такого сочетания факторов, как в точке разряда непосредственно перед разрядом, ни в одной точке ни до, ни после этого события не было. Суммарная напряженность электрического поля в носовой части $E = E_{\text{атм}} + E_c \approx 10^4$ В/см, т. е. имела порядок величины, могущей обеспечить начало разряда [1].

Существенно отметить, что наблюдаемый разряд был единственным разрядом в облаке и что в облаке ни до, ни после этого ни по данным приборов, ни визуально разрядов не наблюдалось. Не отмечалось также разрядов и в гряде облаков, параллельной курсу самолета.

Полет происходил в районе нулевой изотермы, и наблюдатели отмечали по трассе полета осадки (вероятно, обложные, поскольку они или не фиксировались самолетной РЛС, или отмечались как диффузные засветки), в том числе и смешанные, в частности мокрый снег — условия, в которых наблюдалось максимальное число случаев поражения самолетов гражданской авиации атмосферно-электрическими разрядами.

Можно с уверенностью полагать, что полет самолета происходил в слоисто-дождевых облаках и разряд в самолет связан толь-

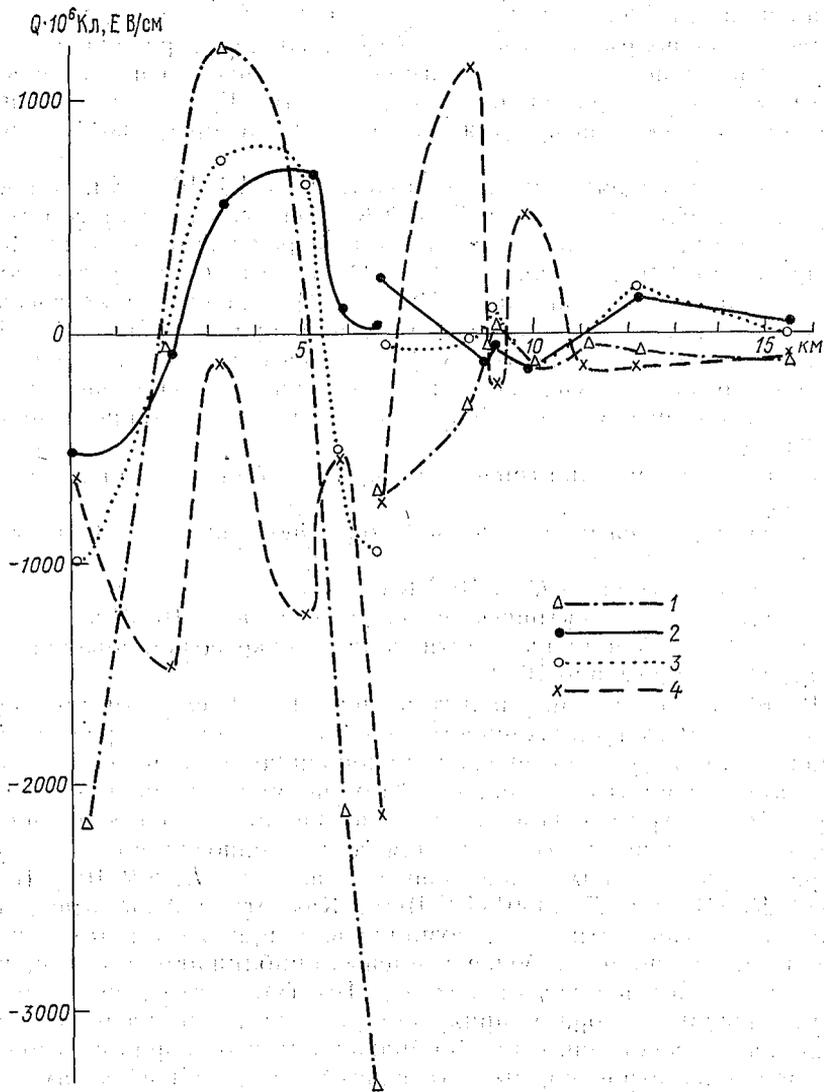


Рис. 2. Изменения составляющих напряженности электрического поля и заряда самолета до и после атмосферно-электрического разряда.

1 — Q , 2 — E_z , 3 — E_y , 4 — E_x . Начало координат совмещено с самолетом.

ко с этими облаками и самолетом. Анализ результатов атмосферно-электрических измерений показал, что разряд в самолет произошел в тот момент, когда напряженность поля от заряда в точке поражения самолета заметно превышала напряженность поля, создаваемую полем атмосферы. Иными словами, разряд начался под влиянием поля от заряда самолета, достигшего по напряженности в точке удара значения порядка 10^6 В/м, т. е. значения, близкого к пробивному для условий, в которых возник разряд.

В момент разряда заряд самолета $Q_c = 1,1 \cdot 10^{-3}$ Кл, а после разряда оказался равным $0,25 \cdot 10^{-3}$ Кл. Энергия за счет собственного заряда, накопленного на самолете перед разрядом, была равна примерно 800 Дж, так как $W_c = Q_c^2 / 2C$, где C — емкость самолета, равная приблизительно 700 см. Изменение электрической энергии, накопленной самолетом, при разряде равно 760 Дж. Учет энергии дипольного момента самолета, находящегося в электрическом поле, повышает это число более чем вдвое и общую энергию, запасенную на самолете, можно оценить в 1800 Дж.

Таким образом, электрический заряд в облаке начался с самолета при:

— размерах самолета 20 м вдоль фюзеляжа и 20 м вдоль крыльев;

— заряде самолета $Q_c \approx 10^{-3}$ Кл;

— запасенной электрической энергии около $2 \cdot 10^3$ Дж;

— суммарной напряженности поля в точке возникновения разряда, равной примерно 10^4 В/см.

В то же время, как следует из рис. 1 и 2, самолет проходил зоны, в которых напряженность поля, создаваемая зарядом, сам заряд и электрическая энергия, накопленная самолетом, соответствовали указанным значениям и тем не менее разряд не развивался. Рассмотрим, с чем это связано. Обращают на себя внимание, относительно малые значения напряженности поля в атмосфере при которых произошел разряд: $E_x' \approx 2 \cdot 10^3$ В/см; $E_y \approx 1 \cdot 10^3$ В/см и $E_z \approx 0,01 \cdot 10^3$ В/см. Как отмечалось выше, значения напряженности поля, возникающие при этом в тех точках самолета, где поля наиболее усилены, приближаются к тем, при которых может произойти разряд. Тот факт, что вертикальная составляющая вектора напряженности поля после разряда изменила знак, в сочетании с тем соображением, что разряд с самолета мог, наиболее вероятно, вызвать разряд в ближайшей к самолету области, приводит к мысли, что разряд почти полностью разрядил указанную область.

По данным о ходе напряженности поля по трассе полета можно примерно оценить электрическую энергию, запасенную облаком, и энергию, вовлеченную в разряд. В общем случае для такой оценки надо знать геометрические размеры области, занятой зарядом Q_0 , вовлеченным во вспышку молнии.

При интерпретации зоны облака шаром

$$\Delta W_0 = \frac{\Delta Q_0^2}{2R} \approx \frac{\Delta E^2 R^3}{2},$$

где R — половина ширины зоны, в которой проявился экстремум поля. Если заряд, создавший данное изменение поля, располагался только в части зоны, охваченной экстремумом, указанной ширины, то это означало бы, что ΔW_0 больше рассчитанного по приведенной выше формуле.

Таким образом, электрическая энергия ΔW_0 , вовлеченная в разряд равна не менее 10^9 — 10^{10} Дж, что на 6—7 порядков превышает значения энергии, запасенной самолетом (примерно $2 \cdot 10^3$ Дж).

Резюмируя изложенное, следует отметить, что разряд, начавшийся в облаке, может развиваться, если:

— размеры области, из которой произошел разряд, лежат в пределах, не меньших 1—2 км;

— напряженность поля облака в момент разряда превышает 10^6 В/м, а в направлении точки поражения самолета 10^8 в/м;

— электрическая энергия, вовлеченная в атмосферно-электрический разряд, превышает 10^9 — 10^{10} Дж.

Обращает на себя внимание тот факт, что самолет проходил зону, в которой напряженность поля атмосферы была близка к величине, наблюдавшейся в зоне поражения, а в самой зоне поражения разряд возник при максимальном значении составляющей напряженности поля, направленной вдоль линии полета. Как отмечалось [1], для развития разряда необходимо, чтобы существовало поле с напряженностью, достаточной для возникновения разряда и поля с меньшей напряженностью, достаточной для поддержания уже развившегося разряда. Распределение электрического поля атмосферы и зарядов по трассе полета наглядно иллюстрирует это положение. Как уже отмечалось, во время полета отмечались случаи, когда поле атмосферы было близко к величине поля в момент разряда и, когда заряд самолета превышал наблюдавшийся перед разрядом или был ему равен. Но когда заряд самолета был велик, то поле атмосферы в этих случаях было мало, и наоборот, когда поле было велико, заряд был мал. И только тогда, когда и поле, и заряд одновременно достигли необходимых значений, произошел разряд. Поле и заряд самолета Ил-14 коррелирует весьма слабо (коэффициент корреляции $0,5 \div 0,6$), но по мере роста размеров и скоростей самолетов вероятность встречи зарядов, способных вызвать разряд, возрастает и соответственно растет вероятность их возникновения при больших полях.

В общем виде вероятность поражения самолета данного типа в облаках данного вида может быть рассчитана, если по кривой вероятности $P(E > E_{кр})$ встречи поля с напряженностью больше данной величины в облаках [3] определить вероятность встречи поля с напряженностью, достаточной для поддержания разряда, а по кривой вероятности встречи заряда больше данной величины $P(Q > Q_{кр})$ [1] определить вероятность возникновения разряда

с самолета. Произведение этих вероятностей, помноженное на коэффициент корреляции между полем и зарядом, дает искомую вероятность поражения самолета.

Представляется интересным сравнить полученные данные с аналогичными сведениями других авторов, например [5, 6]. Необходимо отметить, что данные, приводимые в [5], нуждаются (как отмечалось в [1]) в уточнении, так как авторы пользовались нестандартной методикой измерений, поэтому их данные позволяют только оценить относительные вклады, вносимые зарядом самолета и внешним полем. Наблюдаемые нами значения напряженности электрического поля в период перед разрядом совпадают по порядку с величинами, приводимыми Фицджеральдом [6].

Измерения в [5, 6] происходили в активных грозовых облаках, находящихся в стадии распада. Эти облака занимают по своим электрическим характеристикам промежуточное положение между активными и неактивными грозовыми облаками. В них отсутствуют условия для создания зон неоднородностей и сильной электризации, и в этом отношении они напоминают неактивные облака. В распадающихся грозовых облаках самолет нередко может стать инициатором разряда.

Обращают на себя внимание сведения о турбулентности в облаках: в работах [1, 5] почти во всех случаях отмечается слабая турбулентность, а также наличие смешанных осадков.

Все поражения самолета происходили в области нулевой изо-термы. Наблюдатели отмечали большие заряды самолета: Кобб [5] приводит сведения о сильном коронировании частей самолета, а Фицджеральд [6] — об изменении напряженности поля за счет заряда самолета при молниевом разряде. Скачок этот превосходит 10^5 В/м. Оба автора отмечают, что напряженность электрического поля в облаке меньше того значения, которое необходимо для начала разряда, т. е. во всех наблюдаемых случаях без наличия в облаке заряженного самолета молниевый разряд не мог бы развиться. Таким образом, подтверждаются высказанные ранее [1] предположения, что в облаках, в которых в силу каких-либо причин создались такие объемные заряды, что напряженность электрического поля от них достигла 10^3 В/см, самолет, заряжаясь, может спровоцировать молниевый разряд на себя. Слабая турбулентность в слоисто-дождевых и грозовых облаках, находящихся в стадии распада, не препятствует макроразделению зарядов в них. Зарядение же облачных частиц в основном связано, по всей вероятности, с наличием в них двух фаз частиц: воды и льда. Во всех случаях, когда в облаках типа N_s отмечались большие напряженности электрического поля, наблюдалось двухфазное состояние облачных частиц [4].

В статье [7] указывается на опасность, которую представляют зимние грозы в Японии для авиации. В частности, отмечается, что в зимних грозах, как правило, отсутствует сильная турбулентность, грозы обычно сопровождаются смешанными осадками и число молниевых разрядов в таких грозах невелико (3—4), но

часто самолет своим присутствием вызывает разряд на себя. Таким образом, сведения, приводимые в этой статье, совпадают с приводимыми другими авторами и полученными в наших измерениях сведениями о возможности поражения самолета молниевым разрядом в облаках, которые не квалифицируются как грозовые, и о возможности провоцирования разряда в таких облаках введением в него сильно заряженного тела.

Использование данных об условиях поражения самолетов с молнией в практике авиации

Можно рассчитать вероятность P поражения самолета молнией в неактивных облаках, если известны:

- данные о вероятности P_1 встречи полей с напряженностью поля E больше данной величины;
- данные о вероятности P_2 приобретения самолетом данного типа в облаках данного вида заряда больше данной величины;
- коэффициент корреляции k между напряженностью поля и зарядом самолета в облаках данного вида;
- критическая напряженность поля $E_{кр.н}$ при которой может развиваться уже возникший разряд в неактивных грозовых облаках;
- напряженность поля $E_{кр.а}$, при которой может начаться разряд с самолета в неактивных облаках;
- заряд самолета $Q_{кр}$, при котором может начаться разряд с самолета.

Зная районы полета самолетов данного типа и соответственно покрытость α этих районов облаками данного вида, число эксплуатируемых самолетов N и средний путь \bar{L} , проходимый ими, скажем, за год, можно рассчитать число возможных поражений ν самолетов молниями за год:

$$\nu = P\alpha N\bar{L},$$

причем

$$P = kP_1P_2,$$

где

$$P_1 = P_{1н} = \int_{E_{кр.н}}^{\infty} P(E) dE; \quad P_2 = \int_{Q_{кр}}^{\infty} P(Q) dQ,$$

а если

$$E > E_{кр.а}, \text{ то } P_1 = P_{1а} = \int_{E_{кр.а}}^{\infty} P(E) dE,$$

естественно, что $P_{1а} \ll P_{1н}$.

Данные о вероятности P_1 опубликованы в [3], а данные о вероятности P_2 для некоторых типов самолетов опубликованы в [1]

и могут быть получены для других типов самолетов с помощью соответствующих измерений. Величины k в ряде случаев могут быть получены на основе имеющихся материалов.

Значительный пробел обнаруживается в сведениях $E_{кр}$ и $Q_{кр}$. Заполнение этого пробела позволит использовать приведенную схему расчета для оценок «стратегического» плана использования авиации.

Анализируемый случай позволяет ввести в расчет пусть приближенные, но реальные данные о $E_{кр}$ и $Q_{кр}$.

Как известно [2], около $2/3$ — $3/4$ случаев поражения молниями самолетов гражданской авиации происходит в условиях, не распознаваемых современными средствами и приборами, а также метеорологами и летчиками как грозовые. В этих условиях необходимо изыскание новых методов, позволяющих фиксировать зоны, опасные по возможности поражения атмосферно-электрическим разрядом.

В настоящее время наиболее достоверным, вероятно, является метод обнаружения, опирающийся на то обстоятельство, что зона поражения определяется возможностью:

- начала разряда с самолета;
- развития разряда, начавшегося с самолета, в облаке.

Как видно из приведенных данных, область опасной зоны характеризуется тем, что она лежит в пределах

$$Q > Q_{кр}, E > E_{кр},$$

ными словами, измеряя E и Q на самолете, можно, если известны $E_{кр}$ и $Q_{кр}$, определить нахождение в опасной зоне. Для такого оперативного использования могут оказаться полезными полученные данные.

Выводы

1. В облаках слоистых форм и в облачных системах, в которых возможно присутствие отдельных Сб, могут возникать атмосферно электрические разряды.

2. Развитие разряда в облаке может быть вызвано присутствием заряженного самолета, если напряженность поля в точке начала разряда у поверхности самолета превышает 10^5 В/м, электрическая энергия, вовлекаемая в разряд, не менее 10^9 — 10^{10} Дж при характерном размере самолета $l \approx 20$ м. Это предполагает наличие в облаке области радиусом не менее 10^3 м с напряженностью электрического поля не менее 10^5 В/м.

3. Полученные данные могут быть использованы:

- для оценки условий развития разряда в активных облаках;
- для разработки средств, уменьшающих вероятность поражения самолета молнией.

4. Необходимо накопить статистический материал о полях и токах при поражении самолета молнией, для чего необходимо

оснастить рейсовые самолеты соответствующей аппаратурой с записью ее показаний на рейсовых самописцах.

Авторы благодарны В. Н. Морозову за помощь в расчете электрической энергии самолета с учетом дипольного момента индуцированных зарядов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Имянитов И. М. Электризация самолетов в облаках и осадках. Л., Гидрометеиздат, 1970. 210 с.
2. Имянитов И. М., Евтеев Б. Ф., Камалдина И. И. Методическое письмо о причинах, приводящих к поражению самолетов молниями в холодное время года. Л., Гидрометеиздат, 1976. 31 с.
3. Имянитов И. М., Чубарина Е. В., Шварц Я. М. Электричество облаков. Л., Гидрометеиздат, 1971. 91 с.
4. Чубарина Е. В. Большие электрические поля в облаках слоистых форм.— Труды ГГО, 1977, вып. 350, с. 80—86.
5. Cobb W. E., Holitza T. Y. A note of lightning strikes to aircraft in flight.— Proc. Y. R. E., 1946, vol. 34, p. 241—247.
6. Fitzgerald D. R. Probable aircraft triggering of lightning in certain thunderstorms.— Month. Wea. Rev., 1967, vol. 95, № 12, p. 835—842.
7. Piero E. T. Winter thunderstorms in Japan—a hazard to aviation.— Nav. Res., 1976, vol. 29, № 6, p. 12—16.

✓
И. И. Камалдина

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПОРАЖЕНИЯ САМОЛЕТОВ МОЛНИЯМИ В НЕГРОЗОВЫХ ЗОНАХ

Несмотря на то, что средства предупреждения входа самолета в горизонтальную облачность непрерывно совершенствуются, повторяемость поражений самолетов молниями возрастает от года к году.

До последнего времени предполагалось, что поражения самолетов молниями возможны только в кучево-дождевых облаках. Однако практика полетов самолетов гражданской авиации СССР показала, что большинство полетов проходило в облаках, которые по всем привычным признакам не являлись грозоопасными. В них отсутствовали зоны ливневых осадков, дающих характерные яркие отражения на экране самолетных радиолокаторов, зоны повышенной турбулентности. Гроз по району не отмечалось.

Предполагалось, что в системе слоисто-дождевых облаков могли возникать отдельные облака, замаскированные слоистой облачностью, и в этих кучево-дождевых облаках и возникали молнии, поражающие самолет.

Затем выяснилось, что большая часть случаев поражений приходится на зимний и переходные сезоны, а не на летний сезон, когда повторяемость гроз особенно высока; наибольшая часть поражений происходила в облаках, в которых до появления в них самолета молний не наблюдалось [5]. Молния, поразившая самолет, в большинстве случаев являлась единственной молнией, возникшей в облаке. Создавалось впечатление, что, во-первых, случаи попадания молнии в самолеты вовсе не однозначно связаны с районами грозовой деятельности и могут происходить не только в Сб, но и в облаках других форм, и, во-вторых, возникновение молний в таких случаях может быть результатом взаимодействия самолета и облака и, следовательно, должно зависеть от характеристик их обоих.

Накопление фактических данных о поражениях самолетов молниями, с одной стороны, использование сети МРЛ для исследования облачности и специально поставленные измерения полей в облаках — с другой, позволили поставить вопрос, действительно ли

самолеты поражались молниями в «замаскированных Св», и вообще ревизовать тезис о том, что условия для развития молний возникают исключительно в кучево-дождевых облаках. Такие факты, как несовпадение максимума повторяемости гроз и максимума числа поражений самолетов молниями (по американским данным) [9], данные о болтанке в районе поражения (из 102 случаев в 19% случаев турбулентность отсутствовала, в 60% случаев наблюдалась легкая турбулентность, в 20% — умеренная и только в 1% — сильная [10]) ставят под сомнение предположение об однозначной связи поражений молниями с грозами.

Из некоторых зарубежных работ [7, 9—12] было известно также, что максимум поражений происходит на высотах от 1,8 до 2,5 км при температурах, близких к 0° С. Этим анализ условий поражения самолетов молниями ограничивался. Отсутствовали обобщенные данные о характере облачности в районе поражения, не были обобщены данные о грозоопасности облаков, сведения о синоптических и погодных условиях.

Физические причины поражения самолетов молниями в негрозовых зонах рассмотрены в работах [2, 3, 4, 8]. И. М. Имянитовым были сформулированы условия возникновения молниевых разряда, которые заключаются в следующем: в некоторой зоне облака в объеме 10^{-3} — 10^{-1} км³ должны быть накоплены заряды, обеспечивающие напряженность E_k порядка 10^6 В/м, достаточную для начала заряда. В значительном объеме облака 10 — 10^5 км³ должны возникнуть электрические разряды, обеспечивающие напряженность поля E_0 [10^5 В/м, достаточную для поддержания разряда. Область, создающая поле E_k , должна находиться внутри области, в которой существует поле E_0] [3, 6]. Первое и второе условия возникновения молниевых разряда осуществляются в развитых Св. В облаках слоистых форм их осуществление маловероятно. По данным работы [6], распределение значений напряженности электрического поля в этих облаках подчиняется логарифмически нормальному закону. Экстраполяция данных, полученных путем измерений в атмосфере, в область больших значений указывала на существование в N_s полей $5 \cdot 10^4$ В/м с вероятностью, меньшей 0,1%. Зоны неоднородностей с напряженностью поля, близкой к E_k , в этих облаках отсутствуют.

Таким образом, представлялось вероятным, что в облаках слоистых форм может выполняться второе условие возникновения грозового разряда: существование полей, близких к 10^5 В/м, в большом объеме облака.

При анализе накопления заряда в облаке необходимо рассматривать как процессы, способствующие ему, так и процессы, ему препятствующие. Изменение заряда облака со временем

$$\frac{dQ}{dt} = I_3 - I_p,$$

где I_3 — плотность тока, заряжающего облака, I_p — плотность тока разрядки. Ток, заряжающий облако, возникает при разделе-

915903

нии разноименно заряженных частиц. Ток разрядки возникает в основном за счет наличия в облаке суммарной эффективности проводимости $\lambda_{эф}$. Величина $\lambda_{эф}$ в грозовых облаках, оцененная на основе соотношения $\lambda = 1/4\pi\tau$ (τ — время восстановления напряженности электрического поля после разряда молнии), колеблется в пределах $(1,1 \div 4,4) \cdot 10^{-12}$ Ом·м⁻¹. Потери заряда за счет проводимости в облаке должны восполняться токами зарядки. Плотность тока зарядки по современным оценкам $10^{-6} - 10^{-7}$ А/м². Плотность тока электрической проводимости внутри грозовых облаков порядка 10^{-7} А/м² [12].

Эффективная электрическая проводимость в облаке складывается из омической проводимости $\lambda_{ом}$ и турбулентной проводимости $\lambda_{турб}$.

$$\lambda_{эф} = \lambda_{ом} + \lambda_{турб}$$

Таким образом, турбулентность должна препятствовать созданию больших средних полей в облаках. Вклад турбулентной проводимости в эффективную проводимость грозового облака подлежит оценке.

В слоисто-дождевых облаках плотность тока зарядки составляет $5 \cdot 10^{-12}$ А/м², т. е. она на 4—5 порядков ниже, чем в грозовых облаках. Однако в Ns могут создаваться большие поля, поскольку и электрические потери в них малы. Плотность тока турбулентной диффузии в Ns порядка $5 \cdot 10^{-12}$ А/м², плотность тока омической проводимости менее $1 \cdot 10^{-11}$ А/м² [6]. Измерения электрических полей в атмосфере, проведенные в СССР, позволили предположить, что в облаках слоистых форм могут существовать (с некоторой вероятностью) электрические поля с напряженностью, близкой к 10^5 В/м.

В ГГО были проведены две серии научно-исследовательских полетов с целью обнаружить в облаках Ns большие электрические поля. В трех полетах 1968—1969 гг. было обнаружено несколько зон с необычно большими для Ns значениями вертикальной составляющей напряженности поля порядка $(2-4) \cdot 10^4$ В/м при горизонтальной протяженности несколько километров [1]. Синоптико-аэрологический анализ, проведенный автором, показал, что в системе Ns и в коей мере нельзя было предположить наличия замаскированных Сб.

В феврале 1973 г. в районе Шереметьева в слоистообразной облачности вторичного холодного фронта при отсутствии заметной турбулентности (по данным перегрузочного комплекта скорость вертикальных турбулентных порывов не превышала 0,1 м/с) и засветок на экране самолетного локатора были измерены значения горизонтальной составляющей напряженности электрического поля более $5 \cdot 10^4$ В/м [2].

Проведенный нами синоптический анализ показал, что микро-район исследования находился за вторичным холодным фронтом, прошедшим через Москву около 15 ч. Наблюдалась облачность St, Ns, местами Сб с нижней границей 240 м, снегопады.

По данным МРЛ аэропорта Внуково, в ближней зоне действия докатора, где находился самолет-лаборатория, наблюдалось радиоэхо от слоистообразной облачности, верхняя граница которой находилась на уровне 3000 м.

Анализ данных радиозондирования за 15 ч в Долгопрудном показал, что атмосфера вплоть до больших высот была стратифицирована влажно-устойчиво. Очевидно, что большие электрические поля $5 \cdot 10^4$ В/м были измерены в слоисто-дождевых облаках.

Таким образом, проведенные специальные измерения электрических полей в облаках слоистых форм говорят о том, что в этих облаках могут возникать зоны со значениями напряженности поля и с горизонтальными размерами, близкими к тем, которые необходимы для поддержания электрического заряда, если таковой возник.

Метеорологические условия поражения самолетов молниями.

В качестве исходных использовались материалы, приводимые в технических актах, в частности данные о месте и времени поражения, типе самолета, высоте полета, последствия поражения, а также сведения об условиях полета по показаниям экипажа самолета. Синоптическая обстановка и условия погоды оценивались по синоптическим картам за основные сроки и по кольцовкам; привлекались данные штормового кольца станций и таблиц ТМ-1. Сообщения экипажа об условиях полета — болтанке, облачности, осадках, наличии радиолокационных засветок, гроз по району, температуре на уровне поражения — сопоставлялись с данными наземных наблюдений, данными радиозондирования и МРЛ. При диагнозе метеорологической обстановки иногда использовались сведения, поступающие с других самолетов. При анализе грозоопасности облаков на фронтах учитывались динамические воздействия в зоне фронта. В дополнение к сообщениям экипажа о болтанке производился расчет ее вероятности по данным зондирования. Всего было проанализировано около 240 случаев поражения самолетов молниями.

В качестве примера приведен случай поражения самолета Ан-24Б молнией в районе аэропорта Шереметьево в 5 ч 15 мин (рис. 1). Разряд произошел при пробивании облачности в слабых осадках в виде дождя на высоте 2800—2900 м. Засветки на экране самолетного радиолокатора отсутствовали, болтанка наблюдалась слабая. Прогнозом погоды по маршруту грозового положения не предусматривалось. Анализ синоптических карт за соответствующие сроки показал, что полет проходил в центре антициклона. В радиусе более 150 км от места поражения вплоть до 09 ч наблюдались облака типа Ci, As, Ac. По данным МРЛ Гидрометцентра СССР, радиоэхо в период 05 ч—05 ч 30 мин отсутствовало. По данным радиозондирования в Долгопрудном, энергия неустойчивости вплоть до высоты 5000 м была отрицательной. Поражение самолета молнией в этом случае могло произойти только в слоисто-кучевых облаках.

Годовой ход числа поражений, построенный по 229 случаям, приведен на рис. 2. Он имеет довольно вялый характер. Слабо выраженный максимум приходится на май—июнь, минимум—на декабрь—январь. Таким образом, максимум повторяемости поражений сдвинут по сравнению с максимумом повторяемости гроз в сторону весенних месяцев. Годовой ход числа поражений изме-

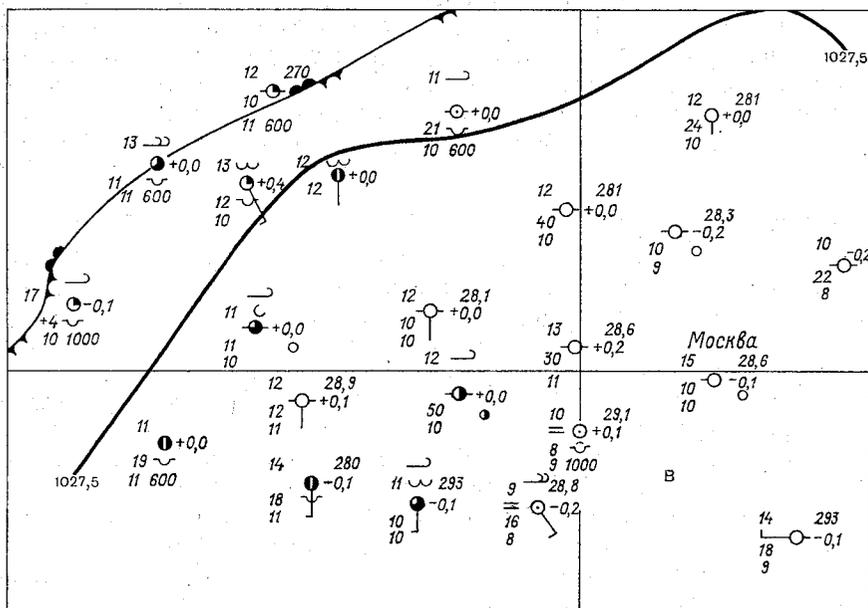


Рис. 1. Карта погоды за 06 ч 6 июня 1973 г.

няется от места к месту. Диаграмма годового хода числа поражений самолетов молниями для районов Черноморского побережья Кавказа, построенная по 33 случаям, имеет два максимума: один приходится на февраль, другой — на ноябрь, минимум падает на июль-август.

При построении суточного хода в обработку были включены данные 173 случаев поражений самолетов молниями. Максимум поражений приходится на 12—17 ч, минимум — на ночные часы (рис. 3). Такой характер суточного хода объясняется резким возрастанием числа самолето-вылетов в дневное время по сравнению с ночным, а также тем, что в обработку вошли данные о поражениях и в облаках слоистых форм, и в кучево-дождевых. В суточном ходе повторяемости поражений в облаках слоистых форм (34 случая) максимум поражений приходится на 20—22 ч (рис. 3). 62% всех поражений самолетов молниями (191 случай) приходится на интервал высот от 1000 до 3000 м. Температура

на уровне поражения самолетов молниями колеблется в пределах от -10 до $+10^{\circ}\text{C}$, причем в 70% случаев она находилась в интервале от 5 до -5°C . Наиболее вероятная температура поражения -2°C . В большинстве случаев на уровне поражений атмосфера была стратифицирована устойчиво. Средний вертикальный градиент температуры, рассчитанный по 76 случаям, составлял $6^{\circ}\text{C}/100$ м, причем в 50% случаев не превышал $6^{\circ}\text{C}/100$ м. Средний вертикальный градиент скорости ветра составлял $0,51$ м/с $\times 100$ м.

По облачности проанализировано 140 случаев. В 17% случаев по району наблюдались только кучево-дождевые облака в сочетании с другими облаками вертикального развития, в 34% случаев — облака слоистых форм, в 51% случаев — облака вертикального развития в сочетании с облаками слоистых форм. В районе поражения самолетов молниями в большинстве случаев не наблюдались привычных признаков развитых Св. Из проанализированных 140 случаев в 46% случаев в районе поражения самолетов молниями зассветок не наблюдалось, в 13% случаев наблюдались зассветки негрозового характера, в 37% — зассветки в стороне от трассы более чем на 10 км и только в 4% случаев самолет был поражен в зоне опасной зассветки.

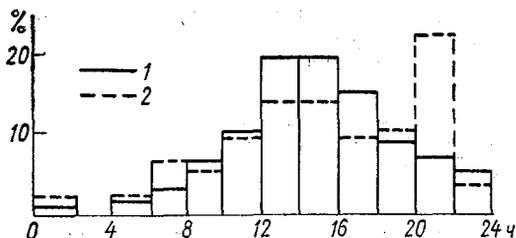


Рис. 3. Суточный ход относительного числа поражений самолетов молниями по облакам всех видов (1) и по облакам слоистых форм (2).

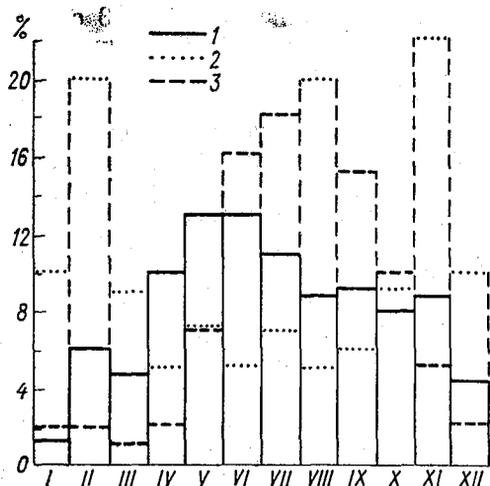


Рис. 2. Годовой ход относительного числа поражений самолетов молниями в целом по территории СССР (1), на Черноморском побережье Кавказа (2) и годовой ход повторяемости гроз для этого же района (3).

По данным экипажей самолетов, болтанка отсутствовала в 50% рассмотренных случаев, в 20% наблюдалась слабая болтанка, в 26% — умеренная и только в 4% — сильная. Рассчитанная по данным аэрологического зондирования вероятность болтанки самолета в 70% случаев не превышала 40%.

Влагосодержание воз-

духа на высотах при поражениях было относительно высоким. Для летнего сезона удельная влажность на поверхностях 850 и 700 мбар в среднем составляла 8,2 и 4,3 г/м³, для зимы 2,8 и 1,5 г/м³, для переходных сезонов 4,6 и 2,7 г/м³ соответственно.

Данные об осадках на уровне поражения были получены из показаний экипажа для 107 случаев. В шести случаях из 107 осадков не наблюдалось, в 73 случаях отсутствовало указание на их интенсивность, в 20 случаях наблюдались слабые осадки, в 3 — умеренные, в 5 — сильные.

Примерно в половине случаев поражения самолетов молнией непосредственно перед разрядом наблюдалось повышение уровня радиопомех, рысканье стрелок радиоконпасов, свечение заостренных частей самолета. Характеристики синоптических и погодных условий в дни с поражениями самолетов молниями, полученные путем статистической обработки, заключаются в следующем. В 75% случаев погода обуславливалась прохождением холодных и вторичных холодных фронтов, в 13% — прохождением фронтов окклюзии и теплых, в 12% поражения произошли в однородной воздушной массе.

Фронтальные системы, которые обуславливали погоду в районе поражения, не являлись активными, средняя скорость фронтов была около 20 м/с, контраст температуры в зоне фронта у земли в 80% случаев не превышал 4°С, рост давления за холодными и вторичными холодными фронтами в среднем составлял 1,4 мбар/3 ч. В 90% случаев фронты лежали в углубляющихся ложбинах, так что в среднем перед фронтом наблюдалось падение давления до 1,5 мбар/3 ч. Средняя скорость ветра при поражениях у земли не превышала 4 м/с. Температура у земли колебалась в широких пределах в зависимости от времени года, суток, географического района.

Исследовалась зависимость повторяемости поражений от типа самолета. Относительный налет часов на один случай поражения молнией для самолетов с турбореактивными двигателями — 11,5. Вероятность поражения самолетов данного типа зависит от условий его эксплуатации, в частности от времени нахождения самолета в облаках. В табл. 1 приводится вероятность поражения самолетов Ан-24, Ил-18 и Ту-104 на 1 км полета в целом по маршруту и в облаках слоистых форм As, Ns, Sc.

Таблица 1

Тип самолета	Вероятность поражения на 1 км пути	
	в целом по маршруту	в облаках As, Ns, Sc
Ан-24	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Ил-18	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Ту-104	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$

Зависимость вероятности поражения самолетов с турбовинтовыми двигателями в облаках слоистых форм от размеров L и скорости полета v , характеризующих произведением vL , приведена в табл. 2. Вероятность поражения самолета Ту-124 меньше, чем Ту-134, хотя размеры, скорости и условия эксплуатации их близки друг к другу. Разница в вероятности поражения этих самолетов обусловлена тем, что разряжающее действие струи газов у самолета Ту-134 меньше, чем у Ту-124.

Таблица 2

Тип самолета	Крейсерская скорость, v км/ч	Характерный размер, L м	vL	Относительная вероятность поражения
Ил-62	900	50	45 000	12,5
Ту-134	800	31	24 800	4,5
Ту-104	800	37	29 600	3,9
Ту-124	780	28	21 800	2,0
Як-40	600	22	13 200	1,0

Разряды, возникающие в активных грозовых облаках и в облаках слоистых форм, подобны по характеру разрушений, принимаемых ими самолетом.

Поскольку разрушения, вызванные молнией, зависят от тока электрического разряда, то из сказанного следует, что величины токов молний в обоих видах облаков подобны.

Изучение условий поражения самолетов молниями в негрозовых зонах позволило сделать следующие выводы.

Поражения самолетов молниями в большинстве случаев не связаны с зонами активной грозовой деятельности. Они могут происходить как в кучево-дождевых облаках, далеких от грозовой стадии, так и в облаках слоистых форм. На долю последних приходится 34% всех поражений. Получены средние характеристики атмосферы при поражениях самолетов молниями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева С. И., Евтеев Б. Ф. О градиенте потенциала электрического поля в слоисто-дождевых облаках.— Труды ГГО, 1972, вып. 277.
2. Евтеев Б. Ф., Камалдина И. И., Маркчев Н. Т., Пономарев Ю. Ф. Электрические поля в зимних облаках вторичного холодного фронта.— Труды ГГО, 1977, вып. 350, с. 91—95.
3. Имянитов И. М. Электризация самолетов в облаках и осадках. Л., Гидрометеиздат, 1970.
4. Имянитов И. М., Евтеев Б. Ф. Методическое письмо № 5 ГУГМС «О причинах, приводящих к поражению самолетов молниями в холодное время года», 1971.
5. Имянитов И. М., Евтеев Б. Ф., Камалдина И. И. О причинах, приводящих к поражению самолетов молниями в холодное время года. Л., Гидрометеиздат, 1976.

6. Имянитов И. М., Чубарина Е. В., Шварц Я. М. Электричество облаков. Л., Гидрометеониздат, 1971.
7. Curtis F. J. How dangerous lightning.— Aerospace Safety, 1964, vol. 20, N 3, p. 10—20.
8. Имянитов И. М., Евтеев В. Ф., Камалдина И. И. A thunderstorm cloud. In: Planetary Electrodynamics. Vol. 1. New York—London—Paris, Gordon and Breach Science Publisher, 1969.
9. Michael L. Yaffe. Air transport lightning strikes studied.— Aviation Week and Space Technology, 1972, № 11, p. 6.
10. Michael Phillips. Fire in Aircraft fuel tanks.— Engineering, 1970, № 26.
11. Perry B. L. Lightning and static hazards relative airworthlines. Papers presented of the Conference „Lightning and Static Electricity“, December 1970.
12. Philpott J. Lightning stroke in the aircraft.— Flight Intern., 1974' vol. 102, № 3316, p. 414.

В. А. Камышанова

ДЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ИЗМЕНЕНИИ ГРАДИЕНТА ПОТЕНЦИАЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ И ЕГО СВЯЗЬ С ЭПОХАМИ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

Одной из важнейших характеристик электрического поля атмосферы является градиент потенциала V' , который существенно зависит от характера погоды. При этом наибольшая зависимость V' отмечается для тех явлений погоды, которые создают объемные заряды в атмосфере. К числу последних прежде всего относятся грозовая активность, облака, запыленность воздуха, осадки.

В наших предыдущих исследованиях [1] было показано, что грозовая активность не только определяется местными физико-географическими факторами и региональными синоптическими особенностями отдельных районов, но и зависит от крупномасштабных атмосферных процессов.

В качестве последних мы брали формы W, C, E атмосферной циркуляции по классификации Г. Я. Вангенгейма. В этих исследованиях [1] было установлено, что в изменении повторяемости гроз на Европейской территории СССР выявляются длительные однозначные тенденции, сопоставимые по продолжительности с эпохами атмосферной циркуляции (10—30 лет) и их стадиями (2—6 лет). Они достаточно хорошо объясняются спецификой грозовой активности, свойственной формам W, C, E, и степенью развития этих форм в рассматриваемом периоде времени.

Учитывая сказанное выше о факторах, определяющих градиент потенциала, можно предположить, что столь же длительные однозначные (крупномасштабные составляющие) изменения должны наблюдаться и в многолетних изменениях градиента потенциала.

Чтобы изучить этот вопрос, мы использовали данные о ежемесячных значениях градиента потенциала за 1916—1976 гг. На основе этих данных нами были подсчитаны средние за указанный ряд лет (1916—1976 гг.) значения градиента потенциала для каждого месяца и года.

Эти значения были приняты в качестве месячной и годовой нормы, и на их основе были определены отклонения от этой нормы для каждого года. Последние алгебраически суммировались и наносились на график (рис. 1). В нижней части графика отмечены эпохи атмосферной циркуляции, границы между которыми проведены вертикальными прямыми. К сожалению, данные градиента потенциала за последние годы отсутствуют.

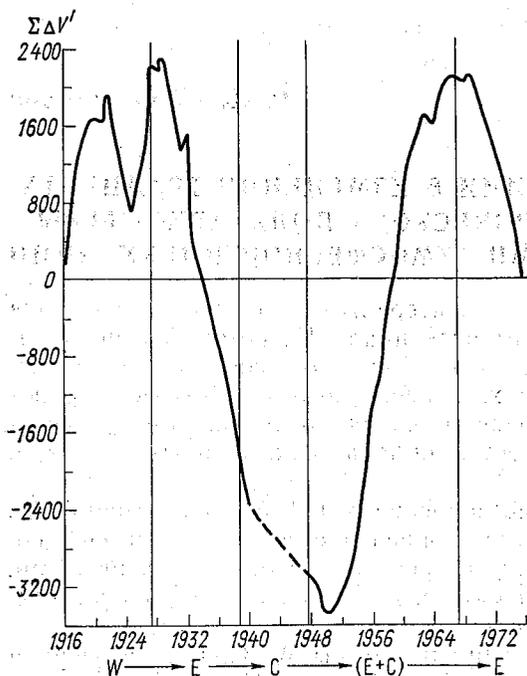


Рис. 1. Интегральная кривая аномалий годовых значений градиента потенциала электрического поля по данным измерений под Ленинградом за 1916—1976 гг.

Чтобы объяснить особенность этой кривой (длительные спады и подъемы) и связать их с эпохами атмосферной циркуляции, необходимо было определить значения градиента потенциала, свойственные каждой из трех форм циркуляции (W, C, E). С этой целью, пользуясь каталогом указанных форм мы выбрали месяцы имеющегося ряда (1916—1976 гг.), в которых одна из форм занимала 20 и более дней. Так, для формы E были выбраны 129 месяцев, для формы C 23 месяца и для формы W 62 месяца. Затем для каждой формы подсчитывалось среднее из выбранного числа месяцев значение градиента потенциала. Оказалось, что для W среднее месячное значение градиента потенциала составило 130 В/м, для E 147 В/м, а для C 168 В/м. Таким образом, наибольшие значения градиента потенциала отмечаются при процессах формы C, наименьшие при W и промежуточные при E. Разность между крайними значениями составляет 38 В/м, что существенно. После этого значение градиента потенциала для каждого из выбранных месяцев с формой, например W, сравнивалось с нормой соответствующего месяца и определялось отклонение от нормы.

Оказалось, что в месяцах с процессами формы W и E преобладали значения градиента потенциала ниже нормы, а при форме C — выше нормы.

Отсюда следует, что интегральная кривая аномалий годовых значений градиента потенциала должна обнаруживать спад

в эпохи форм циркуляции W-п. E (складывались отрицательные аномалии градиента) и рост градиента потенциала в эпоху формы С.

Подтверждение сказанному можно видеть на рис. 1. В эпохи циркуляции E (1929—1939 и 1968—1976 гг.) интегральная кривая довольно круто снижалась. В эпоху же комбинированной (E+C) циркуляции (1951—1967 гг.) кривая стремительно росла, т. е. в эти годы значения градиента потенциала, как правило, превышали норму. Поскольку, как указано выше, при форме E преобладают отрицательные аномалии градиента (спад кривой), то указанный рост кривой в период 1951—1967 гг. во многом обусловлен вторым компонентом, а именно процессами формы С.

В эпохи же «чистого» E (1929—1939, 1968—1976 гг.) значения градиента потенциала были ниже нормы, и поэтому интегральная кривая снижалась.

Несколько неопределенным является ход кривой в эпоху формы W (1900—1928 гг.), поскольку наш ряд начинается с 1916 г., т. е. спустя 12 лет, и для эпохи формы С (1940—1948 гг.), когда отсутствовали данные наблюдений градиента.

Однако, пользуясь типовой характеристикой формы С, можно полагать, что в годы эпохи формы С кривая росла, т. е. здесь значения градиента потенциала, как правило, превышали норму.

Приведенный выше анализ позволяет сделать следующие основные выводы:

1. В многолетнем изменении градиента потенциала электрического поля атмосферы, подобно многолетнему изменению грозовой активности, обнаруживаются длительные однозначные тенденции, продолжительностью от 9 до 24 лет. В течение этих периодов отмечается преобладание положительных или отрицательных аномалий годовых значений градиента. Поскольку продолжительность этих периодов близка к продолжительности циркуляционных эпох, то это дает основание считать, что наличие эпох в развитии атмосферной циркуляции и их многолетние преобразования являются одной из важнейших причин наличия указанных тенденций в многолетнем изменении градиента потенциала.

2. При объяснении причин возникновения электрического поля Земли обычно выделяют глобальные и локальные генераторы. Установленные в данной работе зависимости изменения электрического поля Земли и многолетних преобразований форм атмосферной циркуляции дают основания считать, что атмосферная циркуляция может рассматриваться как один из видов глобального генератора, создающего крупномасштабные особенности и изменения электрического поля Земли.

3. Формы атмосферной циркуляции, как было показано нами ранее [1], являются комплексными понятиями, с которыми связаны ряд характеристик атмосферы (температура воздуха, фронты, облачность, осадки и пр.), влияющих на грозовую деятельность. Последняя же, как известно, является главным генератором, заряжающим сферический конденсатор, понятие о котором

лежит в основе гипотез, объясняющих происхождение электрического поля Земли.

4. Приведенные выше результаты получены лишь для одной характеристики электрического поля Земли — градиента потенциала V' . Поэтому в дальнейшем целесообразно проделать такую же работу для всех имеющихся станций и характеристик электрического поля. Это, несомненно, позволит более полно осветить роль и мощность глобальных и локальных генераторов электрического поля Земли.

5. Сопоставляя рис. 1 с изменениями грозовой активности на станции Воейково, можно обнаружить некоторые противоречия. Так, в эпоху формы E (1929—1939 гг.) грозовая активность превышала норму, а градиент потенциала был ниже нормы. Градиент потенциала зависит от степени развития грозовой активности, но это не единственная причина. Роль других факторов в конкретных случаях и на конкретных станциях может оказаться более значительной, что может изменить даже знак связи.

Это тем более возможно, что на наших типовых картах [1] вероятность положительной аномалии грозовой активности для Воейкова близка к 50%. Это говорит о том, что здесь отмечается значительная вероятность и обратного знака связи. Возможно, это также сказалось на спаде кривой градиента потенциала в эпоху формы E в Воейкове.

Этот вопрос необходимо развивать, изучая конкретные случаи (разновидности) форм W, C, E и специфику их проявления в грозовой деятельности, а не ограничиваться суммарной (вероятностной).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Камышанова В. А. Грозовая активность на территории СССР и ее связь с формами атмосферной циркуляции северного полушария.— Труды ГГО, 1972, вып. 277, с. 18—26.

Нол-ро грз и их изменчивость зависит от фазы атмосферной циркуляции. Это особенно не следует забывать в Мн. др. м.

В. П. Колоколов, Г. П. Павлова, В. А. Камышанова

ИССЛЕДОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ЦИКЛА РАЗВИТИЯ ГРОЗ В ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Известно, что грозовая деятельность обладает значительными контрастами в районах, которые характеризуются сложными физико-географическими условиями. Так, неоднократно установлено, что в горных районах частота и интенсивность гроз зависят от формы рельефа, высоты места над уровнем моря, экспозиции склонов. В работе [1] приводятся результаты наблюдений за грозами на гидрометеостанциях на Тянь-Шане, в районах Иссык-Куля, Фрунзе, Джамбула и Андижана, из рассмотрения которых следует, что в горных условиях существуют районы с линейными размерами 10—100 км, где грозовая деятельность сильно отличается от грозовой деятельности в соседних, сопредельных с ними районах. Так, например, суммарная годовая продолжительность гроз на трассе длиной в 100—150 км в некоторых случаях может меняться на порядок и более. Проведенные в этом районе наблюдения за числом грозовых разрядов при помощи счетчиков молний позволяют сделать тот же вывод и относительно числа грозовых разрядов.

Даже небольшие возвышенности, как это следует, например, из работ [5, 6], могут существенно сказываться на грозовой деятельности. Влияние на потоки воздуха, а следовательно и на грозовую деятельность, оказывают возвышенности высотой 100—300 м, такие, например, как Керенско-Чембарская, Сурская шишка на Приволжской возвышенности и др.

Однако мезомасштабные грозовые образования определяются не только орографией. Введенная Колмагоровым терминология локальной однородности и локальной изотропии означает, что метеорологические поля остаются таковыми лишь в пределах пространственных и временных масштабов, характерных для рассматриваемых процессов. В зависимости от масштабов метеорологические поля разделяются на микро-, мезо- и макроструктурные. Принято считать, что статистическая мезоструктура описывает особенности метеорологических полей, в нашем случае гроз,

в интервале расстояний от нескольких километров до сотен километров.

По данным спутниковых измерений [4], мощные конвективные облака и связанные с ними грозы на холодных фронтах и фронтах окклюзии имеют на телевизионных и инфракрасных снимках вид ярко-белых спирально-изогнутых полос длиной от нескольких сотен до тысячи километров.

Мезомасштабные характеристики грозовой деятельности нами рассматривались на материалах, полученных в Ленинградской области. Для этой цели были использованы данные наблюдений за грозовой сезон (июль-август) 1977 г.

Для исследования естественного цикла развития гроз в Ленинградской области была использована сеть грозорегистраторов ПРГ-100 (полупроводниковый грозорегистратор с радиусом действия 100 км) [3], состоящая из 15 станций, более или менее равномерно освещающих территорию области в грозовом отношении. Эта сеть позволяла оценить электрическую активность главным образом фронтальных гроз, так как с помощью каждого грозорегистратора можно было получить информацию о числе молний, происходящих в зоне радиусом в несколько десятков километров вокруг пункта наблюдения. В радиусе, равном 50 км, практически регистрируется около 75% приходящих разрядов.

Для исследования структуры потока генерируемых фронтальными грозами различного происхождения атмосфериков, который, в свою очередь, характеризует степень активности грозовых образований, был использован блок счетчиков молний, состоящий из пяти приборов с радиусами 150, 100, 50, 25 и 5 км. Поскольку пятикилометровый счетчик даже во время сильных гроз регистрировал лишь единичные разряды, то его показания использованы не были.

Для наглядности представления результатов наблюдений за основу брали бланк-карту, где по данным МРЛ-2 наносились контуры зон радиоэха с индексами грозы, полученными как произведение значений высоты верхней границы облачности (H) на отражаемость ($\lg Z$) на верхнем уровне (H_{\max}). На бланк-карте показаны наблюдения грозорегистраторов, охватывающих площадь радиусом 50 км от места установки. Данные счетчиков молний с различными радиусами действия, установленных в Воейкове, приводятся на бланк-картах справа в виде гистограмм. Четыре столбика изображают собой гистограмму числа разрядов, зарегистрированных счетчиками молний с радиусами (слева направо) 150, 100, 50 и 25 км. Верхняя гистограмма показывает суммарное число разрядов за 30 минут до срока, нижняя — за 30 минут после срока, указанного на бланк-карте (рис. 1).

Интенсивность грозовых очагов позволил оценить панорамный грозорегистратор [2], при помощи которого производилась непрерывная запись распределения грозовых очагов по восьми секторам в пределах от 50 до 200 км с помощью двух восьмиканальных самописцев. Грозы показаны по градациям: слабая (1—10

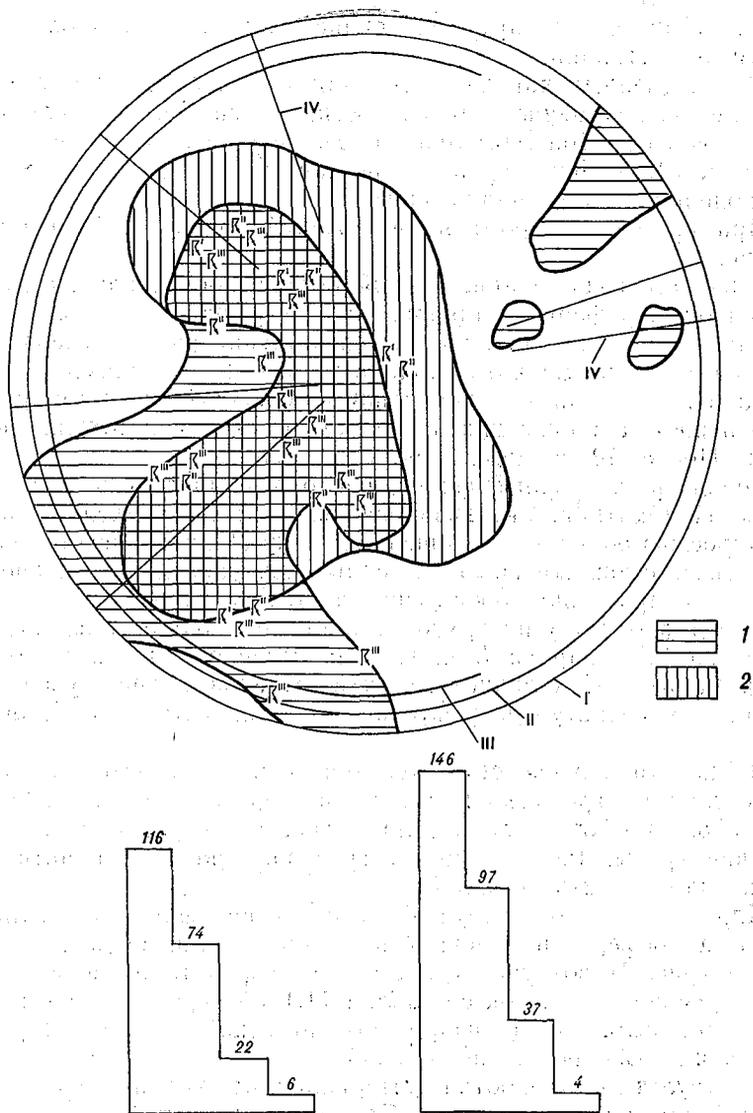


Рис. 1. Пример представления данных наблюдений за грозами.
17 ч 2 июля 1977 г.

K' — грозы по грозорегистратору, K'' — грозы по визуальным наблюдениям метеостанций, K''' — грозы по радиолокационным критериям; 1 — области радиозаха, 2 — области гроз по данным сети грозорегистраторов. Направление по панорамному грозорегистратору на грозу: I — слабую, II — умеренную, III — сильную, IV — пеленги по грозопеленгатору-дальномеру.

разрядов), умеренная (10—30 разрядов), сильная (более 30 разрядов).

Затем на бланк-карту наносились данные счетчиков молний и сети метеостанций.

Перечисленные данные позволяли исследовать развитие, распределение, изменение интенсивности, площади и количества грозовых очагов. Дополнительно были привлечены синоптические карты и кольцовки, карты барической топографии за все сроки наблюдений, а также радиозонды.

Пример анализа грозового положения 2 июля за 17 ч показан на рис. 1.

2 июля погода Ленинградской области обуславливалась юго-восточной периферией циклона, который располагался у Стокгольма. В ложбине циклона восточнее Ленинграда с севера на юг проходил малоподвижный холодный фронт с волнами, который смещался в восточном направлении со скоростью 20 км/ч (рис. 2).

В первой половине дня по области отмечались дожди, гроз не было. После 12 ч погода резко изменилась.

Холодный вторичный фронт, располагавшийся утром на побережье Прибалтики, активизировался, стал смещаться на восток со скоростью 50 км/ч и подошел к западу Ленинградской области.

В связи с южным выносом теплых воздушных масс и дневным прогревом произошло обострение фронтальных разделов.

Перед фронтом у поверхности земли наблюдалось падение давления на 3,1 мбар за 3 ч. С запада перемещалась воздушная масса на 3—5°С холоднее местной. Следовательно, увеличился контраст температур и усилились вертикальные движения воздуха.

В данном случае семь пунктов грозорегистраторов, девять метеостанций, грозопеленгатор-дальномер в азимутах 230—265, 310—335, 70—78° и панорамный грозорегистратор показывают наличие грозы. Рассмотренный грозовой очаг имеет активность 80 разряд/ч на одну станцию.

Для анализа степени устойчивости стратификации различных слоев атмосферы привлекались данные радиозондов. 2 июля в 15 ч (рис. 2) воздушная масса в зоне фронта была неустойчивая, вертикальный поток составлял 11,4 м/с, уровень конвекции — 240 мбар. Были проанализированы, но менее подробно, 18 грозовых дней за 129 сроков наблюдений.

В результате обработки материалов наблюдений гроз за сезон в Ленинградской области была составлена табл. 1.

При сравнении данных, приведенных в таблице, можно сделать вывод о том, что активные фронтальные разделы определяют и развитие более обширных по размерам грозовых очагов с большей интенсивностью, чем внутримассовые образования, имеющие часто локальный характер. С увеличением площадей грозовых очагов возрастает и число метеостанций и пунктов грозорегистраторов, отметивших грозу. Продолжительность существования крупных грозовых очагов составляет 7—8 ч.

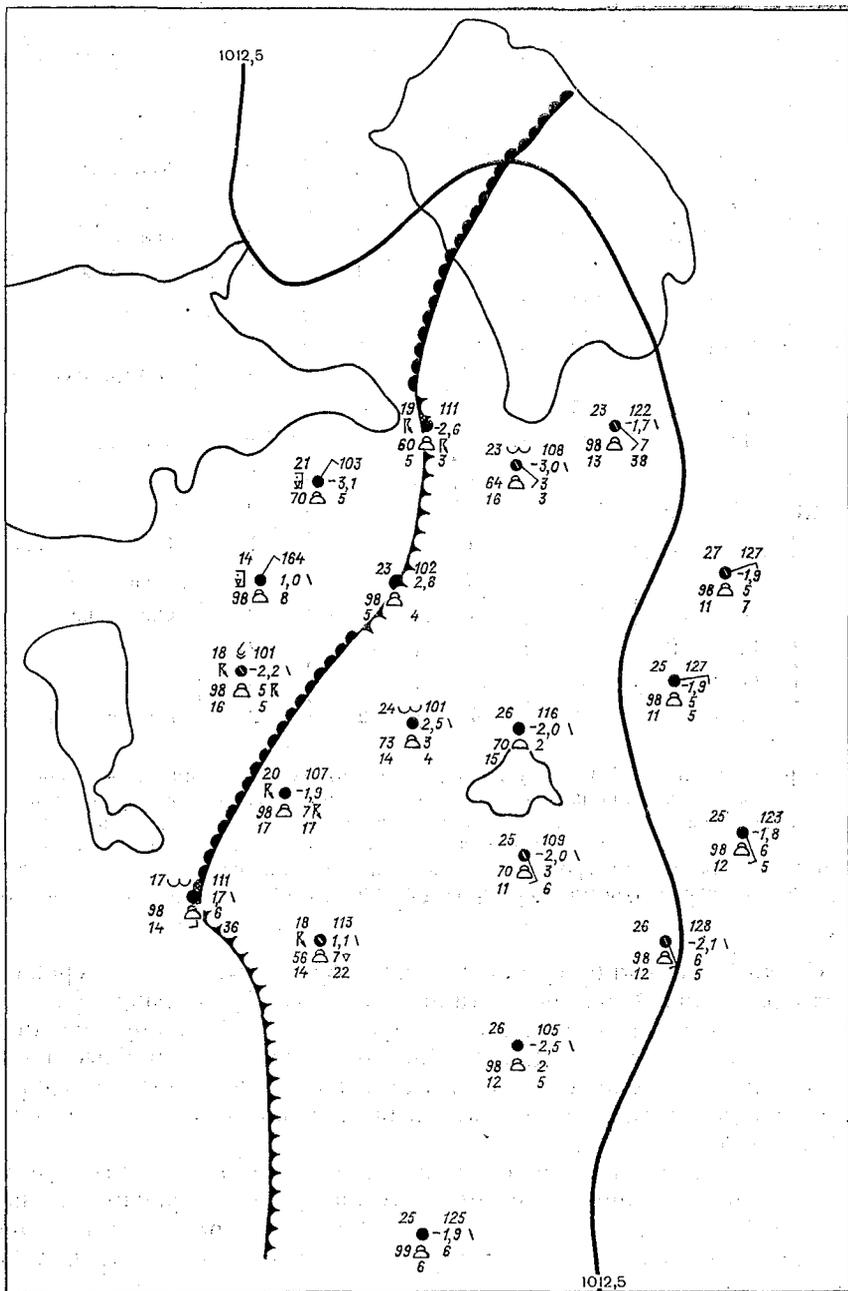


Рис. 2. Пример анализа грозowego положения по метеорологическим данным за 15 ч 2 июля 1977 г.

Таблица 1

Дата	ΣN	N	ΣS	$S \cdot 10^3 \text{ км}^2$	n_M	n_T	Тип фронтального раздела
1 VII	69	8	84	8	2	2	Окклюзия
2	463	51	146	13	4	2	Холодный
3	424	39	219	13	4	3	Теплый
4	74	15	82	6	1	1	Окклюзия
5	43	11	41	6	1	2	Холодный
17	32	4	141	11	2	2	"
22	579	45	156	12	5	5	"
23	10	5	23	3	—	1	Внутримассовый
24	12	6	45	5	—	1	"
25	642	64	125	12	3	2	Холодный
29	719	66	124	8	3	3	"
1 VIII	175	19	127	7	2	3	"
5	2	2	3	1	—	1	Внутримассовый
9	2	2	7	2	—	1	Холодный
10	1258	60	174	7	2	2	Окклюзия
11	37	9	53	8	—	2	"
24	288	48	65	11	3	3	"
31	27	9	22	7	2	2	Внутримассовый

Примечание. ΣN — сумма разрядов по всем станциям; N — среднее число разрядов на станцию; ΣS — сумма площадей грозовых очагов по данным МРЛ в Пулкове и грозорегистраторов, установленных на 11 станциях Ленинградской области; S — средняя площадь грозового очага; n_M — среднее число метеостанций, отметивших грозу визуальным и передавших штормовое оповещение; n_T — среднее число пунктов грозорегистраторов, отметивших грозу в указанный день.

Средняя площадь грозового очага $S=8$ тыс. км², а среднее число разрядов N на одну станцию составляет 38 разряд/ч. Для оценки рассеяния возможных значений S и N вокруг средней вычислены средние квадратические отклонения σ , равные соответственно $\sigma_S=7000$, $\sigma_N=43$. Были также вычислены коэффициенты вариации C_v как объективный признак изменчивости рассматриваемых элементов.

Средние квадратические отклонения и коэффициенты вариации показывают значительную неустойчивость в распределении площадей грозовых очагов в их интенсивности от срока к сроку для различных грозовых дней и составляют соответственно 90 и 110% нормы.

Из табл. 1 видно, что площадь, занятая грозами, и их интенсивность на холодных фронтах и фронтах окклюзии больше, чем при внутримассовых грозах. Дополнительно были построены кри-

вые обеспеченности N по различным типам фронтов (рис. 3). Эти кривые строились по следующему числу случаев:

Тип фронтального раздела	Число случаев
Холодный	68
Окклюзии	47
Внутримассовые	9
Теплый	11

Анализ интегральных кривых производился путем совмещения их по центру распределения. Наиболее близко расположенные кривые характеризуют и определенный режим циркуляционных

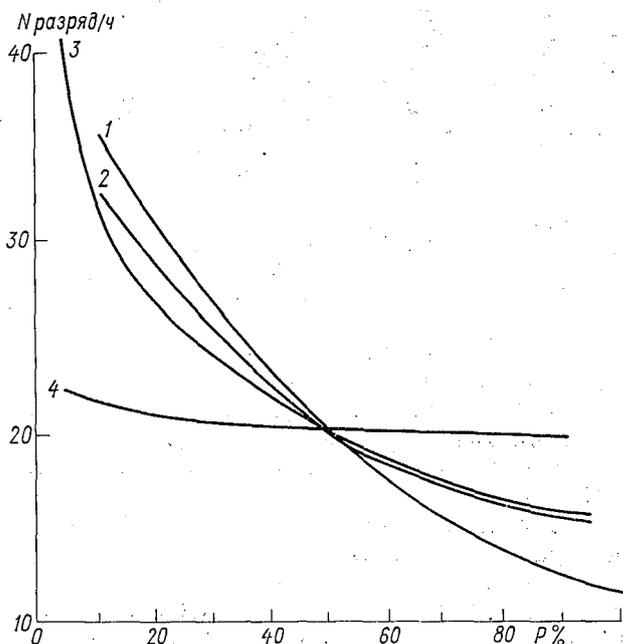


Рис. 3. Кривые распределения молниевых разрядов при различных типах фронтальных разделов.

1 — холодный фронт, 2 — фронт окклюзии, 3 — теплый фронт, 4 — внутримассовые грозы.

факторов для возникновения конвекции. Из рассмотрения кривых, представленных на рис. 3, следует, что распределения молниевых разрядов в различных синоптических положениях сильно отличаются друг от друга как по своим средним значениям, так и по

разбросу значений или дисперсиям (речь идет о характеристиках, усредненных по большой площади).

Наибольший разброс значений числа грозовых разрядов наблюдается при прохождении холодных фронтов, а также фронтов окклюзии. При внутримассовых грозах электрическая активность сглаживается и вероятность возникновения как слабых, так и сильных гроз остается почти постоянной. Промежуточное положение занимают грозы, возникающие на теплом фронте. Здесь вероятность возникновения гроз с малым (или большим) числом молний меньше, чем при грозах на холодных фронтах, но больше, чем при внутримассовых грозах.

Очевидно, такое различие в грозовой деятельности вызвано специфическими аэросиноптическими условиями.

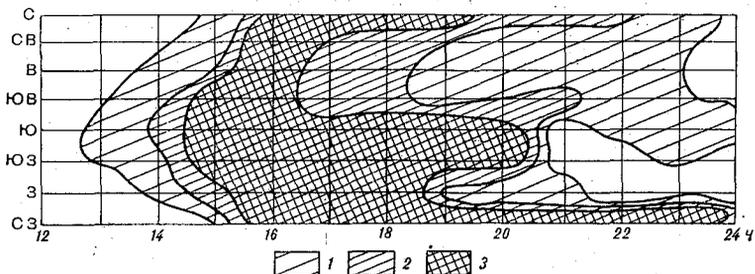


Рис. 4. Пример записи на ленте панорамного регистратора, представленной в обобщенном виде по трем градациям грозовой деятельности в районе пункта наблюдений 2 июля 1977 г.

1 — слабая гроза, 2 — умеренная, 3 — сильная.

Была сделана попытка обобщить и систематизировать данные панорамного регистратора. С этой целью записи прибора были представлены в виде, наиболее удобном для пространственно-временного восприятия развития грозы. Пример обработки показан на рис. 4, где изолиниями выделены начало и конец явления и штриховкой показаны зоны различной грозовой интенсивности. Так, например, 2 июля слабая гроза на холодном фронте началась на юге Ленинградской области в 13 ч, затем к 16 ч уже во всех секторах и радиусе 200 км от Воейкова отмечались сильные молниевые разряды, а к 20 часам грозовая активность ослабевает.

Даже не имея никаких других данных, можно с помощью панорамного грозорегистратора оценить систематические изменения и колебания грозовой деятельности за длительное время.

На рис. 5 представлены примеры записи потока атмосфериков, зарегистрированные счетчиками молний системы ГГО. По структуре этих потоков можно составить представление о некоторых закономерностях грозовой деятельности на территории в радиусе нескольких десятков километров от точки, где установлены приборы (радиус наиболее чувствительного счетчика составлял 150 км). Осреднение по времени структуры потока атмосфериков

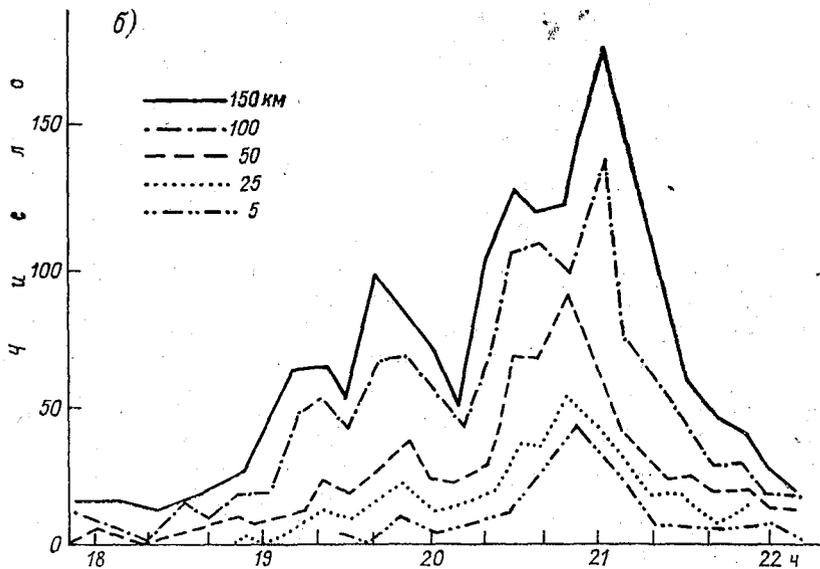
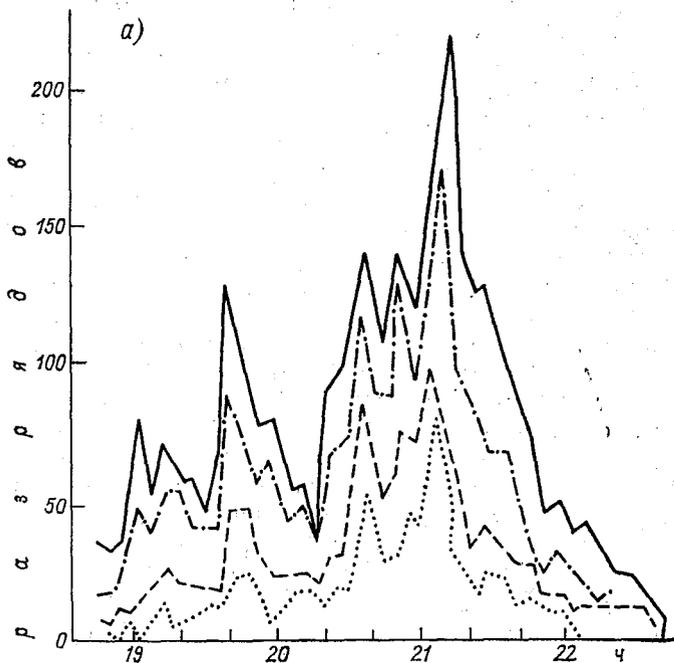


Рис. 5. Ход числа разрядов, зарегистрированных счетчиками различной чувствительности в течение 5-минутных (а) и 15-минутных (б) интервалов 10 августа 1977 г.

осуществлялось путем снятия показаний со счетчиков молний через 5- и 15-минутные интервалы.

На рис. 5а можно обнаружить циклы грозовой деятельности длительностью 10—15 мин, а на рис. 5б эти циклы сглаживаются и проявляются более длительные вариации, составляющие интервалы длительностью 30—40 мин.

Представляется интересным отметить, что структурные вариации наблюдаются на кривых числа разрядов, полученных при помощи счетчиков с различным порогом срабатывания (с различным радиусом действия).

Возможное физическое объяснение замеченной цикличности состоит в том, что наблюдается последовательное развитие грозовой ячейки, жизнь которой составляет примерно 30—40 мин, а затем начинает действовать другая ячейка (рис. 5, от 19 ч до 19 ч 40 мин и от 19 ч 40 мин до 20 ч 15 мин). От 20 ч 15 мин до 21 ч 30 мин одновременно действуют несколько грозовых ячеек.

Более мелкие «зубцы», наблюдаемые на рисунке, характеризуют пульсации грозовой активности единичной ячейки. При определении за 10—15-минутные интервалы эти мелкие «зубцы» исчезают.

Выводы

1. Грозовой очаг во времени и пространстве претерпевает непрерывные изменения, меняется конфигурация очагов, их число, однако общая площадь очагов в течение нескольких часов остается постоянной.

2) При сильно развитой грозовой деятельности разряды приходят в пункт наблюдения одновременно из нескольких направлений.

3. Продолжительность существования крупных очагов составляет 7—8 ч.

4. Средние квадратические отклонения показывают особенно значительную неустойчивость в распределении числа молниевых разрядов от срока к сроку для различных грозовых дней.

5. Для Ленинградской области в целом коэффициент вариации числа разрядов за сезон составляет 1,1, для площадей грозовых очагов 0,9.

6. Грозовая деятельность, если оценивать ее числом грозовых разрядов, имеет определенную периодичность. Квазипериод составляет временной интервал, равный примерно 30—40 мин. Внутри квазипериода имеются флуктуации разрядной деятельности, выраженные в следующих друг за другом пиках длительностью 10—15 мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Витовский В. А. Исследования удельной грозовой деятельности и поражаемости молниями горных районов Тянь-Шаня.—Труды I Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству, 1976, с. 268—275.

2. Иньков Б. К. Объединение особенностей традиционной аппаратуры в панорамном регистраторе близких гроз.—Труды ГГО, 1977, вып. 350, с. 3—17.
3. Колоколов В. П., Шварц Я. М. Методы наблюдений элементов атмосферного электричества. Обнинск, изд. ВНИИГМИ—МЦД, 1976 с. 66
4. Решетов Г. Д. Прогноз дневных и ночных гроз.—Труды Гидрометцентра СССР, 1977, вып. 176, с. 86—99.
5. Чуваев А. П., Шварц В. Т. Некоторые особенности грозовой деятельности в районах Среднего Заволжья.—Труды ГГО, 1976, вып. 349, с. 155—174.
6. Чуваев А. П., Шварц В. Т. Об особенностях формирования грозовой деятельности на Приволжской возвышенности.—Труды ГГО, 1976, вып. 349, с. 127—154.

*В. А. Камышанова, Т. В. Лободин,
Г. П. Павлова*

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ТИПЫ И ГРОЗОВАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Для выяснения самых общих закономерностей географического распределения грозовой деятельности была использована классификация климата М. И. Будыко [1] для территории СССР, а для всей Земли — классификация Б. П. Алисова и Кеппена. В процессе этой работы было найдено среднее число дней с грозой по квадратам размером $5 \times 5^\circ$ (по широте и долготе), полученное по данным визуальных наблюдений за грозами с 1957 по 1969 г. на 600 метеорологических станциях, причем в каждом квадрате брались четыре равномерно расположенные в нем станции. В результате на карту (рис. 1) были нанесены индексы климатического районирования по М. И. Будыко (числитель) и среднее число дней с грозой (знаменатель). На карте видно, что среднее число дней с грозой изменяется в зависимости от климатического района. Рассмотрим характеристики грозовой деятельности по климатическим зонам.

В климатической зоне избыточно влажного климата с холодным летом (12), расположенной на крайнем севере и северо-востоке СССР бывает в среднем до 3 дней с грозой. Коэффициент вариации C_v достигает значения 0,6, что говорит о значительной изменчивости грозовой активности в рассматриваемый период. С удалением от берега грозовая активность повышается. При норме от 1 до 4 дней грозы бывают не ежегодно.

Зона влажного климата с умеренно теплым летом (II3) охватывает значительную часть территории СССР. Ввиду большой протяженности этой зоны средние значения годового числа дней с грозой колеблются от 10 до 29 при $C_v \approx 0,1-0,3$. Грозовая активность увеличивается с уменьшением широты, но резко падает на побережье Охотского моря. Максимум интенсивности гроз приходится на середину рассматриваемого периода. На всей этой территории отмечается значительная изменчивость грозовых процессов. Зона недостаточного увлажнения с умеренно теплым летом (III3) занимает сравнительно небольшую территорию. Нор-

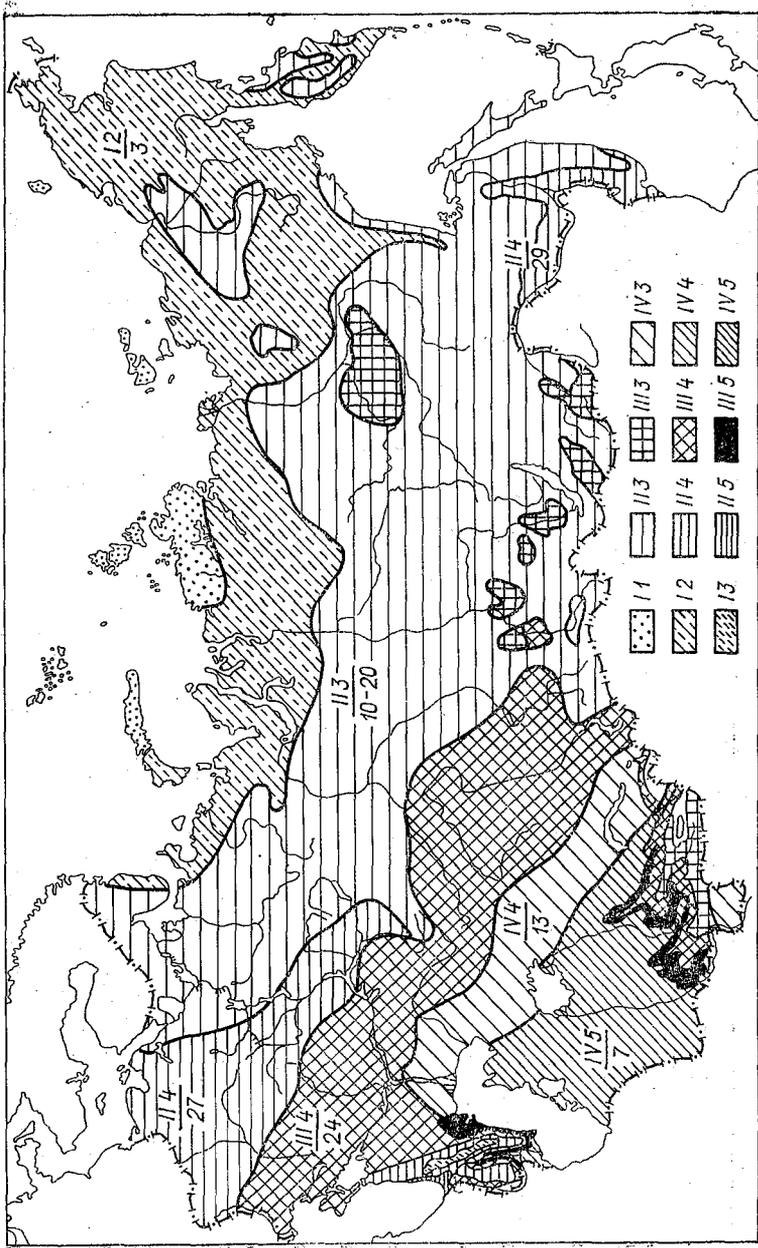


Рис. 1. Характеристика грозовой деятельности в различных климатических зонах СССР, по М. И. Будыко [1].
 Климат: I — избыточно влажный, II — влажный, III — недостаточно влажный, IV — сухой. Лето: 1 — очень холодное, 2 — холодное, 3 — умеренно теплое, 4 — теплое, 5 — очень теплое.

Среднее годовое число разрядов на 1 км² в различных климатических зонах, по Алисову

Климатические зоны	Азия	Африка	Австралия	Северная Америка	Южная Америка	Европа
Экваториальная	1) 15 6—10	20			2) 15—20	
Экваториальных муссонов	4) 1—2 5) 4—8 10) 0,5—1	6) 10—20 7) 1—2	3—10	8—10	3) 10—15 8) 4—6 9) 6—12	
Тропическая		11) 1 12) 0—1	13) 1 14) 1—2	15) 4—6 16) 8	17) 4—6 18) 0,5—1	
Субтропическая	19) 2 20) 0,5—1	24) 2—3 25) 1—8	26) 1 27) 2—3	28) 0,5—1 29) 2—4 30) 0—1 31) 4—6 32) 6—8 37) 0,5—1 38) 2—4	33) 2—4 34) 1—2	
Умеренная	21) 2 22) 2 23) 2—4 35) 2			39) 0,5—1 40) 0,05—0,5		41) 2—4
Субарктическая	36) 1—2			42) 0,05—0,5 43) 0,5—1 44) 1—2 45) 0,5—1 46) 2—3 47) 2		48) 2—4
Арктическая				49) 0,05		

Примечание. Цифрами 1—48 обозначены следующие области континентов: 1) южно-индийская, 2) амазонская и тихоокеанская, 3) высокогорная, 4) индийская, 5) илокайтийская, 6) атлантическая и континентальная, 7) индийская, 8) северного полушария, атлантическая, 9) южного полушария, континентально-атлантическая, 10) аравийская, 11) атлантическая, 12) континентальная, 13) континентальная, 14) тихоокеанская, 15) атлантико-тихоокеанская, 16) атлантическая, 17) атлантическая и континентальная, 18) высокогорная и тихоокеанская, 20) иранская, 21) высокогорная, 22) центрально-азиатская, 23) муссонная, 24) средиземноморская, 25) атлантико-индийская, 26) индийская и южно-австралийская, 27) тихоокеанская, 28) тихоокеанская, 29) континентальная, 30) высокогорная, 31) атлантико-континентальная, 32) атлантическая муссонная, 33) атлантическая и континентальная, 34) высокогорная и тихоокеанская, 35) континентальная, 36) муссонная, 37) тихоокеанская, 38) континентальная и атлантическая муссонная, 39) тихоокеанская подветренная, 40) тихоокеанская, 41) атлантико-средиземноморская и континентально-средиземноморская, 42) тихоокеанская, 43) континентальная, 44) атлантическая, 45) атлантико-арктическая, 46) атлантико-континентальная, 47) континентально-европейская, 48) тихоокеанская, 49) канадская.

ма гроз изменяется здесь от 18 до 23 дней. Во влажной зоне с теплым летом (II4) на фоне высокой грозовой активности отмечается в среднем 25—30 грозовых дней при очень значительной изменчивости гроз по ее территории.

Южную часть ЕТС и Западной Сибири занимает зона недостаточно влажного климата с теплым летом (III4), в которой среднее количество дней с грозой колеблется от 16 до 27 при $C_v \approx 2,0-0,3$. Здесь грозовая активность несколько ниже, чем в зоне II4.

Климатические условия Прикаспия и Северного Казахстана характеризуются зоной северной пустыни (IV4), в которой наблюдается в среднем 12—14 дней с грозой.

В зоне пустыни (IV5) наблюдается лишь незначительная грозовая активность, при норме 6—9 дней грозы бывает не ежегодно, а коэффициент вариации достигает значений около 0,6 ввиду неустойчивого режима увлажнения. Можно обратить внимание на увеличение грозовой активности при продвижении к предгорьям на востоке.

Таблица 2

Связь S (10^{-6} км²) и T (дни) для различных типов климата, по Кеппену

Тип климата									
Af		A \bar{w}		B \bar{w}		Bs		Cf	
S	T	S	T	S	T	S	T	S	T
Континенты									
1,2	40—60	2,5	40—60	3,5	0—5	0,7	0—5	0,9	5—10
1,5	60—80	2,6	60—80	18,0	5—10	0,5	5—10	1,1	10—20
0,7	80—100	5,0	80—100	3,2	10—20	2,0	10—20	1,3	20—40
1,0	100—140	5,0	100—140	0,5	20—40	1,2	20—40	1,7	40—60
0,3	140—180	0,2	140—180	0,2	40—60	0,5	40—60	0,4	60—80
						0,2	60—80		
Континенты									
C \bar{w}		Cs		Df		D \bar{w}		E	
S	T	S	T	S	T	S	T	S	T
0,1	10—20	1,4	0—20	7,0	5—10	1,7	0—5	21,0	0—1
2,0	20—40	0,3	20—40	0,7	10—20	3,1	5—10	1,0	1—10
1,1	40—60			2,5	20—40	1,0	10—20		
				0,1	40—60				

Af		A \bar{w}		B \bar{w}		Bs	
S	T	S	T	S	T	S	T
Океаны							
8,2	0—10	7,3	0—10	40,0	0—5	14,6	0—5
3,1	10—20	17,2	10—20	11,1	5—10	13,6	5—10
11,9	20—30	7,3	20—30	1,8	10—20	7,3	10—20
9,1	30—40	6,4	30—40	0,1	20—40	1,0	20—30
2,7	40—60	3,7	40—60			2,7	30—40
0,2	60—80	1,8	60—80				

Cf		Cs		E	
S	T	S	T	S	T
21,0	0—5	1,0	0—5	40,0	0,1
27,3	5—10	8,2	5—10	2,0	1,5
13,6	10—20	5,5	10—20	2,0	5—10
2,7	20—40	1,0	20—40		
1,0	40—60				

Карты распределения среднего годового числа разрядов по поверхности земного шара, составленные в результате применения разработанной методики пересчета данных о среднем числе дней с грозой в среднее число разрядов на единицу площади, были использованы также для выяснения зависимости грозовой деятельности от комплекса физико-географических факторов, учитываемого по классификации Б. П. Алисова. Сводка соответствующих характеристик по отдельным континентам дается в табл. 1.

По классификации Кеппена имеется 11 типов климатов, подразделенных на 5 областей. Наиболее характерные значения годового числа дней с грозой T и соответствующие площади S , занятые отдельными типами, приведены в табл. 2. Характеристики грозовой деятельности в зависимости от типа климата как по Алисову, так и по Кеппену в общих чертах изменяются подобным образом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будыко М. И. Климат и жизнь. Л., Гидрометеиздат, 1971, 456 с.

*Л. Г. Махоткин, Б. К. Иньков,
Г. П. Лещенко, В. И. Синегубов*

ВОПРОСЫ ОПЕРАТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ПО СЧЕТЧИКАМ ГРОЗОВЫХ РАЗРЯДОВ

Счетчики местных грозовых разрядов, называвшиеся ранее также грозорегистраторами или грозоотметчиками [3, 14], предназначались в первую очередь для получения режимных данных о местной грозовой деятельности, характеризующейся средним числом разрядов на единицу площади. Методика интерпретации непосредственных показаний этих приборов получила достаточно надежную основу только после введения понятия об эффективном радиусе действия R_e и разработки практически удобного способа его регулярного определения [4, 9]. Тем не менее инструментальные наблюдения за местными грозами пока еще не вводятся на сети метеостанций, но при проведении исследовательских работ уже требуется обеспечить получение более точных оценок грозовой деятельности по сравнению с данными бесприборных наблюдений. С этой целью счетчики были установлены, в частности, на ряде метеостанций в Ленинградской области.

Результаты, полученные при обобщении сведений об опыте эксплуатации этих счетчиков, указывают на то, что, как правило, уже в процессе наблюдений начинается использование данных, не ограниченное только решением поставленной сначала вполне определенной задачи режимного характера. По данным письменного опроса метеостанций, снабженных счетчиками местных грозовых разрядов, в подавляющем большинстве случаев (примерно 90%) указывалось, что такие простейшие приборы оказывают существенную помощь при проведении обычных наблюдений за грозами, предупреждая о наличии грозовой обстановки и исключая затруднения, вызванные посторонними шумами, создающими все большие помехи в густонаселенных районах [15]. Отдельные метеостанции, обслуживающие значительное число местных организаций, начали еще шире использовать инструментальные данные о появлении гроз, давая соответствующие предупреждения

заинтересованным подразделениям, особенно при наличии нескольких приборов с различными радиусами обнаружения R_0 . Практически начала вырабатываться определенная система мероприятий, проводимых при получении таких предупреждений. Например, предупреждения о появлении гроз в радиусе до 200 км учитываются только для оценки грозоопасности обстановки, при получении информации о грозах в радиусе до 100 км прекращаются работы на линиях электропередач, подготавливаются бригады и машины для ликвидации возможных аварий, а при наличии гроз в радиусе до 15 км прекращают работу отдельные производственные подразделения и рабочие переводятся на другие объекты.

Вообще следует обратить внимание на то, что сведения о грозах передаются специальными метеорологическими подразделениями (АМСГ) только при обслуживании авиации, а все остальные местные потребители получают предупреждения преимущественно от обычных рядовых метеостанций. На АМСГ, являющихся более крупными подразделениями, могут быть установлены панорамные регистраторы близких гроз, автоматически регистрирующие на лентах распределение грозовых очагов по восьми румбам в пределах двух заданных зон [2]. Опытная эксплуатация макета такого прибора на одной из АМСГ в течение нескольких сезонов дала весьма положительные результаты [10, 11]. Однако хорошо известно, что грозы не являются главным метеорологическим фактором, нарушающим работу авиации.

По последним данным, относящимся к центральным районам ЕТС, абсолютное большинство (около 52%) происшествий на линиях электропередач вызывается грозами [5]. К этому следует добавить, что некоторые производственные объекты (например, предприятия химической промышленности) чувствительны к очень кратковременным отключениям электрической сети, так как перерыв на 5—10 минут вызывает нарушение технологических процессов, на восстановление которых требуется время порядка часа, а иногда внезапное отключение электроэнергии приводит даже к порче оборудования [6]. Вероятно, панорамные регистраторы близких гроз, дающие более полные сведения о грозовой обстановке, по сравнению с простыми счетчиками, будут нужны не только и даже, может быть, не столько на АМСГ, как на отдельных метеостанциях, обслуживающих значительное число местных организаций.

Учитывая, что в процессе проведения экспериментальных работ выдвинулось вперед и начало играть самостоятельную роль оперативное применение данных инструментальных наблюдений за местными грозами, следует дополнительно рассматривать вопросы, относящиеся к методике получения оперативных данных. В отличие от четко сформулированного понятия об основном параметре счетчиков (R_s), знание которого необходимо для получения режимных характеристик, оперативный параметр (R_0), указывающий приблизительные размеры зоны, в пределах которой прибор

отмечает грозы, является более условным, поэтому вопросам разработки методики его определения не уделялось достаточно внимания. Экспериментальное определение R_0 до сих пор приводилось эпизодически (см., например, [8]) путем сопоставления показаний исследуемого счетчика с данными сетевых метеорологических наблюдений. Более общий вариант методики определения R_0 получается в результате соответствующего водоизменения недавно разработанной и примененной методики определения R_0 [4, 9].

Самой общей основой, на которой строится как методика определения R_0 , так и методика определения R_0 , служит представление о занятых интервалах времени Δt . Задавая какие-либо фиксированные значения длительности каждого интервала Δt , будем считать занятым тот интервал, в пределах которого хотя бы один раз отмечалось рассматриваемое явление, т. е. в данном случае имелся хотя бы один разряд. Результаты подсчета числа занятых интервалов $g(\Delta t)$ по данным одной станции должно привести к некоторой статистической кривой, связывающей распространенные характеристики грозовой деятельности: число дней с грозой ($\Delta t = 1$ сут), продолжительность гроз (Δt порядка долей часа) и число разрядов (Δt порядка минуты или ее долей). Такая вполне очевидная связь хорошо известных характеристик долгое время оставалась незамеченной. Все эти характеристики в свою очередь зависят от размера охватываемой площади, условно принимаемой одинаковой для всех станций без указания ее размеров при использовании данных существующих бесприборных наблюдений. При обработке показаний счетчиков местных грозовых разрядов, дальность действия которых можно изменять в случае надобности в широких пределах, нельзя обойтись без определения размера охватываемой площади, характеризуемой параметром R_0 .

Величину R_0 нельзя определить по данным регистрации разрядов в одном пункте без привлечения результатов других наблюдений, сопоставление с которыми, особенно при наличии лишь сравнительно редкой метеорологической сети, вызывает ряд затруднений. Но уже при установке счетчиков в двух пунктах, разнесенных на некоторое расстояние D , появляется возможность определения R_0 по данным регистрации разрядов с достаточным разрешением по времени на основе метода, теоретически разработанного В. К. Иньковым [4]. Для определения R_0 по этому методу находится относительное число совпадений занятых интервалов в обоих пунктах $P_2(\Delta t, D)$ при достаточно малой величине Δt , позволяющей считать, что $P_2(\Delta t, D)$ соответствует вероятности приема одних и тех же разрядов в обоих пунктах $P_2(D)$.

Параметр R_0 в отличие от R_0 не связан с расчетом числа разрядов, так как прием любого числа ближних атмосфериков указывает на наличие гроз в ближней зоне. Чтобы исключить зависимость от числа разрядов, достаточно увеличить интервал Δt примерно до часа, беря $\Delta t = h$, что фактически и делается при определении продолжительности гроз. Пользуясь в данном слу-

чае упрощенной расчетной моделью, легко подсчитать относительную площадь лунки, покрываемой обоими кругами одинакового радиуса R_0 с расстоянием между их центрами D :

$$P_2^*(h, D) = \frac{2}{\pi} [(\arccos x) - \sqrt{x^2 - x^4}], \quad (1)$$

где $x = (D/2R_0)$. Для определения соответствующих значений $P_2(h, D)$ по экспериментальным данным были использованы результаты наблюдений в четырех пунктах Ленинградской области, относящиеся к летнему сезону 1977 г. и представленные в месячных таблицах ежечасной обработки лент однотипных счетчиков. Заметим, что при выборе каждой пары пунктов обращалось внимание на согласованность оценок общего уровня, грозовой деятельности при допустимых отклонениях суммарного числа разрядов за сезон, как правило, не превышающих $\pm 25\%$ от соответствующей средней величины для данной пары. Дальнейшая обработка этих первичных данных заключалась в подсчете числа совпадений (n_2^+) занятых часовых интервалов для каждой из имевшихся шести пар пунктов и числа несовпадающих интервалов (n_2^-), занятых только на каком-нибудь одном пункте соответствующей пары. Тогда, пользуясь очевидным соотношением, можно найти величину $P_2(h, D)$

$$P_2(h, D) \approx \frac{n_2^+}{n_2^+ + 0,5n_2^-}. \quad (2)$$

Благодаря наличию резко выраженного суточного хода грозовой деятельности, вызывающего концентрацию занятых интервалов в определенные часы, найденные значения $P_2(h, D)$ не стремятся к нулю, а остаются на уровне примерно 0,2 при $D \approx 200 \div 300$ км, хотя в таких случаях возможность регистрации данными приборами одних и тех же разрядов в обоих пунктах практически исключена. С учетом соответствующей поправки на указанные случайные совпадения расчетная формула (1) для определения зависимости величины $P_2(h, D) = P_h$ от аргумента (D/R_0) приобретает следующий вид:

$$P_h \approx 0,8P_2^*(h, D) + 0,2 = \frac{1,6}{\pi} [(\arccos x) - \sqrt{x^2 - x^4}] + 0,2. \quad (3)$$

Кривая P_h , вычисленная по формуле (3), представлена на рис. 1. При использовании этой кривой для определения величины D/R_0 и следовательно, R_0 , так как расстояние D известно, было взято среднее значение $P_2(h, D) \approx \frac{0,55+0,53}{2} = 0,54$ по двум парам пунктов со сравнительно близкими размерами баз при их средней величине $D \approx \frac{48+73}{2} \approx 60$ км. Экспериментальному значению $P_2(h, D) = P_h \approx 0,54$ соответствует по расчетной кривой величина $(D/R_0) \approx 0,95$, и, следовательно, $R_0 \approx (60/0,95) \approx 63$ км. Данные для отдельных пар пунктов были нанесены для сравнения на гра-

фик, представленный на рис. 1, с помощью найденного осредненного значения $R_0 \approx 63$ км. Отдельные точки располагаются около расчетной кривой с относительно небольшим разбросом, вызванным, вероятно, ограниченностью статистического материала за один сезон и допустимыми погрешностями методики. Счетчики типа ПРГ-100, применявшиеся в данной работе, в течение ряда лет характеризовались параметром $R_0 = 100$ км [7] в соответствии с их чувствительностью, подобранной с расчетом на получение такого значения R_0 еще в 1964 г. [12] и не менявшейся с тех пор

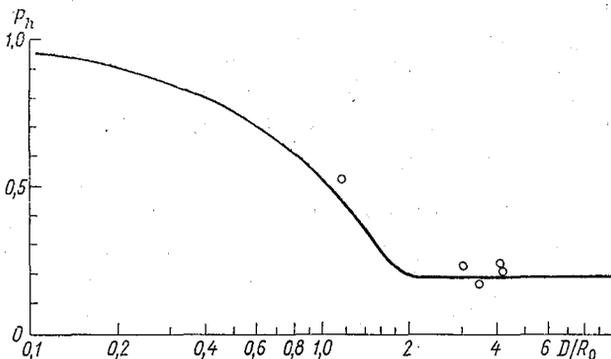


Рис. 1. Зависимость величины P_h от аргумента D/R_0 . Точками нанесены экспериментальные данные для отдельных пар пунктов наблюдений.

в следующих экземплярах этих приборов. Полученное здесь значительно меньшее значение $R_0 \approx 65$ км практически хорошо согласуется со значением $R_0 \sim 70$ км, найденным при исследовании работы этих счетчиков совершенно другим методом на метеорологическом полигоне УкрНИГМИ [8].

Разработка методики определения основных рабочих параметров счетчиков местных грозовых разрядов может обеспечить получение ответа на практические запросы относительно использования наиболее простых приборов для обнаружения гроз в ограниченных зонах вокруг данного пункта, например, метеостанции или даже поста. В связи с дальнейшим уточнением общих методических вопросов представляло бы интерес более детальное исследование хода кривых $g(\Delta t)$ и $P_2(\Delta t)$ по экспериментальным данным в расширенном интервале значений Δt .

В отличие от задач, встреченных при разработке метода наблюдений за далекими грозовыми очагами, когда необходимо было найти совершенно новый и оригинальный способ определения расстояния [1], а определение направления (азимута) не вызывало затруднений, при разработке методики наблюдений за ближними грозами, пригодной для самого широкого распространения, гораздо легче обеспечить получение грубой, но практически удовлетворительной оценки удаленности гроз по сравнению с определением

направления. В последнем случае главные затруднения вызывает требование о разработке значительно более простой аппаратуры по сравнению даже с панорамным регистратором близких гроз [2], очень удобным для более крупных метеорологических подразделений типа АМСГ [10, 11] или, в крайнем случае, лишь для части метеостанций. Кажется, что нужное простое решение задачи об определении направлений на ближние грозы может быть получено в результате использования бинаурального эффекта, описанного в учебнике физики, так как легко обеспечивается сдвиг фаз сигналов на величину, равную азимуту [3]. Однако экспериментальная проверка описываемого эффекта показала, что он не всегда проявляется и обнаруживается. Поэтому вопрос об удовлетворении пожеланий практически всех опрошенных метеостанций относительно добавления к счетчикам местных грозовых разрядов устройства для определения направления на грозу в зоне до 50—100 км остается пока открытым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иньков Б. К. Фазовые методы определения расстояния до очагов атмосфериков.—Труды ГГО, 1973, вып. 319, 135 с.
2. Иньков Б. К. Объединение особенностей традиционной аппаратуры в панорамном регистраторе близких гроз.—Труды ГГО, 1977, вып. 350, с. 3—17.
3. Иньков Б. К., Махоткин Л. Г. Опыт применения пеленгатора Ерухимовича для наблюдений за атмосфериками.—Труды ГГО, 1975, вып. 358.
4. Иньков В. К. О возможности использования синхронных наблюдений по счетчикам местных грозовых разрядов для определения их эффективности радиуса действия.—Труды ГГО, 1975, вып. 358, с. 69—77.
5. Козельцева В. Ф., Кузнецова Н. Н. Влияние условий погоды на работу линий электропередачи.—Труды Гидрометцентра СССР, 1976, вып. 179, с. 50—52.
6. Козельцева В. Ф., Кузнецова Н. Н. Оценка эффективности использования прогнозов опасных и особо опасных явлений погоды при эксплуатации линий электропередачи.—Труды Гидрометцентра СССР, 1976, вып. 179, с. 3—9.
7. Колоколов В. П., Лещенко Г. П. О некоторых соотношениях между параметрами грозовой деятельности, полученными визуально и при помощи счетчиков молний.—Труды ГГО, 1974, вып. 301, с. 98—104.
8. Лещенко Г. П. Инструментальные наблюдения за грозовой деятельностью на экспериментальном метеорологическом полигоне УкрНИГМИ.—Труды ГГО, 1972, вып. 277, с. 140—146.
9. Лещенко Г. П. Экспериментальное определение эффективного радиуса действия счетчиков грозовых разрядов.—Труды ГГО, 1977, вып. 350, с. 26—31.
10. Лещенко Г. П., Тысинюк Н. М. Использование панорамного регистратора гроз в оперативной работе.—Метеорология и гидрология, 1976, № 5, с. 113—115.
11. Лещенко Г. П., Тысинюк Н. М. Примеры использования панорамного регистратора гроз при метеобеспечении авиации.—Труды ГГО, 1977, вып. 350, с. 18—22.
12. Лыдзар П. С. Полупроводниковые грозорегистраторы.—Труды ГГО, 1964, вып. 157, с. 54—58.
13. Махоткин Л. Г., Иньков Б. К. О рациональных характеристиках счетчиков местных грозовых разрядов.—Труды ГГО, 1977, вып. 350.
15. Lacy R. E. Climate and building in Britain. London, Department of Environment Building Research Establishment, 1977, 185 p.

Б. К. Иньков, Г. П. Лещенко, Л. Г. Махоткин

ОПЫТ АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ МЕСТНЫХ ГРОЗ

В отличие от продолжительности солнечного сияния, никогда не определявшейся по данным визуальных наблюдений и введенной в качестве метеорологического элемента после появления более ста лет назад специального прибора — гелиографа, предназначенного для получения только этой характеристики, продолжительность гроз до сих пор подсчитывается, как правило, по результатам бесприборных метеорологических наблюдений. Вследствие дискретного характера молний получается цепочка характеристик грозовой деятельности, отличающихся по существу лишь масштабом принимаемой шкалы времени, средним звеном которой, расположенным между числом дней с грозой и числом разрядов, является продолжительность гроз. Это замечание указывает на возможность изменения принятой методики определения продолжительности гроз (Π), заключающейся в вычитании отмеченного времени начала грозы из времени ее конца, потому что такая методика крайне неудобна в случае перехода к инструментальным измерениям. В последнем случае гораздо проще и легче осуществляется подсчет числа занятых интервалов определенной длительности, в течение каждого из которых был отмечен хотя бы один разряд. Возможно, что подобная методика будет удобной и для измерения продолжительности других метеорологических явлений.

Учитывая практическое значение данных о продолжительности гроз, применение которых предусматривается, в частности, нормативными документами [2, 8], целесообразно выяснить методические вопросы о соотношении оценок величины Π , сделанных по разным шкалам, так как в дальнейшем, подобно уже давно применяемым гелиографам, могут получить широкое распространение и измерители продолжительности гроз, по существу подобные счетчикам местных грозовых разрядов [4, 7]. Такие приборы при использовании достаточно широкой полосы пропускания и при менее жестких требованиях в отношении подавления самых низких частот по сравнению с указанными в статье [7] величинами, мо-

гут снабжаться очень короткими штыревыми электрическими антеннами (примерно 0,3—0,5 м) и будут предельно простыми и удобными для эксплуатации.

Оценка суммарной продолжительности гроз по данным ежечасной обработки лент группы счетчиков (грозорегистраторов) с различной чувствительностью уже делалась раньше путем подсчета числа занятых часовых интервалов (независимо от количества зарегистрированных разрядов), причем полученные величины Π_h оказались обратно пропорциональными порогам срабатывания этих приборов [1]. Более детальные экспериментальные данные были получены в течение летних месяцев 1976 и 1977 гг., когда на базе ГГО под Ленинградом работало несколько грозорегистраторов типа ПРГ [4] и производились измерения продолжительности ближних гроз Π путем автоматического подсчета числа занятых 5-минутных интервалов. В 1976 г. продолжительность Π , которую можно принять в качестве действительной величины для соответствующей ближней зоны, измерялась двумя устройствами с различными эффективными порогами срабатывания E , а в 1977 г. — одним устройством с измененным порогом. Подсчет значений Π_h по таблицам ежечасной обработки лент грозорегистраторов производился с выбором только тех часовых интервалов, когда число зарегистрированных разрядов g было не меньше заданного порогового значения g^* , которое последовательно принималось равным 1, 2, 3, 5 и 10. В результате графического сопоставления накопленных сумм Π_h с соответствующими накопленными суммами Π выяснилось, что экспериментальные точки располагаются на графиках около некоторых прямых линий и что сравниваемые величины связаны в среднем линейной зависимостью $\Pi_h \approx k_{\Pi}(g^*)$. Анализируя совокупность полученных значений коэффициента $k_{\Pi}(g^*)$, удалось вывести простую формулу, точность которой практически не меньше точности исходных данных:

$$k_{\Pi}(g^*) = \frac{3(E/E_h)}{\sqrt{g^*}}. \quad (1)$$

Закономерное изменение величины $k_{\Pi}(g^*)$ в соответствии с найденным соотношением наглядно иллюстрируется графиком, приведенным на рис. 1. Имеющийся в формуле (1) множитель (E/E_h) указывает на согласованность ее со сделанными ранее частными оценками зависимости Π_h от E_h [1] и, в более общем виде, Π от E . Численный множитель 3 близок к величине $\sqrt{(t_h/t)}$, которая в данном случае равна $\sqrt{12} \approx 3,5$, так как длительности интервалов t_h и t , принятых для подсчета Π_h и Π , равны соответственно 60 и 5 мин. Из формулы (1) следует, что при $E=E_h$ и $g^*=9$ коэффициент $k_{\Pi}(g^*)=1$, т. е. в соответствии с его определением $P_h=P$. Это означает, что измеренная длительность гроз в данной ближней зоне получается при подсчете числа тех часовых интервалов, в течение каждого из которых было отмечено не меньше 9 разрядов, а учитывая ограниченную точность исходных данных,

можно начинать счет с округленного минимального значения $g=10$. Естественно, что применение простых приборов специально предназначенных для измерения суммарной продолжительности гроз, исключило бы необходимость такого дополнительного подсчета.

Крутое возрастание значений $k_{П}(g^*)$ при значениях g^* примерно несколько единиц (рис. 1) указывает на наличие большого числа часов с малым количеством отмеченных разрядов. Так как этот вопрос до сих пор не был достаточно проработан, хотя и представляет общий интерес с точки зрения методики наблюдений за ближними грозами, остановимся на нем несколько подробнее.

Для оценки вероятности приема в течение одного часа различного числа атмосфериков $P(g \leq g^*)$, где g^* — некоторое пороговое число, были обработаны и проанализированы данные наблюдений по приборам ПРГ-200, ПРГ-100 и ПРГ-15, работающим на базе ГГО под Ленинградом. Использованный материал охватывал основные месяцы грозового сезона (с июня по август). При обработке учитывались только те часы, когда были зарегистрированы разряды. Ре-

зультаты подсчета общего числа часов, когда было зарегистрировано не более g^* разрядов в час, представлены на графиках, построенных по логарифмически вероятностной сетке (рис. 2). Расположение экспериментальных точек на этих графиках вдоль некоторых прямых линий указывает на то, что повторяемость различных значений $g \leq g^*$ при очевидном условии $g^* \geq 1$ вполне удовлетворительно описывается логарифмически нормальным законом. Интересно, что параметры логарифмически нормального распределения $P(g \leq g^*)$, определенные по данным приборов с различной чувствительностью и различными радиусами (200, 100 и 15 км) обнаружения гроз, получились довольно близкими при медианных значениях g_m , равных соответственно 7, 6 и 4 разряд/ч и стандартных отклонениях σ соответственно 19, 20

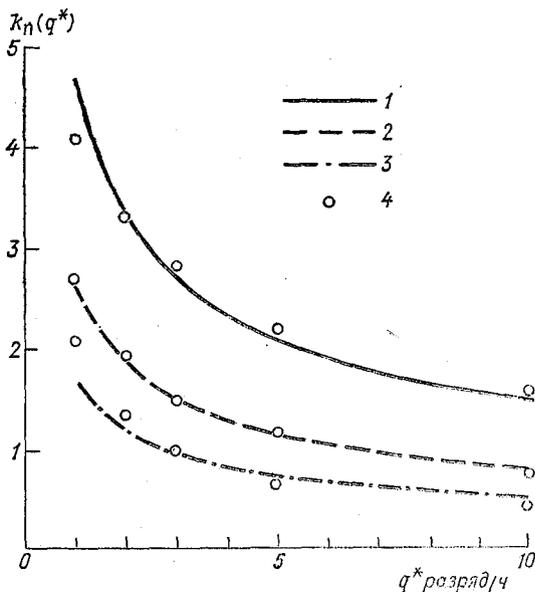


Рис. 1. Зависимость коэффициента $k_{П}(g^*)$ от порогового значения числа разрядов за час g^* , вычисленная по формуле (1).

1 — при $E/E_h = 1,6$; 2 — при $E/E_h = 0,9$; 3 — при $E/E_h = 0,6$; 4 — по экспериментальным данным.

и 15 дБ. Расчеты, сделанные с использованием простой статистической модели распределения грозовых очагов, подтверждают общий характер подобных закономерностей и типичность полученных в этом случае больших значений σ .

Допустим, что грозы распределяются равномерно по площади данного района и дают одинаковое число разрядов, что в среднем обычно оправдывается. Тогда на окружности радиуса R^* в общем итоге будет отмечено aR^* гроз, где a — некоторый коэффициент пропорциональности, и от каждой из этих гроз будет принято

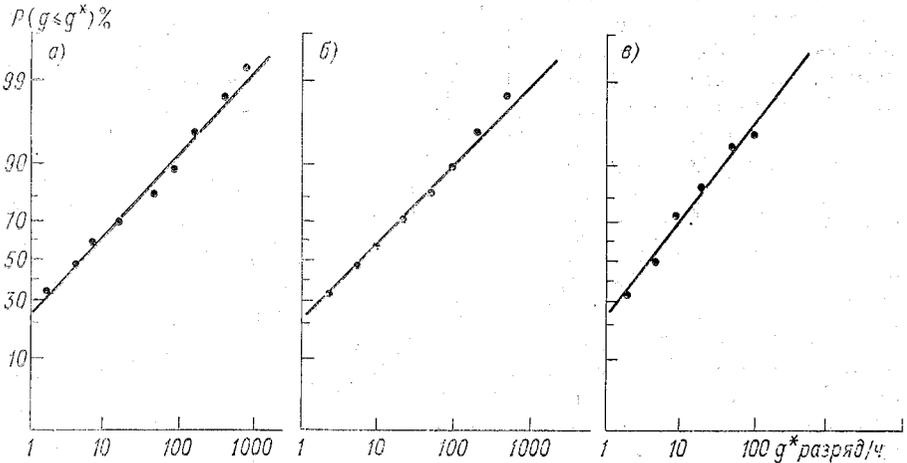


Рис. 2. Вероятность приема различного числа атмосфериков в течение одного часа приборами ПРГ-200 (а), ПРГ-100 (б) и ПРГ-15 (в).

$bP(R^*)$ разрядов, причем функция $P(R^*)$ является приемной характеристикой прибора с эффективным радиусом R_3 . Коэффициенты a и b , не нарушая общности выводов, можно положить равными единице. При таких условиях относительное число случаев, когда было принято не более R^* разрядов (в относительных единицах), будет даваться формулой

$$P(R \leq R^*) = \frac{R^*P(R^*) + \int_{R^*}^{\infty} P(R) dR}{\int_0^{\infty} P(R) dR}, \quad (2)$$

в которой функция $P(R)$ по статистике атмосферных помех [5] при типичном значении показателя степени убывания амплитуд атмосфериков с расстоянием $k=1$ имеет следующий вид:

$$P(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{r-r_3}{\sigma_1} + \sigma_1}^{\infty} e^{-t^2/2} dt, \quad (3)$$

где $r = \ln R$, $r_3 = \ln R_3$, а σ_1 — параметр амплитудного распределения атмосфериков в источнике (стандартное отклонение) (обозначено здесь так в отличие от искомого σ), причем в натуральных логарифмах $\sigma_1 \approx 0,8$ [6]. Интегрируя это выражение для $P(R)$ по частям, получим следующее значение интеграла, входящего в формулу (2):

$$\begin{aligned} \int_{R^*}^{\infty} P(R) dR &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{r^*}^{\infty} e^r \int_{\frac{r-r_3}{\sigma_1} + \sigma_1}^{\infty} e^{-t^2/2} dt dr = \\ &= -R^* P(R^*) + e^{\left(r_3 - \frac{\sigma_1^2}{2}\right)} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{r^*-r_3}{\sigma_1}}^{\infty} e^{-t^2/2} dt, \end{aligned} \quad (4)$$

откуда при $R^* = 0$, т. е. при $r^* = -\infty$, получается сразу и величина знаменателя формулы (2):

$$\int_0^{\infty} P(R) dR = e^{\left(r_3 - \frac{\sigma_1^2}{2}\right)}. \quad (5)$$

Подставляя полученные выражения (4) и (5) в формулу (2), находим, что

$$P(R \leq R^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{r^*-r_3}{\sigma_1}}^{\infty} e^{-t^2/2} dt = \frac{1}{2} - \Phi_0\left(\frac{r-r_3}{\sigma_1}\right), \quad (6)$$

где $\Phi_0(x)$ — известный табулированный интеграл:

$$\Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt. \quad (7)$$

Аналогично с помощью $\Phi_0(x)$ может быть записана и формула (3):

$$P(R^*) = \frac{1}{2} - \Phi_0\left(\frac{r^*-r_3}{\sigma_1} + \sigma_1\right). \quad (8)$$

В результате вычисления по формулам (6) и (8) ряда значений $P(R \leq R^*)$ и $P(R^*)$ для одинаковых значений нормированного аргумента $[(r-r_3)/\sigma_1]$ и нанесения соответствующих точек на сетку с вероятностной шкалой для $P(R \leq R^*)$ и логарифмической шкалой для $P(R^*)$ выяснилось, что зависимость $P(R \leq R^*)$ от $P(R^*)$ в интервале $0,005 < P(R^*) < 0,6$, к которому относится

около 80% всех случаев, вполне удовлетворительно аппроксимируется логарифмически нормальным законом со стандартным отклонением $\sigma \approx 16$ дБ. При этих расчетах в соответствии с известными оценками параметров амплитудного распределения атмосфериков [6] было принято натуральное значение $\sigma_1 = 0,8$ (или 7 дБ). Таким образом, результаты теоретических расчетов для выбранной простой модели среднего распределения гроз подтверждают типичность экспериментальных закономерностей, представленных на рис. 2, причем даже значения основного параметра σ получились достаточно близкими (15—20 дБ по экспериментальным данным и 16 дБ по расчету). Как видно из рис. 2, примерно в 60% случаев в течение часа регистрируется не более 10 разрядов, и наличие большого числа таких часов вызывает крутой подъем значений коэффициента $k_{л}(g^*)$ при самых малых g^* . Полученные данные о распределении числа разрядов, зарегистрированных счетчиками в условиях примерно среднего уровня грозовой деятельности, представляют также интерес для подтверждения обоснованности выбора азимутальных градаций, принятых в панорамных регистраторах близких гроз [3]. Дальнейшая детализация азимутальных градаций (по крайней мере при использовании амплитудных ограничителей дальности) оказывается в большинстве случаев необоснованной вследствие ограниченного числа принимаемых атмосфериков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асташенко А. И., Семенов К. А. Результаты сравнения грозорегистраторов.— Труды ГГО, 1965, вып. 177, с. 46—54.
2. Временные указания по проектированию и устройству молниезащиты зданий и сооружений СН 305-65. М., Стройиздат, 1965, 67 с.
3. Иньков Б. К. Объединение особенностей традиционной аппаратуры в панорамном регистраторе близких гроз.— Труды ГГО, 1977, вып. 350, с. 3—17.
4. Лыдзар П. С. Полупроводниковые грозорегистраторы.— Труды ГГО, 1964, вып. 157, с. 54—58.
5. Махоткин Л. Г. Статистика атмосферных радиопомех.— Геомагнетизм и аэрономия, 1963, т. 3, № 2, с. 284—292.
6. Махоткин Л. Г. Оценка параметров амплитудного распределения атмосфериков, генерируемых изолированным источником.— Геомагнетизм и аэрономия, 1964, т. 4, № 1, с. 200—202.
7. Махоткин Л. Г., Иньков Б. К. О рациональных характеристиках счетчиков местных грозных разрядов.— Труды ГГО, 1977, вып. 350, с. 32—36.
8. Указания по проектированию и устройству молниезащиты зданий и сооружений. СН 305-69. М., Стройиздат, 1970, 31 с.

Л. Г. Махоткин, Г. П. Лещенко, Б. К. Иньков

ИЗМЕНЕНИЕ РАЗНОСТИ ФАЗ КОМПОНЕНТОВ АТМОСФЕРИКОВ ВБЛИЗИ ИСТОЧНИКА

Стремление исключить влияние вариаций характеристик отдельных молний можно рассматривать как довольно естественную реакцию, вызванную влиянием ограниченной точности наиболее простого и удобного амплитудного метода оценки расстояния до ближних грозовых очагов. Указанная около 15 лет назад конкретная предельная шкала для оценки расстояний, которая не может быть существенно уточнена при использовании амплитудного метода [8], определяется разбросом амплитуд атмосфериков в источнике. Такая грубая шкала часто оказывается достаточной, что обеспечивает широкое распространение амплитудного метода с учетом практической простоты его реализации и высокой помехоустойчивости, обеспечиваемой выбором наиболее крупных атмосфериков. Однако представляет также интерес получение более точных данных о расстояниях до ближних грозовых очагов, что, казалось, может быть уже обеспечено устранением фактора, резко ограничивающего точность амплитудного метода и связанного с зависимостью выбранного параметра атмосфериков не только от расстояния, но и от индивидуальных свойств каждого разряда. Поэтому в течение последнего десятилетия большое внимание уделялось импульсному электромагнитному методу определения удаленности грозовых очагов [3], называемому коротко Е—Н методом [2].

Определение расстояния до грозы по Е—Н методу основано на сравнении электрического (Е) и магнитного (Н) компонентов одного и того же атмосферика. С одной стороны, это исключает явную зависимость результатов от вариаций свойств источника [2], а с другой — благодаря широкополосному приему исследуемых атмосфериков попутно обеспечивается возможность получения характеристик самих источников [7]. Отклонения от принятой в Е—Н методе дипольной модели источника по данным проведенных исследований не особенно существенны [4, 5, 6].

Предназначенность Е—Н метода для наблюдений в ближней

зоне обусловлена тем, что компоненты Е и Н заметно отличаются друг от друга только вблизи источника, на расстояниях меньше длины волны λ . В первых работах 1970 г. [3, 5] рабочий диапазон этого метода характеризовался расстоянием от единиц до 150—200 км, но уже через несколько лет были указаны пределы 100—200 км [2, 9], а данные экспериментальной проверки ограничивались расстояниями до 75 км в соответствии со шкалой, выбранной для макета прибора [2]. Погрешности измерений теоретически оценивались сначала значениями, не превышающими 15% при фиксации нулевых переходов с точностью до 0,5 мкс [3], до 20% при линейной интерполяции с тремя узлами и до 10% при квадратичной интерполяции в диапазоне расстояний от 20 до 100 км [9]. В этих оценках не учитывалось еще влияние естественных помех, создаваемых многочисленными сравнительно удаленными атмосфериками, тогда как обусловленные ими погрешности составляют 15—20% уже на расстояниях, превышающих 70—80 км [10].

При практической реализации Е—Н метода к соответствующей аппаратуре предъявляются сравнительно высокие требования в отношении равномерности частотной характеристики в полосе от 0,1 до 10—15 кГц с допустимыми отклонениями не более 0,5 дБ по амплитуде и 1° по фазе. Входная цепь Е-антенны должна быть высокоомной с сопротивлением порядка 1—10 МОм, а сильно нагруженная Н-антенна при достаточно ограниченных размерах имеет эффективную высоту примерно 0,0004 м [2]. Кроме того, уже в первой работе по Е—Н методу [3] были отмечены затруднения, возникающие вследствие некруговой диаграммы направленности Н-антенн. Предложенные там способы преодоления этих затруднений либо слишком сложны (в случае автоматической корректировки амплитуд, либо не всегда достигают цели (при измерении неамплитудных параметров количество пропущенных подпороговых сигналов зависит от азимута). Использование двух Н-каналов для исключения пропусков существенно усложняет аппаратуру.

В результате анализа развития методики наблюдений за ближними грозowymi очагами можно сделать вывод, что устранение основного фактора, ограничивающего точность метода, не приводит еще к удобному решению задачи при переходе к другому методу, поэтому, идя по пути использования особенностей распространения электромагнитных колебаний в ближней зоне, указанному впервые в работе [3], необходимо провести дополнительные экспериментальные исследования изменения отдельных параметров атмосфериков на небольших расстояниях R от источника (т. е. при $R < \lambda$). Выбор исследуемых параметров обосновывается прежде всего самыми общими теоретическими соотношениями, получаемыми при использовании дипольной модели источников атмосфериков.

После подстановки в известные теоретические формулы для

электрической и магнитной составляющих поля, создаваемого дипольным излучателем

$$E = \frac{c^2}{R^3} + \frac{cM'}{R^2} + \frac{M''}{R}; \quad (1)$$

$$H = \frac{M'}{R^2} + \frac{M''}{cR} \quad (2)$$

(c — скорость света, M — электрический момент [1]) только одной гармонической составляющей электрического момента $M = \sin(2\pi ft)$, что соответствует узкополосному приему атмосфериков на частоте f , и выполнения ряда элементарных преобразований с дифференцированием по времени t и т. д. получаются простые формулы для фаз α электрического и магнитного компонентов:

$$\alpha_E = \arctg\left(\frac{a}{1-a^2}\right); \quad (3)$$

$$\alpha_H = \arctg\left(-\frac{1}{a}\right), \quad (4)$$

где $a = \frac{2\pi R}{\lambda} = \frac{2\pi Rf}{c}$. Таким же способом попутно получаются формулы для нормированных амплитуд компонентов E и H

$$A_E = \frac{c^2}{R^3} \sqrt{a^4 - a^2 + 1}; \quad (5)$$

$$A_H = \frac{2\pi f}{R^2} \sqrt{1 + a^2} \quad (6)$$

и для дифференциальных показателей степени убывания амплитуд:

$$K_E^* = \frac{d(\lg A_E)}{d(\lg R)} = 3 - \frac{2a^4 - a^2}{a^4 - a^2 + 1}; \quad (7)$$

$$K_H^* = \frac{d(\lg A_H)}{d(\lg R)} = 2 - \frac{a^2}{a^2 + 1}. \quad (8)$$

Из формул (7) и (8) следует, что $K_E^* = K_H^*$ при условии

$$2a^4 - 2a^2 - 1 = 0. \quad (9)$$

Этому значению параметра a соответствует величина $\frac{R}{\lambda} \approx 0,2$ и $K_E^* > K_H^*$ только при меньших значениях (R/λ). Однако экспериментальное исследование зависимости соотношения амплитудных параметров компонентов атмосферика от расстояния до источника сталкивается с рядом методических затруднений, поэтому целесообразно обратиться к фазовым параметрам, которые, например, совершенно не учитывались в широко применяемом простом амплитудном методе оценки удаленности ближних грозовых очагов. Теоретическая зависимость фазовых параметров $\Phi_{EH} = (\alpha_E - \alpha_H)$, $\Phi_{HH} = [\alpha_H(2f) - 2\alpha_H(f)]$, $\Phi_{EE} = [\alpha_E(2f) - 2\alpha_E(f)]$ от расстояния R (или от пропорционального ему параметра a) находится с помощью формул (3) и (4);

$$\Phi_{EH} = -\operatorname{arctg} \left(\frac{1}{a^3} \right); \quad (10)$$

$$\Phi_{HH} = \operatorname{arctg} \left(\frac{1 + 3a^2}{2a^3} \right); \quad (11)$$

$$\Phi_{EE} = \operatorname{arctg} \left(2a^3 \frac{2 - 3a^2}{1 - 3a^2 + 9a^4 - 4a^6} \right). \quad (12)$$

Переход к исследованию параметра Φ_{EH} значительно облегчает проведение экспериментальных работ вследствие снижения требований к характеристикам узкополосной аппаратуры по сравнению с широкополосной и не влечет еще отказа от условия о независимости показаний от случайных вариаций в источнике. Фазовый вариант E—H метода [2], основанный на использовании параметра Φ_{EH} , начал исследоваться экспериментально лишь недавно, но следует сразу же отметить, что нельзя просто устранить недостаток, указанный еще в первой работе [3] и связанный с направленностью магнитных (рамочных) антенн. Такой же недостаток встретится и при использовании параметра Φ_{HH} , который к тому же менее выгоден, чем Φ_{EH} , вследствие возможного влияния вариаций характеристик источника. Это влияние может сказаться и при измерении параметра Φ_{EE} , но в отличие от предыдущих вариантов значительный практический выигрыш дает исключение рамочных антенн, так как в последнем случае достаточно использовать только одну электрическую антенну и приемное устройство, выполняющее лишь минимальное число принципиально необходимых операций. С учетом комплекса факторов, определяющих оценку возможностей и удобства использования различных параметров, вполне определенный интерес представляет исследование степени связи величины Φ_{EE} с расстоянием до источников атмосфериков, принятых из ближних грозových очагов.

Экспериментальная проверка наличия теоретически ожидаемой связи параметра Φ_{EE} с расстоянием до ближних грозových очагов была проведена на частотах $f=0,65$ и $2f=1,3$ кГц. Так как по данным визуальных наблюдений на сети метеостанций часто нельзя получить достаточно определенную характеристику развития гроз в радиусе примерно до 200 км, приходилось выбирать отдельные случаи наличия такой обстановки, когда явно прослеживалось развитие гроз на разных расстояниях с подходом и удалением от пункта, где регистрировалась разность фаз компонентов атмосфериков. Один из наиболее характерных примеров такого типа приведен на рис. 1, где скопирована часть ленты с записью разности фаз 4—5 августа 1977 г. Около имеющихся на ленте пяти рабочих дорожек самописца указаны соответствующие градации удаленности по данным теоретического расчета по формуле (12) для применявшейся в этих опытах пары частот при отметке разности фаз по интервалам шириной 45° . Для сопоставления теоретических оценок с данными непосредственных наблюдений на ленте дополнительно обозначены штриховкой те периоды, когда на соответствующих расстояниях были грозы по собранным позднее

данным сетевых метеорологических наблюдений. Вполне удовлетворительная согласованность записи, на которой принятые атмосферерики отмечались штрихами, со сведениями о наличии гроз на различных расстояниях подтверждает теоретическое предположение о достаточно тесной связи исследуемого параметра Φ_{EE} с расстоянием до грозовых очагов, причем в пределах принятых града-

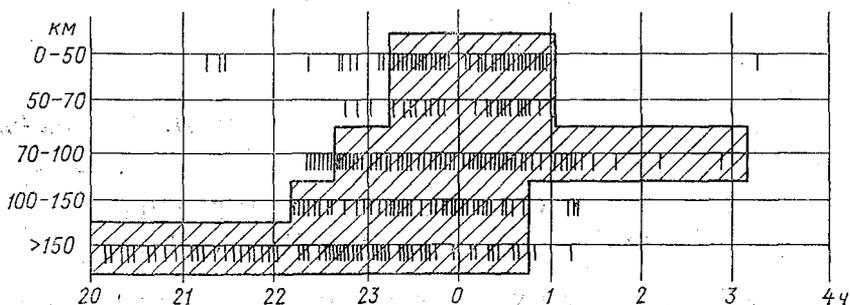


Рис. 1. Пример ленты регистратора разности фаз с указанием расстояний до очагов по теоретической шкале.

ций не сказываются заметно вариации фазовых характеристик источников, которые, очевидно, значительно меньше по сравнению с шириной выбранных интервалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров М. С. и др. Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ. М., «Наука», 1972, 195 с.
2. Бару Н. В., Кононов И. И., Соломоник М. Е. Радиопеленгаторы — дальномеры ближних гроз. Л., Гидрометеоздат, 1976, 144 с.
3. Кононов И. И. Импульсный электромагнитный метод определения удаленности грозовых очагов. — Труды ГГО, 1970, вып. 253, с. 46—54.
4. Кононов И. И. Границы применимости дипольных представлений молниевых разрядов. — Труды ГГО, 1975, вып. 358, с. 61—68.
5. Кононов И. И., Колсанов В. А. Влияние на точность дипольного алгоритма определения удаленности грозовых очагов параметров молниевое разряда. — Труды ГГО, 1970, вып. 253, с. 55—63.
6. Кононов И. И., Семикрас Ю. В. Электромагнитное излучение молниевых разрядов. — Труды ГГО, 1975, вып. 358, с. 48—60.
7. Кононов И. И., Штенников Ю. В. Экспериментальные исследования дипольных моментов молниевых разрядов. — Труды Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству, 1976, с. 231—237.
8. Махоткин Л. Г., Лыздар П. С. Ориентировочная оценка удаленности гроз по амплитудам атмосфериков. — Труды ГГО, 1963, вып. 146, с. 58—64.
9. Файзулин Н. А., Кононов И. И., Плотников В. Д. Импульсный электромагнитный грозодалномер ближней зоны. — Труды ГГО, 1975, вып. 358, с. 116—123.
10. Файзулин Н. А., Кононов И. И., Плотников В. Д. Влияние внешнего шума на точностные характеристики импульсного электромагнитного грозодалномера ближней зоны. — Труды ГГО, 1975, вып. 358, с. 124—130.

В. П. Закарюкин

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ МОЛНИИ

Большинство известных до сих пор работ по теории излучения молнии в ближней зоне предполагают наличие плоской бесконечно проводящей земли [1, 2, 4, 5]. Учет конечной проводимости земли относится в основном к области молниезащиты и к статическим или квазистатическим полям; наиболее интересна в методическом отношении работа Оллендорфа [3] по расчету электростатического потенциала земли при движении лидера к земле.

Из общих соображений вытекает, что изменение проводимости земли от бесконечной к конечной приводит к наклону вектора электрического поля и появлению горизонтальной его составляющей, а также (при наклонном канале) к отклонению магнитного вектора от горизонтали.

В статье сделана попытка приближенной оценки вектора электрического поля для проводящей плоской бесконечной земли и вертикального тонкого канала молнии. Рисунок 1 поясняет принятую расчетную модель и основные обозначения.

Согласно работе [5], электрическое поле, создаваемое каналом на расстояниях $\rho > 10$ км, без учета влияния земли описывается выражением

$$\begin{aligned} E_1(\rho, t) = & -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \mathbf{a}_z \left[\frac{1}{\rho^3} \int_0^H \int_0^{t'} i_1(z, \tau) d\tau dz + \right. \right. \\ & + \frac{1}{c\rho^2} \int_0^H i_1(z_1, t') dz + \frac{1}{c^2\rho} \int_0^H \frac{\partial i_1(z, t')}{\partial t} dz \left. \right] + \\ & + \mathbf{a}_\rho \left[\frac{3}{\rho^4} \int_0^H z \int_0^{t'} i_1(z, \tau) d\tau dz + \frac{3}{c\rho^3} \int_0^H z i_1(z, t') dz + \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{c^2\rho^2} \int_0^H \frac{\partial i_1(z, t')}{\partial t} z dz \right] \right\}, \quad (1) \end{aligned}$$

где $t' = t - \rho/c$, c — скорость света в вакууме, ϵ_0 — электрическая постоянная, \mathbf{a}_z и \mathbf{a}_ρ — единичные вектора по вертикали и по радиусу ρ .

Абсолютно проводящую землю заменяют в расчетах отраженным каналом. Для приближенной оценки поля в случае конечной проводимости можно воспользоваться тем же приемом, но положив ток $i_2(z, t)$ несколько отличающимся от тока $i_1(z, t)$. Если при этом электрическое поле у земли почти вертикально, т. е. горизонтальная составляющая значительно меньше вертикальной, то правомерность такого подхода очевидна.

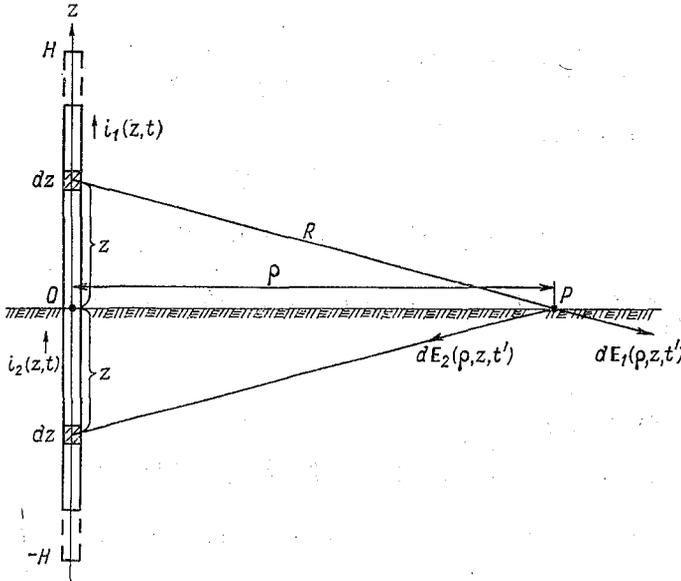


Рис. 1. Расчетная модель разряда.

H — высота канала, $i_1(z, t)$ — ток в канале, dz — элемент канала, P — точка наблюдения.

Электрическое поле в воздухе у границы раздела будет определяться суммой полей токов i_1 и i_2 . Для задания поля в земле у границы раздела введем некоторый ток $i_3(z, t)$, элементы которого совместим с элементами тока i_2 . Поля, создаваемые этими токами, обозначим E_1, E_2, E_3 соответственно. При этом

$$\mathbf{E}_2 = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \mathbf{a}_z \psi_{2z}(i_2, \rho, t') - \mathbf{a}_\rho \psi_{2\rho}(i_2, \rho, t') \right\}; \quad (2)$$

$$\mathbf{E}_3 = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \mathbf{a}_z \psi_{3z}(i_3, \rho, t') - \mathbf{a}_\rho \psi_{3\rho}(i_3, \rho, t') \right\}; \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned}\Psi_{kz}(i_k, \rho, t') &= \frac{1}{\rho^3} \int_0^H \int_0^{t'} i_k(z, \tau) d\tau dz + \\ &+ \frac{1}{c\rho^2} \int_0^H i_k(z, t') dz + \frac{1}{c^2\rho} \int_0^H \frac{\partial i_k(z, t')}{\partial t} dz; \\ \Psi_{kp}(i_k, \rho, t') &= \frac{3}{\rho^4} \int_0^H z \int_0^{t'} i_k(z, t) d\tau dz + \\ &+ \frac{3}{c\rho^3} \int_0^H i_k(z, t') z dz + \frac{1}{c^2\rho^2} \int_0^H \frac{\partial i_k(z, t')}{\partial t} z dz.\end{aligned}$$

На границе раздела

$$E_p = E_{1p} + E_{2p} = E_{3p}; \quad (4)$$

$$\sigma E_{3z} + \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial E_{3z}}{\partial t} = \varepsilon_0 \frac{\partial (E_{1z} + E_{2z})}{\partial t}. \quad (5)$$

Подставляя сюда выражения (1)–(3), получим из формулы (4)

$$i_3 = i_2 - i_1 \quad (6)$$

и из формулы (5)

$$\sigma \Psi_{3z}(i_3, \rho, t') + \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial \Psi_{3z}(i_3, \rho, t')}{\partial t} = \varepsilon_0 \frac{\partial (\Psi_{1z} + \Psi_{2z})}{\partial t}. \quad (7)$$

Рассматривая поля в волновой зоне, из выражения (7) получим

$$\sigma \int_0^H \frac{\partial i_3}{\partial t} dz + \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \int_0^H \frac{\partial i_3}{\partial t} dz = \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \int_0^H \frac{\partial (2i_1 + i_3)}{\partial t} dz. \quad (8)$$

Приняв предположение о постоянстве скорости движения фронта импульса тока до достижения конечной высоты H , можем представить первый член выражения (8) в таком виде:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^{vt} i_3(z, t) dz = v i_3(vt, t) + \int_0^{vt} \frac{\partial i_3}{\partial t} dz = \int_0^{vt} \frac{\partial i_3}{\partial t} dz. \quad (9)$$

Так как $i_3(vt, t) = 0$, то (9) вполне справедливо. Когда $t \geq H/v$, временное интегрирование выносится за знак интеграла с постоянными пределами. Тогда из равенства (8) вытекает

$$\sigma i_3 + \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial i_3}{\partial t} = \varepsilon_0 \frac{\partial (2i_1 + i_3)}{\partial t} + \text{const}(t),$$

или в спектральной форме

$$\left[\frac{\sigma}{\varepsilon_0} + j\omega (\varepsilon - 1) \right] i_3 = 2j\omega I_1 + \text{const}(t) \cdot \delta(0), \quad (10)$$

где $\delta(x)$ — дельта-функция.

Для преобладающего большинства почв $\sigma = 10^{-2} - 10^{-4}$ $1/(\text{Ом} \cdot \text{м})$ и при частотах менее нескольких сот килогерц $\sigma/\varepsilon_0 \gg \omega$ из выражения (10) вытекает

$$i_3(z, t) = 2 \frac{\varepsilon_0}{\sigma} \frac{\partial i_1(z, t)}{\partial t}, \quad (11)$$

$\text{const}(t) = 0$, время превышает несколько микросекунд для самых плохопроводящих почв. При хороших почвах (11) справедливо при временах, превышающих несколько сотых долей микросекунды.

Горизонтальная составляющая поля запишется теперь так:

$$E_\rho = \frac{1}{2\pi\sigma} \frac{v}{c^2\rho^2} \left\{ H \frac{\partial i_1(H, t)}{\partial t} + v [i_1(H, t) - i_1(0, t)] \right\}, \quad (12)$$

а вертикальная —

$$E_z = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \frac{v}{c^2\rho} [i_1(H, t) - i_1(0, t)], \quad (13)$$

если принять модель длинной линии, предложенной Юманом [5], где $i_1(z, t) = i_1(t - \frac{z}{v})$, и скорость фронта равной скорости переноса тока за фронтом.

В области частот $\omega \ll \frac{v}{H}$ (порядка 10^6 с^{-1} для ступенчатого лидера) производной в (12) можно пренебречь и тогда

$$\left(\frac{E_{\rho\omega}}{E_{z\omega}} \right)_\lambda = \frac{\varepsilon_0 v}{\sigma \rho}, \quad (14)$$

где $E_{\rho\omega}$, $E_{z\omega}$ — спектральные амплитуды для лидерной стадии в волновой зоне. Если расстояние ρ имеет значение более 20 км, то частотный диапазон, в котором выражение (14) справедливо, должен составлять примерно 30—150 кГц.

В литературе мало данных о дисперсии скорости распространения ступени лидера. Если дисперсия невелика, то соотношением (14), в котором нет других параметров разряда, кроме v , можно воспользоваться для дальномерии гроз.

В заключение приведем выражение для вертикального подземного электрического поля у поверхности земли, определяемого выражениями (3) и (11), для волновой зоны:

$$E_{3z} = \frac{1}{2\pi\sigma c^2\rho} \int_0^H \frac{\partial^2 i_1(z, t)}{\partial t} dz. \quad (15)$$

Если принять, что скорость v движения фронта тока постоянна и $\frac{\partial I_1(vt, t)}{\partial t} = 0$, то, аналогично (9), будем иметь

$$E_{3z} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \frac{\partial E_z}{\partial t}, \quad (16)$$

что позволяет оценить из измерений поля некоторую «эффективную» проводимость земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кононов И. И., Семикрас Ю. В. Электромагнитное излучение молневых разрядов.— Труды ГГО, 1975, вып. 358, с. 48—60.
2. McLain D. K., Uman M. A. Exact expression and moment approximation for the electric field intensity of the lightning return stroke.— J. Geophys. Res., 1971, vol. 76, № 9, p. 2101—2105.
3. Ollendorff F. Einige Eigenschaften des Blitzfeldes.— Archiv für Electrotechnik, 1968, Bd 52, № 3, S. 137—147.
4. Uman M. A., McLain D. K. Radiation field and current of the lightning stepped leader.— J. Geophys. Res., 1970, vol. 75, № 6, p. 1058—1066.
5. Uman M. A., McLain D. K., Krider E. P. The electromagnetic radiation from a finite antenna.— Amer. J. Phys., 1975, vol. 43/1, p. 33—38.

Л. Г. Махоткин

О РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТАХ ПОЛОСТИ ЗЕМЛЯ-ИОНОСФЕРА

Уже давно было замечено, что для наблюдений за далекими грозowymi очагами (в радиусе до 5—10 тыс. км) нужно принимать атмосферерики на относительно более низких частотах, а при наблюдениях за ближними грозами (в радиусе до нескольких сотен километров) целесообразно использовать более высокие частоты [7]. Выбор рабочих частот при очень широком спектре атмосферериков обусловлен в основном учетом и практическим использованием особенностей распространения радиоволн. Наиболее подходящий участок для дальних наблюдений за грозами расположен в области частот порядка 10 кГц, поглощение которых сравнительно мало и обеспечивает прием отдельных атмосферериков, не сливающихся в сплошной фон [5, 10]. Основной рабочий участок для ближних наблюдений охватывает частоты порядка 100 кГц, распространяющиеся со значительным затуханием, что обеспечивает достаточно простое ограничение приема в пределах ближней зоны. Кроме систематического использования этих двух основных участков, несколько позднее начали исследоваться возможности дополнительного применения частотных участков, характеризуемых длинами волн, сравнимыми, с одной стороны, с размерами Земли (для сверхдальних наблюдений [4, 18, 21]), а с другой — с размерами обычно выбираемой ближней зоны (для наблюдений за местными грозами [6]). Дополнительные участки, расположенные в областях частот порядка десятков Гц и одного кГц, отличаются весьма специфическими особенностями. Частоты порядка десятков Гц затухают исключительно слабо, но над уровнем принимаемого сплошного фона может быть выделено лишь очень небольшое число отдельных, самых крупных атмосферериков.

Наиболее характерной особенностью самой низкой из указанных полос является наличие в ней резонансных частот f_n полости Земля—ионосфера, для которых обычно указывается теоретическая формула Шумана [4, 12, 17], где f_n выражено в Гц, c — ско-

рость света, a — радиус Земли:

$$f_n \approx \frac{c}{2\pi a} \sqrt{n(n+1)} \approx 7,5 \sqrt{n(n+1)}. \quad (1)$$

Резонансы обнаруживаются экспериментально по максимумам кривых амплитудно-частотного спектра атмосфериков, имеющих в данном участке колебательный характер [4, 12, 21, 22]. Максимумы спектральных кривых приходятся на частоты около 8, 14, 26, 32 Гц, которые оказываются приблизительно на 25% меньше соответствующих значений f_n , вычисленных по формуле (1). Заметные систематические расхождения между теоретическими и экспериментальными значениями f_n обычно устраняются с помощью более сложных расчетов, в которых учитывается проводимость [2], а также неоднородность нижней ионосферы [4], но тогда ряд вычисленных величин f_n не связывается элементарной формулой. Простое выражение, представляющее ряд экспериментальных значений f_n , дано в статье Кенига [19]:

$$f_n \approx 7,8 \sqrt{\frac{n(n+1)}{2}}, \quad (2)$$

не пытавшегося объяснить причину согласованности данных при введении множителя $1/\sqrt{2}$ (небольшое различие коэффициентов 7,5 и 7,8 в формулах (1) и (2) не имеет существенного значения). Независимо от формулы (2) и до ознакомления со статьями [19, 20], на которых, в частности, нет ссылок в [4], создавалось представление о необходимости замены величины c в формуле (1) величиной $v(f)$ — фазовой скоростью колебаний с частотой f :

$$f_n \approx \frac{v(f)}{2\pi a} \sqrt{n(n+1)} \approx 7,5 \left[\frac{v(f)}{c} \right] \sqrt{n(n+1)}. \quad (3)$$

Действительно, в результате анализа «хвостов» атмосфериков, одновременно зарегистрированных Тейлором и Сао [23] в двух пунктах, расположенных на расстояниях 5—15 тыс. км от источников, было найдено, что в рассматриваемом интервале частот величина $v^*(f) = \left[\frac{v(f)}{c} \right] \approx 0,7—0,8$, т. е. случайно близка к $(1/\sqrt{2})$. Экспериментальные данные о величине $v^*(f)$ согласуются с результатами теоретических расчетов [15, 16] и указывают на зависимость этой величины от направления распространения колебаний (с запада на восток или с востока на запад), хотя обнаруженные расхождения лежат еще в пределах погрешностей измерений [23]. Теоретически наибольшие изменения $v^*(f)$ в зависимости от направления распространения, вызванные влиянием магнитного поля Земли, получаются около критической частоты водновода Земля—ионосфера (вблизи 3 кГц) и значительно уменьшаются в обе стороны от нее [16]. Значения $v^*(f)$, вычисленные по данным измерений f_n с помощью формулы (3), имеют

щейся, как было позднее замечено, и в статье [20], достаточно близки к средним значениям из полученных другим способом экспериментальных данных [23], относящихся к распространению колебаний в противоположных направлениях. При $8 \leq f \leq 32$ Гц зависимость $v^*(f)$ от частоты по данным о резонансных частотах f_n приближенно представляется выражением $v^*(f) \approx 0,74 + 0,0015(f-8)$.

В настоящее время все чаще рассматриваются различные резонансные эффекты, вплоть до «поперечных» резонансов на частоте $(c/2h)$, где h — высота нижней ионосферы [4], хотя раньше условия обращения показателя преломления ионосферы в бесконечность лишь изредка связывались с резонансом [9]. «Поперечные» резонансы экспериментально не наблюдаются вследствие сильного поглощения [14], что вполне очевидно заранее, так как указанное значение $f \approx (c/2h)$ характеризует прежде всего область критической частоты волновода Земля—ионосфера. В связи с обращением к различным резонансам представляет интерес обратить внимание на резонансные эффекты, возникающие при рассеянии электромагнитных колебаний идеально проводящим шариком. При расчете коэффициентов рассеяния сферических частиц принято пользоваться безразмерным параметром $\rho = (2\pi a/\lambda)$, применяя который можно с учетом значения $\lambda = [v(f)/f]$ переписать формулу (3) в следующем виде:

$$\rho_n \approx v^*(f) \sqrt{n(n+1)}. \quad (4)$$

Приведенная в [13] теоретическая кривая изменения коэффициента рассеяния идеально отражающего шарика в зависимости от параметра ρ имеет колебательный характер, причем максимумы ее $\rho_1 \div \rho_7$ приходятся в пределах графической точности на соответствующие значения ρ_n , даваемые формулой (4) при $v^*(f) = v_1^*(f) \approx 0,87$. Заметим, что по шумановским резонансам в среднем получается $v^*(f) = v_2^*(f) \approx 0,77$, так что $v_2^*(f) \approx [v_1^*(f)]^2$.

Известные трудности, связанные с регистрацией шумановских резонансов, обычно проявляющихся в спектрах только при существенном осреднении данных (например, спектр, приведенный в [21], был получен при периоде осреднения, равном 17 мин), очевидно, должны возрасти в еще большей степени при попытке обнаружить резонансные колебания на Солнце, которые могли бы иметь частоту примерно 0,07 Гц, т. е. относились бы к микропульсациям типа ρ_3 [12].

Влияние магнитного поля Земли на распространение радиоволн может вызвать, кроме упомянутой выше зависимости фазовых скоростей от направления, небольшое расщепление резонансных частот. Самые общие закономерности воздействия магнитного поля проявляются в виде эффекта Зеемана в равной степени как в оптике, так и при отражении радиоволн от ионосферы, приводя в последнем случае к расщеплению критических частот ионосферных слоев в полном соответствии с элементарной теорией,

причем на высотнo-частотных характеристиках (ионограммах) при соответствующих условиях вполне определенно обнаруживается теоретически ожидаемая асимметрия триплета, имеющая пренебрежимо малую величину в оптической области. Более того, появившиеся в 1950 г. результаты работы Ридбека, в которой теоретически исследовались условия наблюдения триплета при отражениях от ионосферы, что связано в этом случае с появлением так называемого z -компонента, приводят к критерию, фактически совпадающему с найденным еще в 1909 г. Лоренцом критерием перехода продольного эффекта Зеемана в поперечный [8].

При расчете магнитного расщепления резонансных частот в [4] используется параметр гиротропии $\rho_H = (\omega_H/v_e)$, где ω_H — гидромагнитная частота электронов, v_e — эффективная частота соударений. В то время как ω_H является вполне определенной величиной, очень слабо изменяющейся с высотой, v_e сильно зависит от высоты, в частности уменьшаясь примерно от 65 км до 80 км, и может иметь сезонные и суточные колебания, поэтому для выяснения встречающихся расхождений продолжается разработка новых методов измерений [1, 11]. При $(\rho_H)^2 \ll 1$ среда становится изотропной [3], но по имеющимся данным в слое D параметр $\rho_H \approx 1$. По результатам расчетов, представленным в [4] в виде графиков для модели «двух полуужей» и для дипольной модели геомагнитного поля, расщепление Δf , т. е. разности частот боковых компонентов, можно ориентировочно характеризовать выражениями вида $\Delta f \approx 1,7\sqrt{(f_H/v_e)}$ в первом случае и $\Delta f \approx 0,9(f_H/v_e)$ во втором, где $f_H = (\omega_H/2\pi)$. Первое выражение, относящееся к довольно условной модели, не сходится по типу с ожидаемой для эффекта Зеемана зависимостью Δf от f_H . Второе выражение уже подобно (без учета коэффициента) характерному для эффекта Зеемана точному соотношению $\Delta f = f_H$, однако остается открытым вопрос об опущенном в выражении $\Delta f \approx 0,9(f_H/v_e)$ размерном множителе, который должен в таком случае иметь значение, близкое к единице.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М., «Наука», 1972, 563 с.
2. Альперт Я. Л., Гусева Э. Г., Флигель Д. С. Распространение низкочастотных электромагнитных волн в волноводе Земля — ионосфера. М., «Наука», 1967, 124 с.
3. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М., Физматгиз, 1960, 552 с.
4. Блюх П. В., Николаенко А. П., Филиппов Ю. Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля — ионосфера. Киев, «Наукова думка», 1977, 200 с.
5. Иньков Б. К. Фазовые методы определения расстояния до очагов атмосфериков. — Труды ГГО, 1973, вып. 319, 135 с.
6. Кононов И. И. Импульсный электромагнитный метод определения удаленности грозных очагов. — Труды ГГО, 1970, вып. 253, с. 46—54.
7. Леушин Н. И. К вопросу о важности исследования атмосфериков и на-

блюдений за ними для службы погоды. Л.—М., Гидрометеиздат, 1938, 72 с.

8. Махоткин Л. Г. Влияние магнитного поля на отражение радиоволн в ионосфере.— Труды ГГО, 1952, вып. 35(97), с. 29—34.
9. Махоткин Л. Г. Исследование высоких слоев атмосферы.— В кн.: Имянитов И. М. Приборы и методы для изучения электричества атмосферы, М., Гос. изд. техн.-теор. лит.-ры, 1957, с. 434—465.
10. Махоткин Л. Г., Иныхов Б. К. Однопунктные методы наблюдений за грозowymi очагами.— Труды ГГО, 1969, вып. 242, с. 32—36.
11. Молчанов О. А. и др. Метод определения эффективной частоты соударений электронов в нижней ионосфере.— Геомагнетизм и аэрономия, 1977, т. 17, с. 226—230.
12. Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ./ М. С. Александров, З. М. Бакленева, Н. Д. Гладштейн и др.— М., „Наука“, 1972. 195 с.
13. Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде. М.—Л., Гостехтеоретиздат, 1951, 288 с.
14. Barr R. The ELF and VLF amplitude spectrum of atmospheric with particular reference to the attenuation band near 3 kHz.— J. Atm. and Terr. Physics, 1970, vol. 32, № 6, p. 977—990.
15. Barr R. The propagation of ELF and VLF radio waves beneath an inhomogeneous anisotropic ionosphere.— J. Atm. and Terr. Physics, 1971, vol. 33, № 3, p. 343—353.
16. Barr R. The effect of the Earth's magnetic field on the propagation of ELF and VLF radio waves.— J. Atm. and Terr. Physics, 1971, vol. 33, № 10, p. 1577—1583.
17. Bezrodny V. G., Nikolaenko A. P., Sinitsin V. G. Radio propagation in natural waveguides.— J. Atm. and Terr. Physics, 1977, vol. 39, № 6, p. 661—688.
18. Kemp D. T. The global location of large lightning discharges from single station observations of ELF disturbances in the Earth—ionosphere cavity.— J. Atm. and Terr. Physics, 1971, vol. 33, p. 919—928.
19. König H. L. Globale Gewitterherdpeilung mittels ELF — Atmospheric. — Meteorol. Rundschau, 1974, Bd 27, № 4, S. 120—121.
20. Polk C. Relation of ELF noise and Schumann resonances to thunderstorm activity.— In: Planetary electrodynamics, vol. 2, N. Y.— London — Paris, Gordon and Breach Sci. Publ., 1969, p. 55—82.
21. Polk C., Clayton M. Location of mayor thunderstorm regions employing ELF noise.— Proceedings Waldorf Conference on long-range Geographical Estimation of Lightning Sources. Washington, Nav. Res. Lab. 1974, p. 242—251.
22. Schumann W. O., König H. Über die Beobachtungen von „Atmospherics“ bei geringsten Frequenzen.— Naturwissenschaften, 1954, Bd 41, № 8, S. 183—184.
23. Taylor W. L., Sao K. ELF attenuation rates and phase velocities observed from slow-tail components of atmospheric.— Radio Science, 1970 vol. 5, № 12, p. 1453—1460.

О ПОЛЯРИЗАЦИОННОМ ТОКЕ В АТМОСФЕРЕ

С целью выделения периодов наблюдений за электрическими характеристиками приземного слоя атмосферы, в течение которых вертикальная составляющая градиента потенциала V' электрического поля атмосферы относительно слабо зависела бы от местных условий, Долезалец [2] предложил использовать критерий $\Omega = j/V'\lambda$, где j — плотность вертикального электрического тока, измеренная на уровне земли, λ — измеренная суммарная электропроводность воздуха. По мнению Долезалеца, глобальные влияния на V' проявляются наиболее отчетливо при $\Omega \approx 1$. Израэльсон [4], анализируя результаты наблюдений за V' , λ , j и другими характеристиками в обсерватории Марста ($59^\circ 53'$ с. ш., $17^\circ 34'$ в. д.), получил для хорошей погоды средние месячные значения Ω , находящиеся в пределах 3—9, и сделал вывод о том, что электрические характеристики атмосферы в приземном слое формируются в основном под влиянием местных условий и несут в себе информацию лишь об этих условиях. Причиной больших значений Ω , по мнению Израэльсона, является конвективный ток, определяющий практически j у поверхности земли. Он отметил также, что и в отсутствие конвективного тока Ω не может быть равно единице по причинам, установленным Этте [3] и имеющим принципиальный характер. Именно на теоретическом значении Ω , полученном Этте, нам хотелось бы остановиться, так как нам кажется, что выводы Этте не приложимы к оценкам Ω по экспериментальным данным. Этте привел доказательство того, что при горизонтальном движении среды и заметных значениях dV'/dx , где x — горизонтальная координата, Ω не может быть равной единице из-за наличия поляризационного тока. При выводе своей конечной формулы Этте использовал одно из уравнений Максвелла для движущейся среды, заимствованное из курса электромагнетизма Бекера и Саутера [1]:

$$\mathbf{I} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{i} + \rho \mathbf{v} + \text{rot}(\mathbf{P} \times \mathbf{v}). \quad (1)$$

В этом выражении \mathbf{I} — вектор плотности полного тока, \mathbf{D} — вектор электрического смещения, \mathbf{i} — вектор тока проводимости, ρ — плотность электрического заряда в среде, \mathbf{v} — скорость движения среды, \mathbf{P} — вектор поляризации. Это уравнение получено из соответственного уравнения Максвелла для недвижущейся среды путем добавления двух членов: $(\rho - \operatorname{div} \mathbf{P})\mathbf{v}$ — плотность тока конвекции, заметная лишь наблюдателю, находящемуся вне среды, и $(\mathbf{v}\nabla)\mathbf{P}$ — плотность тока поляризации, заметная наблюдателю, движущемуся со средой.

После ряда преобразований и пренебрегая градиентом \mathbf{v} , а также $\mathbf{v}\times\mathbf{B}$, где \mathbf{B} — вектор магнитной индукции, Этте получил для вертикальной составляющей I_z следующее выражение:

$$I_z = i_z + \rho v_z + \epsilon_0 \kappa v_x \frac{\partial E_z}{\partial x}, \quad (2)$$

где
$$E_z = -V'_z, \quad \epsilon_0 \kappa = P_z/E.$$

Далее, следуя Этте, получим

$$\Omega = \frac{i_z + \rho v_z + \epsilon_0 \kappa v_x \frac{\partial E_z}{\partial x}}{i_z}, \quad (3)$$

где

$$\left| i_z + \rho v_z + \epsilon_0 \kappa v_x \frac{\partial E_z}{\partial x} \right| = j, \quad \text{а } i_z = |V'\lambda|.$$

Поэтому даже при $\rho v_z = 0$, Ω принципиально не может быть равно единице.

Однако, как нам кажется, это принципиальное положение неверно. Плотность вертикального электрического тока измеряется с помощью пластины, установленной неподвижно на поверхности земли. Поэтому с помощью такой пластины ток поляризации измерен быть не может, и при отсутствии конвективного тока Ω в принципе может быть равным единице. В то же время в связи с тем, что существование $v_x \partial V'_z / \partial x$ связано с горизонтальным переносом объемного заряда, т. е. с горизонтальным конвективным током, использование критерия Этте $v_x \partial V'_z / \partial x > a$, где a — заданная величина, было бы полезно при определении невозмущенных в атмосферно-электрическом смысле условий в атмосфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Becker R. Electromagnetic fields and interaction. Vol. 1. London — Glasgow, Blackie, 1964. 439 p.
2. Dolezalek H. Zur Methodik Luftelektrischer Messungen VIII: Die Luftelektrische Station. Teil. T. Das Prinzip. Beitrage zur Geophysik, 1962, Bd 71, H 2, S. 77—89.
3. Ette A. I. An effect of space charge advection on vertical air—earth current measurements.—Arch. Met. Geoph. und Bioklimatol. Ser. A., 1972, Bd 21, № 2—3, p. 329—338.
4. Israelsson S. On the conception „Fair weather condition in atmospheric electricity.“ — Pure and Appl. Geoph., 1978, vol. 116, № 1, p. 149—158.

К. А. Семенов, Л. Г. Соколенко, Я. М. Шварц

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИБОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА

Введение

Совершенствование аппаратуры представляет собой нормальный процесс в приборостроении. Возможность изменения конструкции аспирационных конденсаторов измерителей электропроводности воздуха с целью уменьшения методических погрешностей измерений выявилась при лабораторных исследованиях конденсаторов. Некоторые возможности уменьшения методических погрешностей измерений представляет использование усилителей со стопроцентной параллельной обратной связью по напряжению. Ниже изложены некоторые идеи модернизации измерителя электропроводности воздуха и кратко описана конструкция и структурная схема прибора, в котором воплощены эти идеи. Представлены результаты исследования измерителя и отдельные результаты измерений. Основная цель усовершенствования измерителя электропроводности воздуха — это снижение возможности появления методических погрешностей измерений, в особенности связанных с метеословиями.

Основные идеи

Влияние краевого эффекта в аспирационных измерителях концентрации аэроионов уменьшается, если при применении схемы конденсатора с внешней потенциальной, а внутренней собирающей и заземленной обкладками внутреннюю обкладку выдвинуть в переднюю часть конденсатора [6]. Физика явления заключается в следующем. Краевой эффект создает на стыке внешней потенциальной обкладки и входной трубы конденсатора зону обеднения аэроионами измеряемой полярности. Благодаря турбулентности зона обеднения распространяется в глубь конденсатора с некоторой скоростью и в конечном счете займет стационарное положение, причем передний край зоны на уровне поверхности соби-

рающей обкладки будет более удален от входного отверстия конденсатора, чем передний край зоны, на уровне поверхности внешней обкладки. Выведение хотя бы части собирающей обкладки из зоны обеднения должно в принципе привести к уменьшению влияния краевого эффекта.

Другое наблюдение, которое было использовано, — это эксперименты по изучению влияния потока аэрозолей на электризацию внутренней собирающей обкладки в аспирационном конденсаторе. Наблюдения показали, что значительная часть аэрозоля попадает на носок обкладки. Естественной оказалась защита передней части обкладки от потока аэрозолей с помощью аэродинамического обтекателя, не вызывающего срыва потока воздуха. Применение аэродинамических обтекателей в конструкциях собирающей обкладкой, помещенной в центральной части внешнего электрода, проблематично, так как присутствие обтекателя приведет к появлению дополнительной емкости аспирационного конденсатора. Учет этой емкости будет иметь следствием понижение напряжения между обкладками конденсатора и уменьшение рабочего тока. Если же, основываясь на вышеизложенном, собирающую обкладку выдвинуть в переднюю часть конденсатора, то становится возможным поместить аэродинамический обтекатель в зоне входной трубы и таким образом свести емкость между аэродинамическим обтекателем и внешней обкладкой к минимуму.

Кроме того, как кажется, ранее не была использована возможность предотвращения попадания в конденсатор достаточно крупных частиц аэрозолей при порывах ветра. В то же время эти частицы могут привести к появлению дополнительного тока на собирающую обкладку, не связанного с электропроводностью воздуха. Подобная же возможность заключается в создании конструкции, воздушный канал которой обладал бы большим аэродинамическим сопротивлением.

Использование электрических схем операционных усилителей в качестве измерителей тока аспирационных конденсаторов стало обычным делом из-за больших потенциальных возможностей этих схем. Применение в качестве измерителя электрометрического усилителя с глубокой отрицательной обратной связью по напряжению и с использованием измерительного сопротивления в цепи обратной связи значительно понижает требование к сопротивлению изоляции входной цепи, включающей в себя собирающую обкладку и соединительный кабель, а также позволяет организовать автоматический контроль за сопротивлением изоляции путем включения в выходную цепь усилителя дополнительного источника напряжения.

Конструкция и электрическая схема

Предложения о выдвигании собирающей обкладки в переднюю часть конденсатора, о введении аэродинамического обтекателя — аэрозольной защиты, об автоматическом контроле за сопро-

тивлением изоляции были защищены авторскими свидетельствами [7—9] и реализованы в конструкции измерителя электропроводности воздуха, описанной ниже. Учтено также предложение о повышении аэродинамического сопротивления воздушного канала аспирационного конденсатора. При реализации предложений существовало стремление создать переносную конструкцию измерителя электропроводности воздуха, хотя, может быть, такое

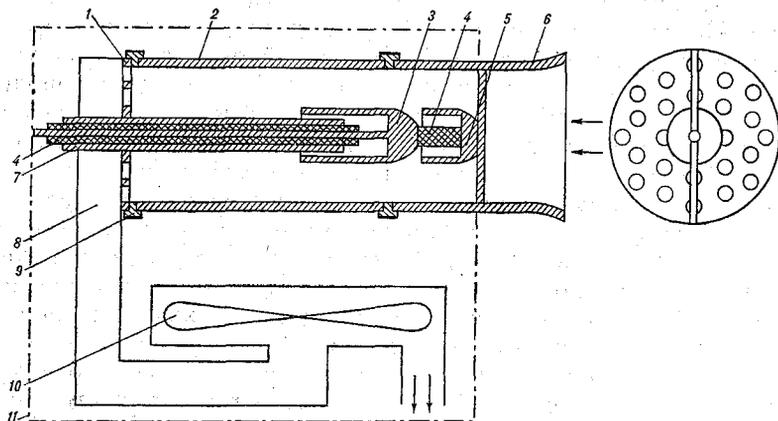


Рис. 1. Схематическое изображение аспирационного конденсатора в разрезе

1 — диафрагма с отверстиями, 2 — внешняя обкладка, 3 — внутренняя обкладка, 4 — изоляторы (фторпластовые), 5 — аэрозольная защита, 6 — входная труба, 7 — экран, 8 — воздушный канал, 9 — изоляторы (текстолит), 10 — турбовентилятор, 11 — корпус.

стремление не всегда является оправданным из-за меньшей надежности малогабаритных конструкций (малые токи, малые расстояния между заземленными и потенциальными элементами конструкции, малая толщина изоляторов и т. п.). На рис. 1 представ-

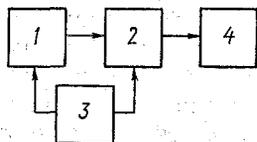


Рис. 2. Структурная схема прибора для измерения электропроводности воздуха.

1 — аспираторный конденсатор, 2 — измеритель (электрометрический усилитель У5-7), 3 — блок управления и питания, 4 — регистратор Н-39.

лено схематическое изображение аспирационного конденсатора в разрезе, а на рис. 2 — структурная электрическая схема измерителя электропроводности в целом. В электрометрический усилитель У5-7 внесены следующие изменения. Вместо измерительного резистора сопротивлением 10 ГОм были установлены резистор сопротивлением 470 ГОм и конденсатор типа ПСО емкостью 82 пФ. Кроме того, было предусмотрено выполнение операции блокирования резистора и конденсатора по командам, поступающим от блока управления. Контроль точностных характеристик У5-7 про-

изводился с помощью прецизионного источника тока. Диапазон измерений разработанного прибора составил $(0-30) \cdot 10^{-15}$ См/м, ожидаемый предел допускаемой погрешности измерений $\pm 1,5 \cdot 10^{-15}$ См/м $\pm 0,05 \lambda_p$, где λ_p — измеряемая полярная электропроводность воздуха. Инерция прибора равнялась примерно 40 с.

Методика измерений

Использовались два варианта методики измерений. В первом полярные электропроводности воздуха измерялись поочередно, во втором — одновременно. В первом случае применялся один аспирационный конденсатор и схема автоматического переключения полярности измеряемой электропроводности, во втором — два аспирационных конденсатора. Рабочий цикл прибора в первом варианте составлял один час, из которого пятьдесят минут уходило на измерение, а десять минут — на контроль положения нуля. Длительность непрерывного измерения положительной и отрицательной электропроводности воздуха составляла пять минут. При таком способе измерений достигается следующее преимущество: полярные электропроводности воздуха измеряются одним и тем же измерительным каналом, что существенно для точного определения коэффициента униполярности. Однако в связи с тем, что не удалось устранить поляризацию изоляторов, связанную с появлением коммутационных напряжений на входе схемы при блокировании измерительного резистора, впоследствии стал использоваться второй вариант методики измерений, который применяется и по сей день.

Разработанные аспирационные конденсаторы были установлены для испытаний на полевой базе ГГО в Воейково с северной стороны здания пункта измерений характеристик атмосферного электричества таким образом, что центры входных отверстий конденсаторов находились на высоте 1,5 м от поверхности земли. Ось входной трубы была параллельна поверхности земли.

В результате испытаний необходимо было ответить на такие вопросы:

а) оправдало ли себя введение в конструкцию аэродинамического обтекателя,

б) целесообразно ли использование воздушного канала аспирационного конденсатора с большим аэродинамическим сопротивлением,

в) какова работоспособность аспирационного конденсатора в периоды выпадения осадков,

г) полезно ли использование измерительной схемы с автоматическим контролем сопротивления изоляции и возможно ли применение промышленных электрометрических усилителей типа У5-7,

д) может ли быть рекомендована испытываемая конструкция прибора для измерения электропроводности воздуха для использования на сети наблюдений за электрическими характеристиками атмосферы Госкомгидромета.

Визуальные наблюдения за прибором и анализ результатов измерений показали, что использование аэродинамического обтекателя и воздушного канала с высоким аэродинамическим сопротивлением оправдано. Так, не замечено попадания достаточно крупных частиц в конденсатор. В периоды даже очень сильных снегопадов в аспирационном конденсаторе не накапливался снег, а также не наблюдалось дополнительной электризации собирающей обкладки. Для таких периодов был проведен совместный анализ результатов измерений, полученных с помощью разработанного прибора и прибора системы Аллика [1], установленного поблизости. Было замечено, что при измерении положительной электропроводности данные по прибору системы Аллика иногда в 2—3 раза превышают значения электропроводности воздуха, полученные с помощью разработанного прибора. Особенно хорошо это прослеживается при северо-восточных направлениях ветра, так как входные отверстия аспирационных конденсаторов прибора системы Аллика расположены с северо-восточной стороны здания. Правда, такие случаи достаточно редки и отдельные выбросы почти не сказываются на подсчете средних значений, что показано в табл. 2. При измерении отрицательной электропроводности воздуха увеличения показаний прибора не наблюдалось. Возможно, что это связано с зарядом снежинок. Дело в том что в приборе системы Аллика при измерении положительной электропроводности внутренний электрод находится под высоким отрицательным потенциалом около 150 В. Положительно заряженные снежинки притягиваются к электроду, попадают на него и при отрыве обуславливают резкое снижение отрицательного потенциала электрода, что приводит к завышению показаний. При измерении же отрицательной электропроводности положительный потенциал электрода препятствует попаданию снежинок на электрод.

Результаты испытаний показали достаточную работоспособность прибора как в хорошую погоду, так и в периоды выпадения осадков. Сопротивление изоляции собирающей обкладки даже в тяжелых метеоусловиях (высокая влажность, сильные снегопады, ливневые дожди) находилось в тех пределах, в которых оно не сказывается на результатах измерений. Но было обнаружено, что из-за малых расстояний между заземленными элементами конструкции и самой собирающей обкладкой в теплое время года имело место образование перемычек из попадающих в конденсатор паутинок, это приводило к падению сопротивления изоляции при повышении влажности воздуха. Установка защитных сеток на входе конденсатора лишь сократила попадание паутины.

Надо заметить, что возможности схемных решений по борьбе с последствиями попадания паутинок не были исчерпаны. В частности, возможна подача на близлежащие к собирающей обкладке части конструкции электрического потенциала, равного $u/k\beta$, где

u — напряжение на выходе при согласованных постоянных времени выхода и входа.

Длительная эксплуатация прибора доказывает целесообразность автоматического контроля сопротивления изоляции, поскольку это упрощает эксплуатацию прибора.

Усилитель У5-7 работал достаточно надежно в полевых условиях. Однако он чувствителен к помехам, изоляторы в нем сильно поляризуются, требуется частое профилактическое обслуживание (промывка выносного блока спиртом). Для полевых условий усилитель непригоден. Поэтому в дальнейшем предполагается либо разработать специальные измерительные схемы для прибора электропроводности воздуха, либо применить новые типы промышленных электрометрических усилителей. Использование прецизионных источников тока для контроля точностных характеристик в целом оказалось чрезвычайно полезным. Длительные испытания показали, что при исправной работе электрометрического усилителя погрешность измерений не превышает заданную.

Существенное значение для интерпретации результатов измерений имеет сопоставимость показаний приборов для измерения электропроводности воздуха. Были выполнены сравнения показаний двух приборов, измеряющих одну и ту же полярную электропроводность воздуха. Аспирационные конденсаторы приборов были установлены на одинаковой высоте ($h=1,5$ м), а входные отверстия конденсаторов были разнесены на расстояние около полуметра. Сопоставлялись среднечасовые значения λ электропроводности воздуха. Измерения выполнены в дни с хорошей погодой. Результаты представлены в табл. 1, в которой приведены средние отношения значений электропроводности λ_2/λ_1 , полученные с помощью двух приборов, стандартные отклонения σ этих отношений и число случаев (часов) для положительных и отрицательных значений электропроводности. Проведена градация по значениям электропроводности.

Таблица 1

$\lambda \cdot 10^{-15} \text{См} \cdot \text{м}^{-1}$	$\lambda_2^+ / \lambda_1^+$	σ	$\lambda_2^- / \lambda_1^-$	σ	Число случаев	
					+	-
1—5	1,03	0,17	1,03	0,20	14	38
6—10	1,06	0,10	1,02	0,10	153	117
>11	1,17	0,10	1,02	0,20	21	95

Погрешность δ обработки λ складывается из погрешности проведения нулевой линии, погрешности осреднения и погрешности отсчета. Для λ , находящейся в пределах $(1-10) \cdot 10^{-15} \text{См} \cdot \text{м}^{-1}$, δ составляет 5—10%.

Из таблицы следует, что значения λ , полученные по двум приборам, сходятся почти что в пределах погрешности обработки

данных, за исключением одного ряда данных для больших значений положительной электропроводности воздуха. Дополнительное сопоставление данных измерений сконструированного прибора 1 в этот период с данными прибора системы Аллика показало их высокую сходимость. Поэтому высокое значение $\lambda_2^+/\lambda_1^+ = 1,17$ вызвано, по-видимому, нестабильной работой измерительной схемы прибора 2 в этот период.

Кроме описанных сопоставлений, были проведены сравнения сконструированного прибора и прибора системы Аллика. Эти сравнения носят оценочный характер, так как приборы были установлены на разных высотах (1,5 и 2,5 м) и на разных сторонах здания (северной и восточной). Сопоставления были проведены для различных условий погоды. В табл. 2 приведены средние отношения λ_1/λ_A и стандартные отклонения σ для положительных и отрицательных значений электропроводности.

Таблица 2

Осадки	λ_1^+/λ_A^+	σ	λ_1^-/λ_A^-	σ	Число случаев	
					+	-
Отсутствуют	1,01	0,14	0,96	0,20	188	250
Твердые	1,02	0,14	—	—	454	—
Жидкие	0,96	0,22	0,80	0,14	231	272

Данные в период выпадения твердых осадков для отрицательных значений электропроводности не приведены из-за малого их объема. Сравнение данных говорит о некоторой сходимости результатов, полученных двумя приборами.

Сходимость результатов измерений подтверждается сравнениями указанных приборов с величинами λ_G , полученными с помощью прибора системы ГГО [2], аспирационный конденсатор которого был установлен на одном уровне с аспирационным конденсатором разработанного прибора. Средние отношения λ_1^+/λ_G^+ и λ_1^-/λ_G^- составили соответственно 1,01 и 0,95 при $\sigma^+ = 0,22$ и $\sigma^- = 0,14$. Использованы результаты наблюдений в течение около 100 ч. В периоды снегопадов показания прибора системы ГГО увеличивались.

В связи с переходом на автоматизированную систему наблюдений были сопоставлены результаты определения средних часовых значений электропроводности воздуха по данным непрерывной записи на ленту регистратора (λ_1) и дискретных отсчетов показаний, производящихся через пять минут (λ_*). По данным измерений в течение одной недели отношение λ_1/λ_* составило примерно 1,00 при стандартном отклонении $\sigma = 0,1$.

Результаты измерений

В последнее время проявляется интерес к использованию данных по электропроводности λ воздуха для оценки загрязненности атмосферы [3]. В связи с этим были проанализированы данные измерений λ во время примерно тридцати дождей. Высокая надежность работы прибора в осадках обеспечила возможность проведения такого анализа. По данным, представленным в [4], концентрация ядер конденсации при осадках уменьшается в два раза. Если дополнительно к этим данным считать, что суммарная концентрация ядер конденсации является единственным переменным фактором, определяющим электропроводность воздуха, то можно ожидать ее увеличения хотя бы в течение небольшого интервала времени после прекращения осадков.

Периоды наблюдений с выпадением осадков были разделены на три группы. Первая группа — периоды, в течение которых ветер был направлен со стороны расположения основных источников загрязнения; вторая группа — с тех сторон, где крупные источники загрязнений отсутствовали; третья группа — со сменой указанных направлений ветра. Как было показано в [5], первой группе соответствуют пониженные, а второй — повышенные значения электропроводности воздуха. Обработка данных производилась следующим образом: вычислялись средние значения положительной электропроводности воздуха за два часа до начала выпадения осадков и за два часа после выпадения осадков и средние значения во время выпадения осадков. Анализ показал, что характер изменений электропроводности воздуха в периоды со сменой направлений ветров целиком контролируется направлением ветра. Результаты обработки данных для первой и второй групп направлений ветров отдельно представлены в табл. 3. Значения электропроводности воздуха даны в $\text{ф} \cdot \text{См} \cdot \text{м}^{-1}$ ($1 \text{ ф} \cdot \text{См} \cdot \text{м}^{-1} = 10^{-15} \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$).

Таблица 3

Направление ветра	До выпадения осадков	Осадки	После выпадения осадков
Со стороны источников загрязнений	6	6	7
Со стороны, где крупные источники загрязнений отсутствуют	11	11	10

Доверительный интервал средних значений составляет $\pm (1-2) \text{ ф} \cdot \text{См} \cdot \text{м}^{-1}$ на уровне значимости 0,95.

Как видно из табл. 3, в период наблюдения май—июнь 1977 г. значительного влияния выпадения осадков на электропроводность воздуха в среднем не обнаружено. Этот результат, очевидно, под-

лежит более тщательному анализу особенно в связи с проблемой использования результатов измерения электропроводности воздуха для оценки содержания в нем аэрозолей в субоптическом диапазоне размеров. Заметим, что во время туманов и перед их появлением отмечалось значительное понижение электропроводности воздуха.

Заключение

По мере изложения материала уже были сформулированы основные выводы из результатов исследований. Имеет смысл попытаться на базе описываемого прибора создать прибор для измерения электропроводности воздуха, предназначенный для сети Госкомгидромета. Полезно более тщательно выяснить возможность использования результатов измерения электропроводности воздуха вкупе с другими электрическими характеристиками атмосферы для оценки содержания в ней аэрозольных частиц в субоптическом диапазоне размеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Имянитов И. М. Приборы и методы для изучения электричества атмосферы. М., ГИТТЛ, 1957. 483 с.
2. Имянитов И. М. и др. Прибор для измерения электрической проводимости воздуха у поверхности земли.—Труды ГГО, 1960, вып. 110, с. 53—66.
3. Непреднамеренные воздействия на климат. Под ред. М. И. Будыко. Л., Гидрометеиздат, 1974. 260 с.
4. Селезнева Е. С. Атмосферные аэрозоли. Л., Гидрометеиздат, 1966. 174 с.
5. Семенов К. А. Влияние локальных условий на элементы атмосферного электричества.—Труды ГГО, 1974, вып. 323, с. 109—118.
6. Таммет Х. Ф. Аспирационный метод измерения спектра аэроионов.—Уч. зап. Тартуского гос. ун-та, 1967, вып. 195. 234 с.
7. Таммет Х. Ф., Шварц Я. М. Устройство для измерения электропроводности воздуха. Авторское свидетельство № 464881. Оpubл. в Бюлл. изобрет., 1975, № 11.
8. Таммет Х. Ф., Шварц Я. М. Измерительный конденсатор. Авторское свидетельство № 508811. Оpubл. в Бюлл. изобрет., 1976, № 12.
9. Шварц Я. М. Авторское свидетельство № 456243. Оpubл. в Бюлл. изобрет., 1975, № 1.

Т. В. Лободин, Л. В. Огуряева

О ДЛИНЕ РЯДОВ АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

При определении закономерностей в поведении метеорологических элементов в зависимости от поставленных задач пользуются рядами различной длины. В климатологии исследуются обычно ряды, не превышающие 100 лет [4]; так как по данным работы [1] дальнейшее увеличение рядов не имеет смысла в связи с их неоднородностью.

Рабочей группой ВМО по климатическим показателям принят в качестве стандарта 30-летний ряд. Однако для средних месячных температур устойчивые значения средних по данным [5] можно получить за 70 лет, для месячных сумм осадков за 50 лет [2]. Для прикладных целей 20—25-летние ряды позволяют провести экстраполяцию примерно с такой же точностью, как и 50-летние ряды [3]. Что же касается визуальных наблюдений, то в прикладных целях можно ограничиться и более короткими рядами наблюдений [4].

В настоящей работе исследованы закономерности в изменении рядов следующих атмосферно-электрических элементов: число дней с грозой T , продолжительность гроз Π , градиент электрического потенциала атмосферы, электрическая проводимость воздуха, число грозовых разрядов. Для изучения особенностей в поведении рядов различных атмосферно-электрических элементов привлекались данные за 95, 88 и 30 лет наблюдений, за числом дней с грозой, 30-летние данные за продолжительностью гроз, 20-летние данные по градиенту потенциала и электрической проводимости и 18-летние данные по числу грозовых разрядов. В нашем случае делались выборки среднегодовых значений P .

При определении закономерностей различных рядов использовался метод скользящих средних с выбором экстремальных их значений. Этот метод заключается в следующем. Пусть имеется ряд наблюдений какого-нибудь атмосферно-электрического элемента P . Этот ряд состоит из n -членов ряда: $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n$. Тогда для значения P_i за один год выбираются $P_{i\max}$ и $P_{i\min}$, за два года

берутся значения $\frac{(P_i + P_{i+1})_{\max}}{2}$ и $\frac{(P_i + P_{i+1})_{\min}}{2}$, за k лет — $\frac{(P_i + P_{i+(k-1)})_{\max}}{2}$ и $\frac{(P_i + P_{i+(k-1)})_{\min}}{2}$ и т. д. Таким образом строится график для каждого элемента.

Для исследования влияния длины ряда по числу дней с грозой на точность по отношению к рядам до 100 лет применен следующий способ обработки. Для Ленинграда и Киева обрабатывались данные за 5, 10, 15, 20, 30, 50 лет наблюдений, а также за 88 лет для Ленинграда и 95 лет для Киева. Затем строились номограммы для определения числа лет, необходимых для достижения точности 5, 10, 20, 30, 40, 50% среднего значения своего ряда. При этом была проведена экстраполяция этих данных на 100-летний период, что не вызывает возражений в связи с малым отличием имеющихся рядов по сравнению с вековым периодом. Оказалось, что для определения T 20—25-летние ряды совершенно достаточны для того, чтобы производить экстраполяцию на 50 и даже 100-летние ряды. Приведем табл. 1 для определения рядов наблюдений числа дней с грозой с различной точностью по отно-

Таблица 1

Зависимость числа лет наблюдений от длины ряда при различной точности

Пункт наблюдения	Длина ряда, годы	Точность, %					
		5	10	20	30	40	50
Ленинград	100	69	45	17	11	6	3
	50	35	24	11	7	4	2
	30	22	15	8	5	3	1
	20	15	11	6	4	2	1
	10	9	7	5	3	2	1
Киев	100	47	25	18	12	9	7
	50	26	15	10	7	5	4
	30	18	11	7	5	4	3
	20	13	8	6	4	3	2
	10	8	6	4	3	2	2

шению к рядам разной длины для Киева и Ленинграда. Анализ таблицы позволяет сделать вывод о том, что при приведении к 100-летним рядам наблюдений при точности 30% можно пользоваться рядами наблюдений за числом дней с грозой 11—12 лет.

Как видно из табл. 1, средние значения числа дней с грозой, полученные по 30-летним рядам отличаются от полученных по 100-летним рядам не более чем на 10÷15%. В дальнейшем все атмосферно-электрические элементы будем приводить к стандартным 30-летним рядам.

Таблица 2

Число лет наблюдений за элементами атмосферного электричества при заданной точности. Приведено к 30-летним рядам

Пункт наблюдения	Элемент	Точность, %					
		5	10	20	30	40	50
Ленинград	T дни	22	15	8	5	3	1
Киев		18	11	7	5	4	3
Бакуриани		22	14	7	4	3	2
Пенза		15	10	7	5	4	2
Мамадыш		25	21	10	5	4	3
Астрахань		23	20	15	8	5	3
Куйбышев	P ч	27	24	22	13	9	7
Кузнецк		27	25	19	16	14	10
Мамадыш		27	24	19	15	7	6
Астрахань		27	24	19	13	11	7
Пенза		18	13	8	6	4	2
Воейково		N (ПРГ-15)	21	18	16	14	13
	N (ПРГ-100)	21	19	14	9	7	5
	N (1В/М)	18	13	9	8	6	4
Душети	N (ПРГ-15)	22	17	16	15	13	11
Воейково	E_H	18	6	3	2	1	—
	E_B	22	20	8	5	3	2
	λ_B	14	8	5	3	2	1
Душети	E_H	26	18	12	5	1	—
	E_B	25	15	11	6	3	2
	λ_B	30	22	18	6	4	2
Иркутск	E_H	26	19	14	6	2	1
	E_B	26	25	19	16	13	11
	λ_B	25	20	12	6	4	2
Свердловск	E_H	19	14	3	2	1	—
	E_B	18	6	2	1	—	—
	λ_B	26	22	13	10	8	3
Ташкент	E_H	21	5	3	1	—	—
	E_B	18	14	9	6	3	1

В табл. 2 приведены значения числа лет наблюдений при различной точности, приведенные к 30-летним рядам для различных атмосферно-электрических элементов. Не останавливаясь на рассмотрении закономерностей в поведении числа дней с грозой и средней за год продолжительности гроз, о которых будет подробно сказано ниже, рассмотрим такие характеристики, как напряженность электрического поля E , электропроводность λ и число разрядов N .

Для всех рассматриваемых пунктов 50%-ная точность наблюдений за нормальными значениями напряженности поля E_H достигается при годовичных наблюдениях, 20%-ная точность в зависимости от пункта наблюдений достигается при наблюдениях в течение 3—14 лет. И наконец, 5%-ная точность достигается при рядах наблюдений от 18 до 26 лет. В среднем напряженность поля по всем дням E_B менее устойчивый элемент и требует для такой же точ-

ности большего числа лет наблюдений. Так, для E_v 50%-ная точность достигается при 2—11 годах наблюдений, 20%-ная — при 2—19, а 5%-ная — при 18—26 годах. Таким образом, для достижения больших точностей число лет наблюдений за E_n и E_v мало отличаются друг от друга для каждого пункта. Однако для достижения точности 20—30% E_v требует большего числа лет наблюдений, чем E_n . Этот результат, очевидно, является следствием того, что значения E_n фильтруются по критериям выборки и таким образом экстремальные значения E_n отбрасываются. Самым неустойчивым элементом по отношению к средним ряда наблюдений является электрическая проводимость воздуха λ_v по всем дням. Так, для λ_v точность 50% достигается при 1—3 годах, 20% — при 5—18, 5% — при 14—30 годах в зависимости от пункта наблюдения.

При рассмотрении особенностей поведения числа грозových рядов получается следующая картина. С увеличением эффективного радиуса $R_{эф}$ уменьшается число лет наблюдений, необходимых для достижения заданной точности по отношению к среднему значению ряда. Так, если при наблюдениях при помощи грозорегистратора 1 В/м ($R_{эф} \approx 70—100$ км) для 50%-ной точности требуется 4 года, то для ПРГ-100 ($R_{эф} \approx 15—20$ км) — 5 лет и для ПРГ-15 ($R_{эф} \approx 5—6$ км) — 9 лет. Однако число лет, необходимое для достижения 5%-ной точности, мало отличается для всех типов грозорегистраторов. Следовательно, с увеличением $R_{эф}$ наблюдается более крутой наклон кривых необходимого числа лет в зависимости от длины ряда при заданной точности. Это и понятно, так как с увеличением $R_{эф}$ происходит осреднение данных по значительной площади, тогда как для малых $R_{эф}$ более резко выступают индивидуальными локальные особенности. Что же касается сопоставлений данных по ПРГ-15 для Душети и Воейково, то они практически идентичны, несмотря на существенные различия в климатических условиях.

Для выяснения закономерностей в изменении рядов наблюдений в зависимости от среднегодовых значений \bar{T} и \bar{P} были обработаны данные 20 метеостанций для интервала \bar{T} от 5 до 49 дней и \bar{P} от 10 до 100 ч.

Для мест с большим числом дней с грозой и с большой среднегодовой продолжительностью необходимо иметь меньший ряд наблюдений при той же точности, чем для дней с меньшими значениями \bar{T} и \bar{P} . Однако эта разница Δn не очень велика и составляет 2—3 года для $T=50$ и $T=5$ дней. Средняя годовая продолжительность гроз еще более устойчива в этом отношении, так что для $\bar{P}=100$ и $\bar{P}=10$ $\Delta n=1—2$ года. Во многих случаях оценка длины ряда по экстремальным значениям недостаточна и необходимо рассчитать средние квадратические ошибки σ и коэффициенты вариации $C_v = \frac{\sigma}{\bar{P}}$, где \bar{P} — средняя величина какого-нибудь элемента за расчетный период.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будыко М. И., Дроздов О. А. О применении осреднения в климатологических исследованиях.— Метеорология и гидрология, 1966, № 10, с. 2—6.
2. Дроздов О. А., Орлова В. В., Швер Ц. А. К вопросу об оптимальной длительности периода осреднения при климатологических исследованиях.— Труды ГГО, 1965, вып. 181, с. 14—46.
3. Заварина М. В. О климатологических нормах и оптимальном периоде наблюдений.— Метеорология и гидрология, 1966, № 2, с. 44—47.
4. Кобышева Н. В. Косвенные расчеты климатических характеристик. Л., Гидрометеиздат, 1971. 190 с.
5. Рубинштейн Е. С. К вопросу о периоде осреднения в климатологии.— Труды ГГО, 1965, вып. 181, с. 46—56.

✓

И. М. Имянитов, Е. В. Чубарина

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНТАКТНОЙ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ЧАСТИЦ

Основной задачей лабораторных исследований была оценка эффективности контактного заряжения частиц в электризации аэрозольного облака.

В первую очередь предполагалось выяснить, почему основной процесс организованной электризации в облаках проявляется после возникновения в них ледяной фазы. Этот эффект был установлен при наблюдениях естественно развивающихся облаков [3] и подтвержден опытами, проведенными при искусственно стимулированной электризации конвективных облаков [5]. Предполагалось также выявить существенные для расчета электризации аэрозольных облаков характеристики заряжения отдельных частиц и объема в целом, в частности зависимость электризации облака от соотношения количеств частиц различных компонентов.

В качестве рабочей гипотезы в основу опытов была положена разработанная в отделе атмосферного электричества ГГО теория контактной электризации частиц [1]. В соответствии с этой теорией все процессы электризации, возникающие при разрыве контакта между частицами, частицей и поверхностью, разрушении частиц и т. п. объясняются различием $\Delta\varphi_{12}$ в электрохимических потенциалах φ_1 и φ_2 разделяющихся элементов. Однократные разрывы контактов между частицами ведут к появлению зарядов q , пропорциональных радиусу r частиц:

$$q = A\Delta\varphi_{12}r. \quad (1)$$

Многократные повторные разрывы контактов приводят к тому, что крупные частицы радиуса R приобретают в пределе заряд

$$Q = A\Delta\varphi_{12} \frac{R^2}{r}. \quad (2)$$

В том случае если между крупными и мелкими частицами в среднем существует различие в электрохимических потенциалах

одного знака, то возникает организованная электризация объема. Если знак и величина $\Delta\varphi_{12}$ для частиц разных размеров случайны, то заряджение отдельных частиц не ведет к организованной электризации объема.

Использование принятой модели позволило ввести критерии подобия аэрозольных облаков друг другу и свести всю сложность многообразия реальных облаков к нескольким параметрам, описывающим процесс электризации в облаках [4]. К этим параметрам относятся: электрохимические потенциалы разделяющихся частиц, размеры частиц, концентрации частиц, доля частиц, разделяющихся после контактов.

На описанной стадии опыты проводились с твердыми аэрозолями. В качестве камеры использовался двухсветный зал в павильоне атмосферного электричества ГГО объемом примерно 250 м^3 ($6 \times 6 \times 7$).

В проведенных опытах ограничили изучением эффектов процессов электризации, в которых основная масса частиц получает заряды в результате однократных или нескольких принудительных контактов. Такая схема опытов, давая заниженную электризацию по сравнению с реальным облаком, в котором предполагаются множественные контакты [4], позволяет в то же время более четко наблюдать характеристики заряджения с помощью рассматриваемого механизма. Для осуществления однократности контактов обеспечивался контакт частиц до введения их в распыленном состоянии в камеру. Надо при этом иметь в виду, что принятая схема опыта, обеспечивая малое число контактов мелких частиц с крупными, в то же время позволяет очень крупным частицам иметь много контактов с мелкими, если относительное число последних велико.

В ходе эксперимента исследовались:

— электризация атмосферы во всем объеме камеры при распыливании в ней чистых порошков;

— зависимость электризации от количества распыленного вещества;

— спектры зарядов частиц при распыливании чистых порошков;

— изменение электризации атмосферы в объеме камеры при распыливании порошковых смесей в различных весовых соотношениях;

— изменения спектров зарядов частиц при распыливании порошковых смесей.

Схема проведения опыта представлена на рис. 1. Распыливание проводилось с помощью пылесоса с балкона двухсветного зала, расположенного на высоте примерно 5 м от пола с одной или с двух подложек, укрепленных по углам перил. Подложки крепились на изоляторах и соединялись через сопротивление с землей. Ток, протекавший с подложки по сопротивлению, усиливался и измерялся микроамперметром. Это давало возможность оценить ток с подложки и судить о том, какая доля в электризации

аэрозольного облака обусловлена контактами частиц распыливаемого вещества с подложкой, а какая часть — контактами частиц друг с другом. Этой же цели служила также часть опытов, проведенных с однородными материалами.

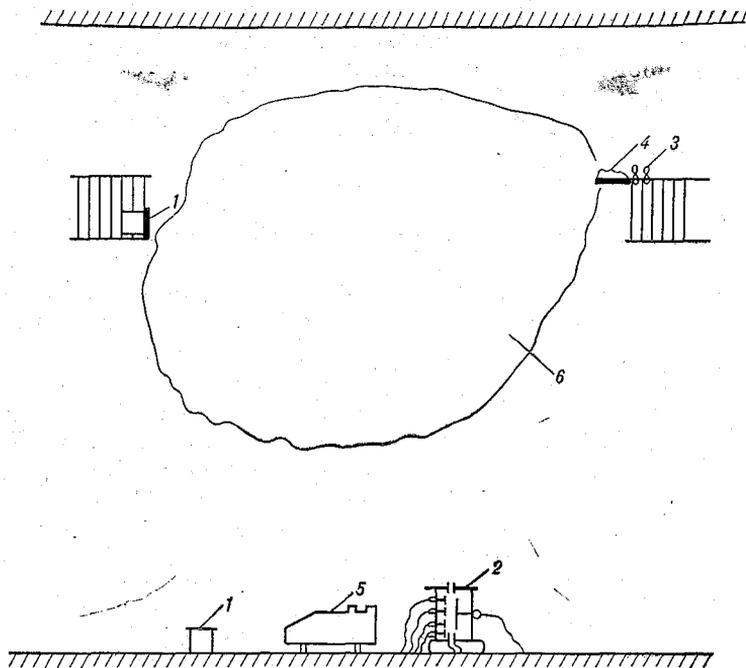


Рис. 1. Схема расположения приборов при проведении опытов.
 1 — приборы для измерения напряженности электрического поля, 2 — заряд-спектрометр, 3 — распылитель, 4 — подложка с порошком, 5 — прибор для измерения зарядов частиц, 6 — облако аэрозоля.

Напряженность электрического поля в аэрозольном облаке измерялась двумя приборами для измерения напряженности поля (ПНП) [2], расположенными на разных уровнях: один на балконе, а другой на полу — так что нижний прибор регистрировал вертикальную составляющую, а верхний — горизонтальную.

Такое расположение приборов позволяло определять, были ли облака аэрозоля заряжены одним знаком или были биполярными.

Время распыла обычно примерно 100 с, т. е. заведомо меньше времени релаксации заряда в атмосфере. Это дает основание считать, что наблюдаемые эффекты заряжения аэрозольного облака связаны контактной электризацией частиц при распыливании и с последующим разделением разноименно заряженных частиц в пространстве. На полу в центре зала располагался прибор для измерения зарядов отдельных частиц и заряд-спектрометр [2],

с помощью которых можно судить о величине заряда отдельных аэрозольных частиц.

Основные результаты всех проведенных опытов даны в табл. 1 и сводятся к следующим:

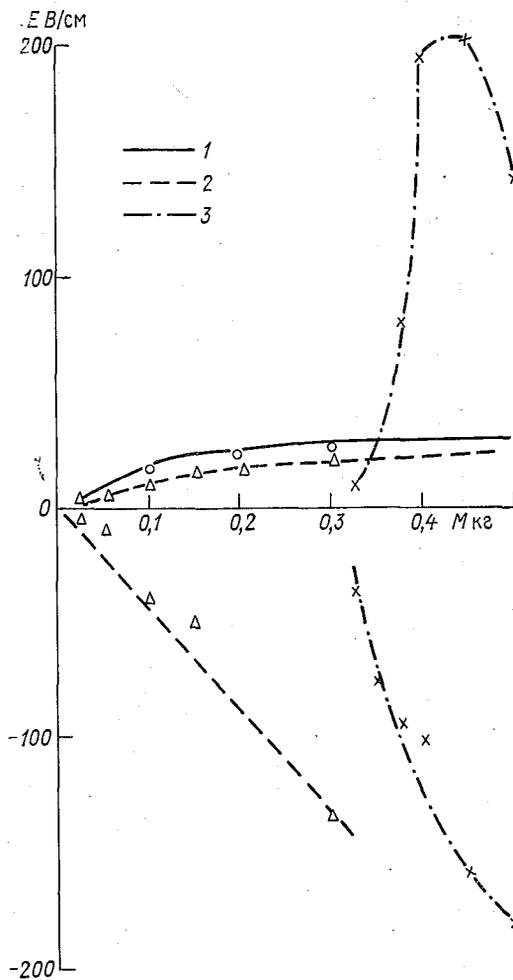


Рис. 2. Зависимость электризации аэрозольного облака от количества распыленного вещества.

1 — мука, 2 — тальк, 3 — смесь 300 г муки с различными добавлениями талька.

— даже чистые порошки при распыливании значительно электризуются, создавая в камере объемный заряд, за счет которого напряженность поля может достигать нескольких десятков В/см;

— для чистых порошков, при увеличении количества распыливаемого вещества общая электризация объема растет. Для сме-

Основные результаты опытов по исследованию электризации аэрозольных облаков

Дата	Серия	№ опыта	Тип распыливания	Распыливаемый материал			Измеренные экстремальные значения напряженности электрического поля $E \cdot 10^3$ В/м		Рассчитанное значение общего заряда $q \cdot 10^{-7}$ Кл	
				1-я компонента	2-я компонента	количество, г	нижним прибором от	верхним прибором до	по среднему току с погрешкой	по экстремальной напряженности поля аэрозольного облака, измеренной нижним прибором, при среднем радиусе облака 2 м
3/ХІІ 1976 г.	1	1	Однокомпонентный порошок	Мука		50	0	8	+4	3
		100				0	18	+5	8	
		200				0	22	+6	8	
		300				0	25	+7	10	
		500				0	30	+10	12	
2		6	Однокомпонентный порошок	Тальк	25	0	5	-2	-4	
		50			2	10	-3	8		
		100			4	40	-5	16		
		150			5	50	-10	20		
		200			10	70	-13	28		
		300			20	135	-30	55		
3		12	Смесь	Мука	300	10	35	+2,5	4;	
		300			80	70	+4	-16;		
		300			30	90	+20	30;		
		300			195	100	+40	-30;		
		300			200	170	+80;	12;		
		300			140	180	+22	80;		
		300			200	200	+30	80;		
4		18	Однокомпонентный порошок	Крахмал	100	0	10	+2	4	
		200			0	35	+16	15		
		300			0	70	+20	30		
		300			0	70	+20	30		
5		21	Смесь	Мука	300	10	30	+11	4;	
		300			25	45	+12	10;		
		300			30	50	+9	12;		
		300			30	50	+9	20		

18/II 1977 г.	6	С разных подлежек	Мука	200 300 300 300	Мука Тальк	200 300 100 200	5 0 (-15) (-30)	30 50 40 20	2 0 2 1	5 27 4 4
14/VII 1977 г.	7	Одноком- понент- ный порошок	Цемент	200 400 600 800			10 11 22 25	-3 -15 -20 -30	2 0 0 0	7 -20 -27 -20
15/VII 1977 г.	8	То же	Мел	200 400 600 800			0 0 12 10	6 8 0 0	0 8 3 5	15 3 3 5
	9	То же	Але- бастр	200 400 600 800			2 0 5 15	4 6 -6 -3	1 3 5 4	6 12 24 28
18/VII 1977 г.	10	Одноком- понент- ный порошок	Сурик	200 400 600 800			0 0 (-15) (-10)	11 12 23	0 2 10 15	8 17 29 35
	11	Смесь	Цемент	500 500 500 500	Мел	100 200 300 500	0 -20 -20 -20	-25 -10 -20 -20	0 -6 -6 -5	7 10 11 11
	12	Смесь	Цемент	500 500 500 500	Сурик	50 100 200 300	5 10 2 2	6 -10 -11 -3	0 6 -6 -9	5 8 13 13
	13	Смесь	Цемент	500 500	Але- бастр	100 200	4 -20	-55 -55	0 -4	9 15
	14	Смесь	Але- бастр	500	Сурик	100	0	-21	-1	20
	15	Смесь	Мел	500	Сурик	100	0	-15		

сей порошков по мере увеличения навески 2-й компоненты наблюдались случаи, когда электризация сначала росла, а затем уменьшалась. Скорость распыления предполагается постоянной. Зависимость электризации аэрозольного облака от количества распыленного вещества изображена на рис. 2;

— можно подобрать такие присадки к основному веществу аэрозольного облака, которые могут существенно изменить общую электризацию аэрозольного облака. Например, даже небольшие добавки талька к муке увеличивают объемный заряд облака почти на порядок. В некоторых случаях добавление присадки снижало общую электризацию аэрозольного облака (например, при добавлении мела в цемент);

— присадки, лишь в определенной пропорции с основным веществом, увеличивают общую электризацию объема аэрозольного облака. При нарушении оптимальной пропорции электризация объема облака может уменьшаться, возможно до тех пор, пока эффект не поменяет знак;

— измерения тока с подложки указывают, что при распыливании чистых порошков при малых навесках основная электризация идет за счет контакта с подложкой. При увеличении количества распыливаемого вещества доля частиц, заряженных за счет контактов друг с другом, растет. При распыливании смесей превалирующую роль играет электризация за счет контактирования частиц друг с другом.

Показания верхнего и нижнего приборов для измерения напряженности электрического поля в некоторых случаях подобны друг другу с небольшим сдвигом во времени (например, при распыливании муки). Это свидетельствует о простой электрической структуре аэрозольного облака — зарядении всего объема одним знаком электричества, а также о том, что временные изменения в нем связаны в основном с седиментацией частиц под влиянием силы тяжести. В этих случаях для проведения оценочных расчетов с достаточным основанием можно интерпретировать облако однородно заряженным шаром (цилиндром).

При распыливании легких порошков (тальк, сурик) легкая фракция облака держалась в воздухе довольно долго. Рассасывание такого облака происходит очень медленно, иногда и через 30 мин после окончания распыливания в камере наблюдались электрические поля значительной напряженности. При распыливании даже таких однокомпонентных облаков наблюдались биполярно заряженные аэрозольные облака.

Показания верхнего и нижнего датчиков прибора напряженности поля существенно различались. Рассасывание зарядов облака очевидно происходило за счет не только оседания под действием силы тяжести, но и оседания на стены камеры, а также под влиянием проводимости воздуха.

Измерения с помощью прибора для измерения зарядов частиц свидетельствуют о расширении спектра зарядов частиц в случае распыливания смеси порошков по сравнению со спектрами заря-

дов, образующихся на частицах в случае распыливания чистых порошков (рис. 3):

— зависимость заряда частиц от радиуса (для $2 \text{ мкм} \leq r \leq 20 \text{ мкм}$) примерно линейная. Причем коэффициент пропорциональности для смеси больше, чем для чистых веществ. Значения рассчитанных [1] контактных потенциалов ϕ_{12} лежат в пределах 10^{-2} — 10^{-3} В;

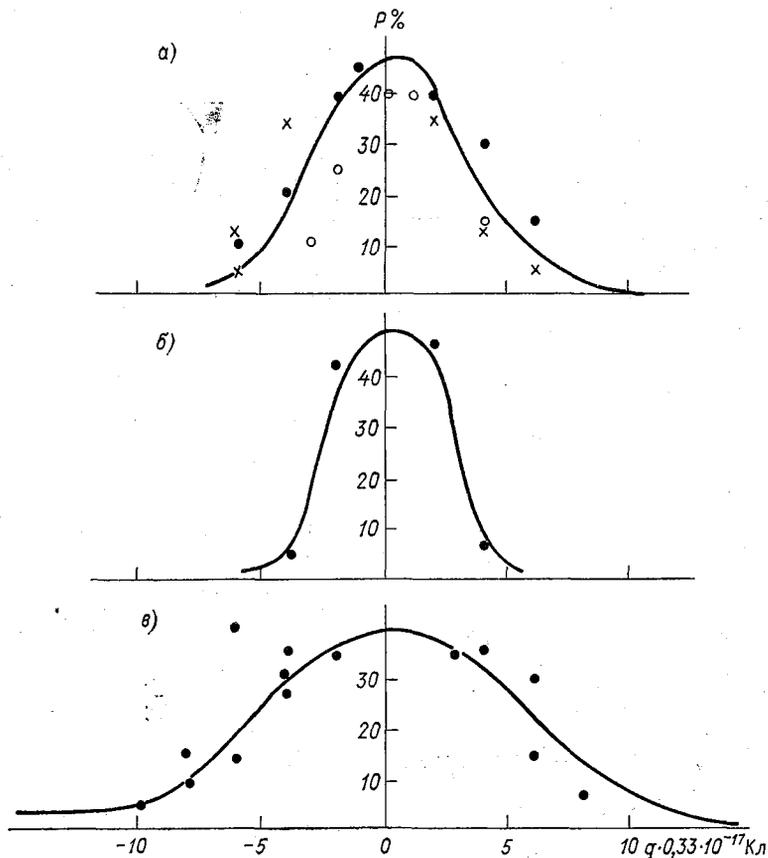


Рис. 3. Спектр зарядов частиц, наблюдаемый с помощью прибора ПЗК [2] при распыливании муки (а), талька (б) и смеси муки с тальком (в).

— измерения зарядов частиц с помощью прибора заряд-спектрометр дают основания считать, что для $r > 20 \text{ мкм}$ зависимость $q(r)$ отличается от линейной и в некоторых случаях (рис. 4) приближается к квадратичной;

— можно с уверенностью констатировать, что если частицам обеспечена возможность контактирования, то механизм контакт-

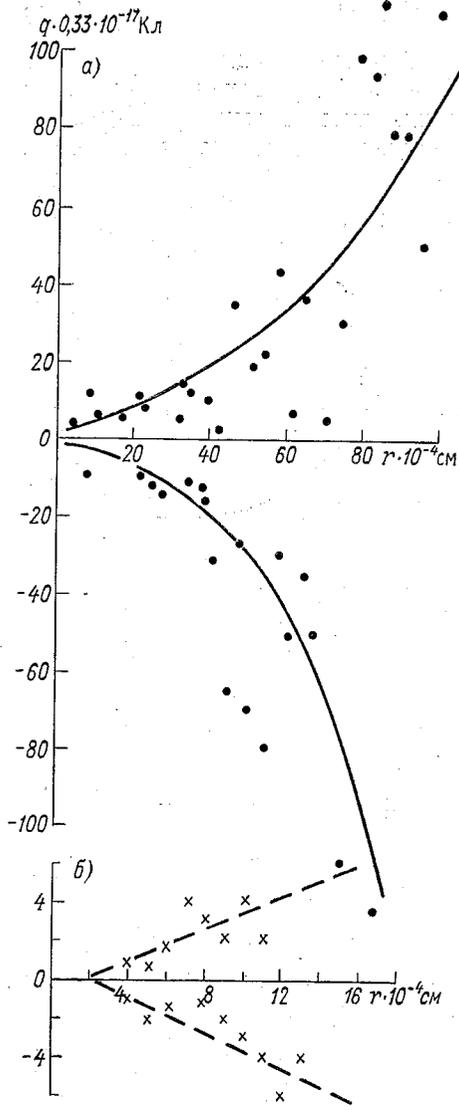


Рис. 4. Зависимость заряжения частиц от радиуса при распыливании цемента по данным заряд-спектрометра (а) и ПЗК (б).

ной электризации частиц может быть эффективным для электризации облаков.

Обсуждение результатов

Принятая схема опытов позволяет выделить основные эффекты, связанные с контактной электризацией частиц. Существенное влияние подложки на электризацию однородных порошков проявляется только для малых навесок, когда на лотке распыла отношение поверхности всей массы порошка к его объему велико. По мере уменьшения этого отношения вклад указанного вторичного эффекта в электризацию аэрозольного облака уменьшается.

Линейная зависимость заряда мелких частиц от радиуса, уменьшение заряжения объема при распылении смесей с большим содержанием второго компонента, величины получаемых зарядов частиц указывают, что в заряжении объема основная роль играет контактная электризация частиц между собой.

Близкая к квадратичной зависимость, полученная для крупных частиц, указывает, что в их электризации играют роль многократные контакты. В наших опытах основная часть этих контактов возникает, как отмечалось выше, еще в массе порошка.

В однокомпонентных облаках преимущественное заряжение крупных частиц одним знаком электричества, а мелких другим может быть приписано и тому, что относительное число дислокаций на единицу массы на поверхности первых меньше, чем у вторых, в отношении квадратов радиусов.

Колоссальное влияние даже небольших количеств примесей как на расширение спектра частиц, так и на величину объемного заряда объясняет связь организованной электризации в облаках с возникновением ледяных кристаллов в них и в первую очередь возникновение электрических неоднородностей в облаках.

Так, для смеси муки и талька, имеющей разность электрохимических потенциалов между частицами, меньшую той, которая возникает при контакте частиц воды и льда, концентрации примерно 1 г/м^3 приводят к возникновению в камере полей напряженностью около $2 \cdot 10^4 \text{ В/м}$ (средняя плотность объемного заряда около $0,2 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/м}^3$). Учитывая сказанное выше о критериях подобия, полученные данные можно распространить с естественными оговорками на облака в атмосфере.

Объем облака с такой же плотностью частицы радиусом всего 200 м создал бы поля напряженностью $1,5 \cdot 10^6 \text{ В/м}$ ($\rho = 0,1 \times 10^{-6} \text{ Кл/м}^3$, а заряд облака 1 Кл), характерной для грозового облака. Если учесть возможность возникновения в облаке повторных контактов, а также что процесс электризации в облаке идет в зоне, имеющей радиус $> 1 \text{ км}$, и водность в облаке может превосходить 1 г/м^3 , то можно ожидать, что в смешанном облаке рассмотренный процесс может обеспечить его электризацию. Вопрос скорее стоит в том, что ограничивает этот процесс в облаке и не дает полностью проявиться отмеченным эффектам. Время зарядки некоторого объема в облаках определяется отношением его высоты к относительной скорости падения крупных частиц, т. е. для облака толщиной 1 км должно составлять 150—300 с, т. е. быть близким к наблюдаемому.

В облаках с одной фазой (чисто ледяных или водяных) интенсивность зарядки должна быстро снижаться, что и наблюдается в действительности [3].

Сравнение данных о поле и распределении зарядов показывает, что даже в двухкомпонентных облаках доля заряженных частиц, участвующих в организованной электризации, невелика.

Для учета многократных контактов, специфики взаимодействия жидких частиц, жидких и твердых частиц, частиц сложных форм, характерных для льда и снега, опыты необходимо провести в специальных больших камерах, обеспечивающих необходимые условия, а также в естественных условиях.

Авторы благодарны Г. Ф. Павлюченкову за подготовку аппаратуры и помощь в проведении экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Имянитов И. М. К вопросу об электризации облачных частиц после разрыва контакта между ними.— Труды ГГО, 1969, вып. 242, с. 82—88.
2. Имянитов И. М. Приборы и методы атмосферного электричества. Л., Гостехиздат, 1957.
3. Имянитов И. М., Чубарина Е. В. Электричество свободной атмосферы. Л., Гидрометеониздат, 1965. 240 с.
4. Мордovina Л. С. Электризация слоисто-дождевых облаков в результате взаимодействия частиц между собой.— Труды ГГО, 1974, вып. 323.
5. Мучник В. М. Физика грозы. Л., Гидрометеониздат, 1974. 350 с.

Б. Ф. Евтеев, Н. Т. Маркчев

ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УЧАСТКОВ ПОВЕРХНОСТИ САМОЛЕТА, ОМЫВАЕМЫХ АЭРОЗОЛЬНЫМ ПОТОКОМ

Эксперименты, выполненные в лабораторных условиях и в аэрозольных аэродинамических трубах, позволили установить, что пробные тела из различных диэлектриков или металлов, покрытых непроводящими лаками или красками, заряжаются значительно сильнее, чем чисто металлические [2—4, 10—12]. Поскольку в самолетостроении для изготовления несущих элементов конструкции все шире применяются различные композиционные (на основе диэлектриков) материалы, представляется необходимым изучить особенности электризации реальных диэлектрических конструкций самолета в естественных условиях и оценить ее возможные последствия.

Ранее было известно, что во время полета в облаках происходит интенсивная электризация стекол кабины пилотов. Исследования этого явления показали, что электризация стекол вызывает их электрический пробой, при котором выходят из строя устройства электрообогрева, растрескивание, а иногда и полное разрушение стекол [13].

Многие современные самолеты, кроме остекления кабин, имеют и другие неметаллические участки лобовых поверхностей, в частности значительные по размерам радиопрозрачные обтекатели антенн. И хотя по имеющимся сведениям [8, с. 98] для предотвращения их электризации применяются антистатические покрытия, нет оснований полагать, что эта мера может оказаться хоть сколько-нибудь эффективной, поскольку на эти покрытия наносится декоративная окраска.

Величину разделяемого заряда в значительной степени определяют поверхностные свойства твердого тела, с которым контактируют набегающие частички облаков и осадков. Из анализа случаев поражения самолетов гражданской авиации электрическими разрядами следует, что вероятность разряда в диэлектрический обтекатель самолета много выше, чем следовало бы этого ожи-

дать, исходя из оценки, основанной на учете геометрии самолета как проводящего тела. Действительно, данные о распределении точек поражения разрядом самолетов Ил-62, Ил-18, Ан-24, приведенные в работе [9], показывают, что для указанных типов самолетов процент ударов в обтекатель и крыло составляют 30 и 14, 35 и 5, 26 и 3 соответственно. В то же время, как видно из распределения заряда по поверхности цельнометаллической модели самолета Ил-18, напряженность электрического поля на законцовке крыла примерно в четыре раза выше, чем в носовой части самолета [6]. Таким образом, в случае цельнометаллического самолета вероятность разряда в крыло должна быть выше, чем в носовую часть. Отмеченное различие может быть связано с тем, что электризация носового обтекателя в действительности настолько велика, что именно поверхностный заряд обтекателя определяет напряженность электрического поля в его окрестности и создает благоприятные условия для развития стримера с этой части самолета, увеличивая тем самым вероятность поражения ее разрядом.

Измерения заряжения диэлектрических обтекателей в различных метеорологических условиях были проведены на самолете-лаборатории Ан-24. Самолет этого типа имеет два обтекателя — носовой и килевой. Заряды на каждом из них измерялись с помощью электростатических флюксметров, схема размещения которых показана на рис. 1. Поскольку материал обтекателя не явля-

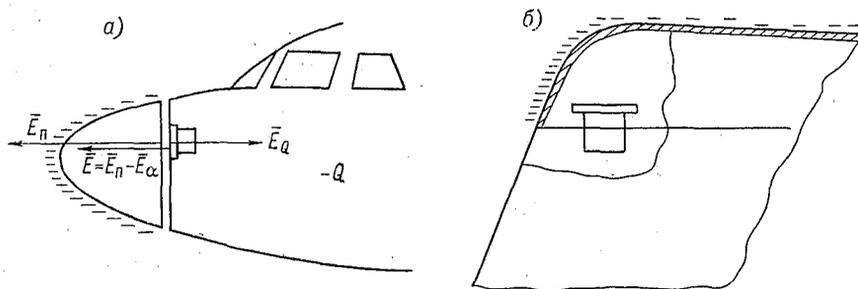


Рис. 1. Размещение датчиков ПНП под передним (а) и килевым (б) обтекателями антенн самолета Ан-24

ется проводящим, электрическое поле, обусловленное зарядами на его поверхности, будет существовать и внутри обтекателя. Если поверхность обтекателя при полете в облаках заряжалась бы крайне слабо, то на датчик, расположенный под обтекателем, воздействовало бы только электрическое поле заряженного самолета. В случае интенсивного заряжения обтекателя электрическое поле под ним будет зависеть как от заряда на его поверхности, так и от заряда самолета. Отметим, что такой способ измерений позволяет определить только некоторое среднее для всей поверхности значе-

ние заряда. Плотности заряда в отдельных точках и особенно в зоне захвата могут существенно отличаться от средней.

Во время измерений условительно считать, что отрицательный заряд самолета создает положительное электрическое поле, воздействующее на датчик. Таким образом, при слабом зарядении обтекателей датчики под ними должны указывать на присутствие положительного электрического поля. В случае интенсивного отрицательного зарядения обтекателя и самолета на соответствующие датчики будут воздействовать два электрических поля, от соотношения напряженностей которых в месте установки датчиков будут зависеть показания каждого из них.

Самолет-лаборатория Ан-24, на котором велись измерения зарядения обтекателей, был оборудован стандартным комплектом измерительной аппаратуры для исследования его электризации [7], и сигналы датчиков, размещенных под обтекателями, регистрировались синхронно с сигналами, пропорциональными заряду самолета.

Градуировка, позволившая связать напряженность электрического поля, воздействующего на датчик поля, со средним по поверхности потенциалом обтекателя по отношению к корпусу самолета, выполнялась следующим образом. На наружную поверхность обтекателя накладывалась тонкая металлическая фольга, и на нее от высоковольтного источника подавалось напряжение. Другой полюс выпрямителя соединялся с корпусом самолета (т. е. практически заземлялся). Таким образом, между фольгой — поверхностью обтекателя — и фюзеляжем самолета создавалось электрическое поле, которое измерялось соответствующим датчиком поля. Диапазон измеряемых разностей потенциалов «обтекатель-самолет» для носового обтекателя составлял ± 400 кВ, для килевого ± 250 кВ.

Перейдем к рассмотрению результатов измерений. При полете в чистой от облаков атмосфере самолет обычно имеет некоторый отрицательный заряд, обусловленный заряжающим действием выхлопных газов двигателей [5]. При этом датчики под обтекателями регистрировали небольшое положительное электрическое поле отрицательно заряженного самолета.

В момент входа в облако самолет заряжался отрицательно. Одновременно с этим происходило изменение величины и направления электрического поля, регистрируемого датчиками под обтекателями. Во всех без исключения случаях после входа самолета в облако передний и килевый датчики регистрировали отрицательное электрическое поле, несмотря на возрастание отрицательного заряда самолета. Это убедительно свидетельствовало о том, что в облаке обтекатели заряжались отрицательно.

Благодаря весьма интенсивному зарядению обтекателей потенциал их поверхности отличался от потенциала самолета на несколько десятков киловольт (рис. 2). Изменения заряда самолета и заряда на обтекателях происходили достаточно синхронно, что свидетельствовало о том, что ток, заряжавший самолет и обтека-

тели, создавался благодаря контактным явлениям между частицами облаков и их поверхностью. Некоторый сдвиг характерных точек (максимумов и минимумов) линий записи 0 и $E_{\text{п}}$, по-видимому, связан с различными условиями разрядки самолета и обтекателя, а также тем обстоятельством, что к изменению заряда на обтекателе могут приводить более мелкомасштабные зоны неоднородностей облака, влияние которых на заряд самолета осредняется его достаточно большими размерами.

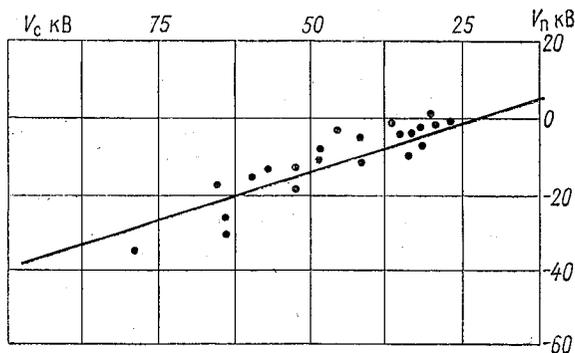


Рис. 2. Связь между потенциалом самолета V_c относительно окружающей среды и потенциалом обтекателя антенны V_p РЛС самолета Ан-24 относительно корпуса самолета. Измерения велись в слоисто-дождевых облаках, $H = 3600$ м, $v = 125$ м/с.

Резкие скачки линии записи сигналов датчиков под обтекателями, иногда наблюдавшиеся на осциллографной ленте, указывают на существование электрических разрядов между поверхностью обтекателя и самолетом. При таких разрядах резко уменьшается заряд на обтекателе (или только часть его). Чем плотнее было облако (т. е. чем больше был ток зарядки, текущий на данную поверхность), тем чаще происходили такие разряды (рис. 3).

Как следует из полученных материалов, в плотных зонах облаков типа N_s измеренная разность потенциалов между самолетом и передним обтекателем достигала 70 кВ.

Наиболее интенсивное заряджение килевого обтекателя наблюдалось в кристаллических облаках. Когда потенциал его достигал величины $U = 36$ кВ, происходил поверхностный пробой между обтекателем и самолетом, приводивший к снижению разности потенциалов обтекатель-самолет. При пробое спад сигнала датчика происходил не до нуля, а до конечного значения, причем это значение было непостоянным. По-видимому, разряд происходил в различных точках поверхности обтекателя, по-разному удаленных от датчика поля, и при этом нейтрализовались заряды различной величины. Чем больше был ток зарядки, текущий на самолет, тем

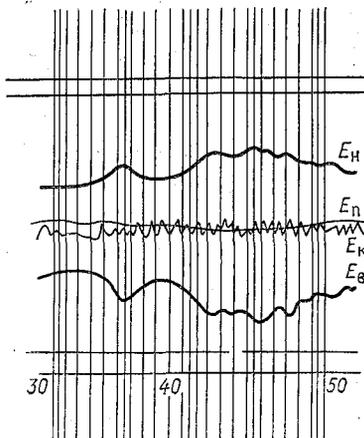


Рис. 3. Копия осциллограммы записей сигналов датчиков ПНП, расположенных под передним (E_n) и килевым (E_k) обтекателями, а также датчиков, расположенных сверху (E_b) и снизу (E_n) фюзеляжа самолета, позволяющих измерить заряд самолета.

чаще происходили разряды на поверхности обтекателя, т. е. при большем токе заряжения на поверхности обтекателя быстрее накапливались заряды и потенциал ее быстрее достигал пробивных значений.

Таким образом, и в летном эксперименте удалось установить, что поверхности самолета, выполненные из диэлектрика и имеющие лакокрасочное покрытие, подвергаются интенсивной электризации. На их поверхности существуют электрические разряды, благодаря которым повышается ионизация окружающей обтекатель среды и создаются условия, способствующие развитию стриммерного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базелян Э. М., Горин Б. Н., Левитов В. И. Физические и инженерные основы молниезащиты. Л., Гидрометеоиздат, 1978. 218 с.
2. Бекряев В. И., Качурин Л. Г., Псаломщиков В. Ф. Электризация тел в потоке аэрозоля.— Труды ЛГМИ, 1972, вып. 45, с. 3—18.
3. Данилов Ю. И. и др. К исследованию электризации тел в аэрозольных потоках.— Труды ГГО, 1977, вып. 350, с. 101—111.
4. Данилов Ю. И. и др. Экспериментальные исследования влияния лакокрасочных покрытий на степень электризации тел в аэрозольном потоке.— Труды ГосНИИГА, 1977, вып. 141, с. 64—68.
5. Евтеев Б. Ф., Маркчев Н. Т. О зарядении самолета, связанном с работой его двигателей.— Труды ГГО, 1977, вып. 350, с. 116—120.
6. Имянитов И. М. Электризация самолетов в облаках и осадках. Л., Гидрометеоиздат, 1970, 211 с.
7. Имянитов И. М. и др. Исследования статистической электризации самолетов.— Труды ГГО, 1968, вып. 225, с. 106—116.
8. Пригода Б. А., Кокунько В. С. Обтекатели антенн летательных аппаратов.— М., «Машиностроение», 1970. 288 с.
9. Трунов О. К. Об условиях поражений транспортных самолетов атмосферным электричеством и некоторых общих требованиях к противомолниевой защите.— Труды ГосНИИГА, 1976, вып. 124, с. 3—19.
10. Iribarne T. V., Klemes M. Electrification associated with droplet production from liquid jets.— J. Chem. Soc. Faraday Trans., 1974, P. 1, vol. 70, N 7, p. 1219—1227.
11. Levin Z., Hobbs P. V. Splashing of water drops on solid and wetted surfaces: hydrodynamics and charge separation.— Phil. Trans. Roy. Soc. London, 1971, vol. 269, A 1200, p. 555—585.
12. Maxwell T. B., Iribarne T. V. Charge saturation in splashing of large drops on solid sphere.— J. Chem. Soc. Faraday Trans., 1975, P 1, vol. 71, N 5, p. 1033—1040.
13. Sharp P. J. Static electrification of electrically heated aircraft windcreens.— Aircraft Engineering, 1969, N 6, p. 16—31.

*Ю. И. Данилов, Б. Ф. Евтеев, Р. Р. Казак,
А. А. Капранс, Я. В. Селвилян*

ЗАРЯЖЕНИЕ ПРОБНЫХ ТЕЛ С РАЗЛИЧНЫМИ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИМИ ПОКРЫТИЯМИ ПОВЕРХНОСТИ

С увеличением поверхностной проводимости тела уменьшается дебаевский радиус экранирования в электролите, контактирующем с этим телом, благодаря усилению эффекта сил отображения действующих на ионы в растворе. При этом уменьшается электрокинетический потенциал и должна уменьшаться электризация тела. Последнее было проверено в опытах в аэродинамической трубе.

На металлическое (дюралевое) и диэлектрическое (текстолит) пробные тела диаметром 60 мм наносились покрытия, обладающие различной поверхностной проводимостью. Покрытие представляло собой двухкомпонентную гетерогенную систему, состоящую из полимерного связующего на основе полиамидимидного лака и электропроводящих наполнителей. Лак в чистом виде при температуре пленкообразования 120°C представлял собой органический диэлектрик амфорной структуры с удельным сопротивлением 10^{15} — 10^{16} Ом·см. Наполнителями системы были либо сажа ПМ-30, либо графит С-1, представляющие собой мелкодисперсные порошки с полупроводниковым характером проводимости. Удельное сопротивление сажи ПМ-30 и графита С-1 (порошков) равно $0,5$ Ом·см при $t=23^{\circ}\text{C}$.

При увеличении концентрации наполнителя в системе происходит формирование токопроводящих каналов. Электрическое сопротивление покрытия является функцией концентрации и размеров частиц наполнителя. Предполагают, что такие системы обладают электронной проводимостью в широком интервале концентраций наполнителя.

Сотрудником МИИГА В. М. Засимовым [5] были приготовлены и нанесены на пробные тела различные по составу и концентрации слабопроводящие покрытия, электризация которых исследовалась по принятой методике [3]. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Видно, что заряджение практически полностью определяется свойствами поверхности, а не подложки. С увеличением сопро-

Равновесные потенциалы U (В) пробных тел с различными покрытиями, приобретаемые в потоке капель с $\omega = 1 \text{ г/м}^3$ и $d = 18 \text{ мкм}$ из водопроводной воды. Данные о зарядении пробных тел с эмалевым покрытием заимствованы из [4]

Вид покрытия	Материал пробного тела	Сопротивление 1 см поверхности, Ом	Скорость, м/с		
			48	68	92
Сажа 30%	металл	10^8	7,5	10,5	12,5
Сажа 15%	металл	$(30 \div 40) \cdot 10^8$	18	— 4	— 21
Сажа 15%	диэлектрик	10^{10}	— 24	— 40	— 69
Сажа 30%	металл	10^8	23	8,5	0
Графит 50%	диэлектрик	10^8	— 52	— 98	— 142
Сажа 40%	диэлектрик	10^8	1	— 1,5	— 2,5
Сажа 40%	металл	$2 \cdot 10^8$	3,5	3	1,5
Эмаль АС-1115 белая	металл		—	— 160	— 310
Эмаль ХВ-ВС сероголубая	металл		—	— 158	— 400
Эмаль ЭП-140 сероголубая	металл		—	— 300	—
Лак АС-16 на лаке АК-113 (прозрачный лак)	металл		—	— 220	— 590
Текстолит			— 250	— 330	— 850

тивления поверхности наблюдается более интенсивное зарядение при однотипном материале покрытия пробного тела.

Для сравнения в последней строке таблицы приведены значения равновесного потенциала пробного тела из текстолита. Видно, что нанесение даже слабопроводящего покрытия (строки 3 и 5) резко уменьшает зарядение тела.

Наблюдаемые эффекты качественно согласуются с известными закономерностями электрокинетических явлений [1, 2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григоров О. Н. и др. Электрокинетические свойства капиллярных систем. М.—Л., Изд. АН СССР, 1956. 352 с.
2. Дамаскип Б. Б., Петрий О. А. Введение в электрохимическую кинетику. М., «Высшая школа», 1975. 416 с.
3. Данилов Ю. И. и др. К исследованию электризации тел в аэрозольных потоках.— Труды ГГО, 1977, вып. 350, с. 101—111.
4. Данилов Ю. И. и др. Экспериментальные исследования влияния лакокрасочных покрытий на степень электризации тел в аэрозольном потоке.— Труды ГосНИИГА, 1977, вып. 141, с. 64—68.
5. Засимов В. М., Голубева М. Г., Чепурин А. Н. Об электростатическом зарядении антистатических полимерных покрытий в аэрозольном потоке.— Наука и техника. Сер. Летательные аппараты и двигатели, 1977, № 2, с. 5—9.

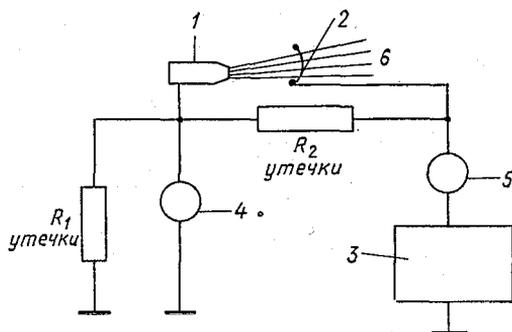
Ю. И. Данилов, В. И. Доценко, Б. Ф. Евтеев,
Р. Р. Казак, А. А. Капранс, Я. В. Селвилян

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАРЯДА КАПЕЛЬ НА ЭЛЕКТРИЗАЦИЮ ТЕЛА В ИХ ПОТОКЕ

Ранее было сделано предположение, что изменение знака заряда тела, находящегося в потоке капель, при увеличении скорости этого потока связано с изменением вкладов в зарядку тела двух факторов, обуславливающих его электризацию: зарядку за счет захвата заряженных капель и зарядку за счет разделения зарядов при отрыве фрагментов налетающих капель [1]. Чтобы убедиться в том, что с ростом скорости благодаря увеличению концентрации отрывающихся более мелких капель влияние заряда налетающих капель действительно уменьшается, был поставлен опыт.

Рис. 1. Схема подзарядки частиц аэрозольного потока и измерения силы тока, создаваемого форсунками, и тока утечки.

1 — форсунка; 2 — система проводов, индуцирующих заряды на каплях, вылетающих из форсунок; 3 — источник высокого напряжения (ВС 10-22); 4, 5 — измерители тока; 6 — поток капель



Индукционным методом (рис. 1) заряжался поток капель, образуемых при распылении воды форсунками. Для этого перед системой пневмоэжекторных форсунок был натянут ряд хорошо изолированных проводов 2. Сами форсунки также были изолированы, но заземлены через измерительный прибор 4. Сопротивление их изоляции R_1 было примерно 200 кОм. На систему проводов

с помощью высоковольтного источника 3 типа ВС 10-22 подавалось высокое напряжение, которое могло меняться в пределах от $-3,8$ до $+3,8$ кВ. Этим обеспечивалось создание электрического поля между системой изолированных проводов и форсунками. Измерительным прибором 4 измерялась сила тока, создаваемого каплями, отрывающимися от форсунок. Токи утечки, обусловленные конечным сопротивлением изоляции R_2 системы проводов, измерялись с помощью измерительного прибора 5, включенного в цепь между источником высокого напряжения ВС 10—22 и системой проводов, и вычитались при обработке результатов наблюдения из показаний прибора 4.

Измерения проводились по методике, описанной в [2]. Пробным телом служила модель крыла. Модель была надежно изолирована, так что сопротивление ее утечки было порядка 10^9 Ом. Сила тока зарядки измерялась по падению напряжения на калиброванном сопротивлении нагрузки $R=10^5$ Ом с помощью микровольтметра.

В ходе эксперимента определялась зависимость силы тока, текущего на модель крыла, как от свойств аэрозольного потока (скорости v , дисперсности каплей потока d_n , водности ω), так и от заряженности частиц потока. Параметры потока менялись в следующих пределах:

скорость v от 40 до 125 м/с;
водность ω от 0,3 до 1,0 г/м³;
диаметр d_n от 18 до 30 мкм.

На систему проводов подавались напряжения 0; ± 2 ; $\pm 3,8$ кВ.

Зависимость тока, заряжающего модель крыла, от скорости аэрозольного потока при различных значениях напряжения, подаваемого на систему проводов, показана на рис. 2. Увеличение напряжения на проводах равносильно увеличению заряда капель потока, существенно влияет на характер зависимости заряда тела от скорости, что находится в полном согласии с изложенным ранее [1].

Изменения соотношения токов, обусловленных захватом заряженных частиц и контактной электризацией, с изменением скорости также показаны на рис. 2.

Мерой вклада тока зарядки за счет захвата набегающих заряженных капель в общий заряжающий тело ток может служить отношение $0,5\Delta I/I_{U=0}$. Здесь $I_{U=0}$ — значение измеренного тока, текущего на тело при $U=0$; $0,5\Delta I$ — половина разности токов, текущих на тело при данной скорости и двух фиксированных для данных опытов напряжениях $U=\pm 3,8$ кВ и $U=\pm 2,0$ кВ.

Как видно из рис. 2, с увеличением скорости потока и сопутствующего ему роста дробления набегающих капель вклад тока, зависящего от контактной электризации, в общий ток зарядки резко возрастает, и, если на малых скоростях потока электризация тела в основном зависит от заряда капель потока, то при увеличении скорости зарядка будет определяться током контактной электризации.

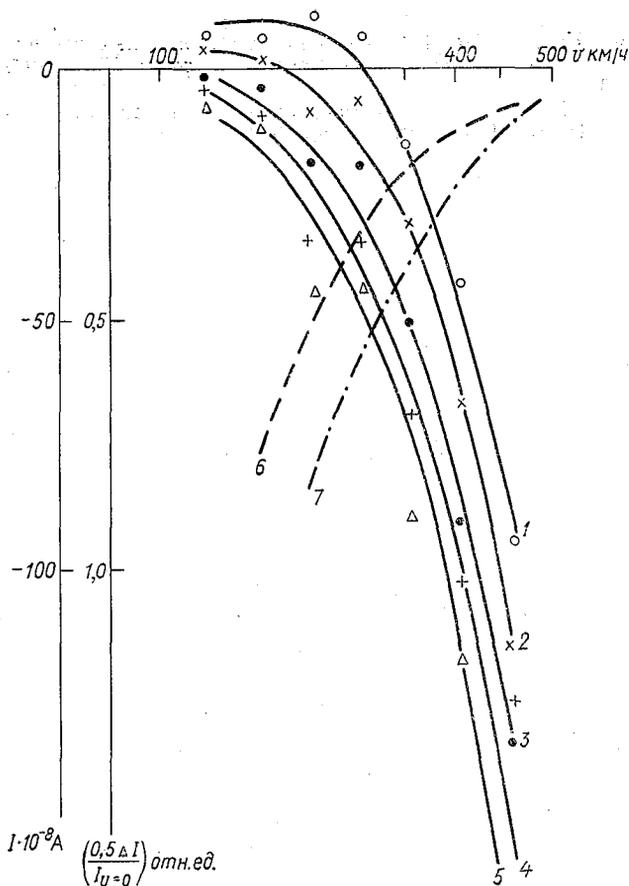


Рис. 2. Зависимость силы тока, текущего на модель крыла в аэрозольном потоке, при различных значениях потенциала системы проводов (1—5) и относительный вклад тока за счет захвата заряженных частиц в общий ток электризации тела (6, 7).
 1) $U=3,8$ кВ; 2) $U=-2,0$ кВ; 3) $U=0$; 4) $U=+2,0$ кВ;
 5) $U=+3,8$ кВ; 6) $U=+2,0$ кВ; 7) $U=+3,8$ кВ.

Максимальные заряды, которые удавалось сообщать каплям в этих экспериментах, составляли $\pm 10^{-14}$ Кл и были определены путем расчета по формуле

$$q_n = \frac{4\pi\rho_B I r_n^3}{3vS_T\omega},$$

где I — максимальный ток, показанный прибором 4 (рис. 1), ω — заданная водность потока, v — заданная скорость потока, r_n — размер капель, создаваемых форсунками, S_T — сечение рабочей части трубы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов Ю. И. и др. Влияние зарядов аэрозольных частиц на электризацию тела, находящегося в их потоке.—Труды ГГО, 1977, вып. 350, с. 96—100.
2. Данилов Ю. И. и др. К исследованию электризации тел в аэрозольных потоках.—Труды ГГО, 1977, вып. 350, с. 101—111.

*Ю. И. Данилов, В. И. Доценко, Б. Ф. Евтеев,
Р. Р. Казак, А. А. Капранс, Я. В. Селвилян*

К МЕТОДУ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ САМОЛЕТОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

При полетах самолетов в облаках и осадках происходит их заряджение, причем приобретаемые ими заряды зависят как от свойств среды, так и от характеристик самолетов, и в частности от материала их наружного покрытия. Анализ работ, посвященных исследованию электризации тел с различными покрытиями, показал, что покрытия оказывают существенное влияние на величину приобретаемых телами зарядов, причем покрытия изменяют и знак заряда [1, 3—6]. Поэтому представляется целесообразным исследование закономерностей электризации наружных лакокрасочных покрытий самолетов с целью оценки их влияния на электризацию самолетов при их полетах в сложных метеоусловиях (туман, облачность и др.).

В летных испытаниях практически невозможно разделить влияние многочисленных факторов на статическую электризацию самолетов. В частности, технические трудности осуществления непрерывного контроля в условиях летных испытаний свойств среды (водности и дисперсности облаков) не позволяют перейти к определенным количественным соотношениям между характеристиками среды и параметрами, характеризующими электризацию — заряжающим самолет электрическим током и равновесным потенциалом.

Оценку статической электризации наружных лакокрасочных покрытий самолетов гражданской авиации предлагается производить в лабораторных условиях — в аэродинамической трубе, позволяющей получать контролируемый жидкокапельный аэрозольный поток заданных свойств.

Для определения интенсивности электризации покрытий используется метод сравнения электризации окрашенных поверхностей с электризацией неокрашенной дюралевой поверхности. Для получения сравнительных характеристик электризации раз-

личных лакокрасочных покрытий должны быть выполнены следующие требования:

— для исключения влияния на электризацию формы и размеров тела все испытания должны проводиться на моделях единой формы и размеров;

— каждая из окрашенных моделей должна проходить испытания при одинаковых условиях по скорости, водности и среднеэффективному диаметру капель в спектре;

— испытания должны проводиться при условиях, максимально приближенных к летным.

Для реализации вышеперечисленных требований исследования статической электризации наружных покрытий летательных аппаратов гражданской авиации проводились в аэродинамической трубе Т-4 на модели крыла с постоянным по ее размаху профилем С-3 (длина модели 1015 мм, хорда 374 мм, поверхность модели $0,7724 \text{ м}^2$) с имитацией условий полета в жидкокапельных аэрозольных облаках. Для этой цели в аэродинамической трубе с помощью специальной распылительной установки на базе пневмоэжекторных форсунок создавался аэрозольный поток, соответствующий по своим основным параметрам микрофизическим характеристикам естественных облаков. Из статистических данных по исследованию микроструктуры жидкокапельных облаков различных видов следует, что их водность находится в пределах $0,2—1,0 \text{ г/м}^3$, а среднеэффективный диаметр капель в спектре составляет $10—30 \text{ мкм}$ [2]. Распылительная установка аэродинамической трубы Т-4 позволяет получать аэрозольный поток с указанными выше диапазонами изменения параметров по водности и размерам капель в спектре. Для создания аэрозольного потока использовалась дистиллированная вода, основные физико-химические характеристики которой (водородный показатель, электропроводность) близки с таковыми для жидкокапельных облаков.

Как известно [6], наибольшее заряджение самолетов в облаках возникает в интервале высот $1000—5000 \text{ м}$. Современные самолеты гражданской авиации пролетают эти высоты в основном режиме набора высоты или при снижении. Аэродинамическая труба Т-4 со вставной рабочей частью позволяет получать скорости аэрозольного потока в рабочей части трубы $200—500 \text{ км/ч}$, что практически перекрывает весь диапазон скоростей отрыва, набора высоты и снижения самолетов, эксплуатируемых в гражданской авиации. Таким образом, при исследовании электризации лакокрасочных покрытий самолетов в аэродинамической трубе имитируются условия полетов по скорости, водности и среднеэффективному диаметру капель в спектре.

Основными параметрами, характеризующими процесс электризации тел в аэрозольном потоке, являются равновесный потенциал, приобретаемый изолированным телом, сила тока, генерируемого на поверхности тела при его контакте с аэрозольными частицами, и время релаксации процесса заряджения.

При исследовании электризации моделей крыльев, имеющих различные лакокрасочные покрытия, определялась сила тока, генерируемого на поверхности модели в результате взаимодействия с аэрозольными частицами. Для измерения силы тока, текущего на модели крыльев, применялся вольтфарадоомметр P-385 с входным сопротивлением $5 \cdot 10^8$ Ом и классом точности 0,06/0,02, на входе которого было нагрузочное сопротивление $R = 10^5$ Ом (рис. 1). Исследуемая модель должна быть достаточно хорошо изо-

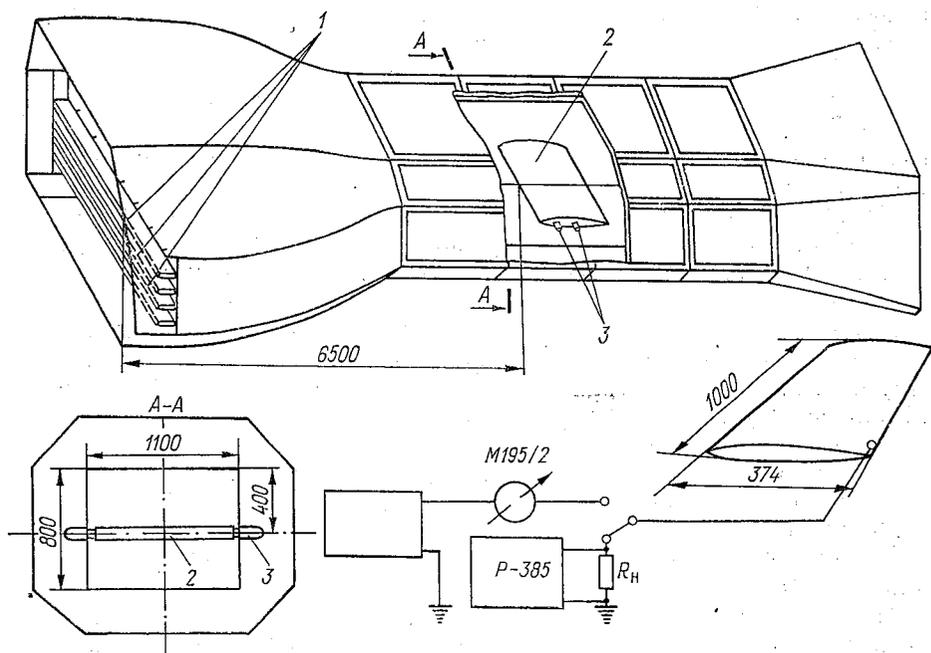


Рис. 1. Схема испытаний электризации лакокрасочных покрытий модели крыла. 1 — распылительные форсунки, 2 — модель крыла, 3 — узлы крепления модели.

лирована от конструкции аэродинамической трубы; это необходимо для того, чтобы весь ток, генерируемый аэрозольными частицами на модели, тек через нагрузочное сопротивление. Надежная изоляция моделей крыла ($R = 10^{12}$ Ом) достигалась за счет применения в конструкции узлов подвести моделей фторопластовых втулок. Контроль сопротивления изоляции осуществлялся терраомметром типа Е6-3.

Была принята следующая методика испытаний. После запуска трубы и выхода на рабочий режим по скорости включалась в работу распылительная установка. Регулировкой расходов воды и воздуха через пневмоожекторные форсунки создавался аэрозольный поток требуемых параметров по водности и дисперсности. В результате взаимодействия аэрозольного потока с моделью

крыла происходит ее заряджение. Интервал времени между моментом пуска воды на распыл и началом измерений заряджения модели крыла выбирался таким, чтобы на поверхности модели успевали стабилизироваться гидродинамические процессы формирования пленки воды, соответствующей данному динамическому напору воздуха и количеству воды, попадающей на модель, и процессы образования вторичных капель, покидающих модель крыла. Ток, генерируемый аэрозольными частицами на поверхности модели крыла, стекает через нагрузочное сопротивление на землю, и создается падение напряжения, измеряемое Р-385. Расчет величины тока ведется по формуле:

$$I = \frac{U}{R},$$

где U — показание вольтфарадоомметра Р-385; R — нагрузочное сопротивление.

Исследования проводились при трехкратном повторении с осреднением результатов измерений; обработка экспериментальных данных проводилась на ЭВМ. Оценка погрешностей результатов измерений показала, что относительные средние квадратические отклонения плотностей токов, заряжающих модели крыльев с различными лакокрасочными покрытиями, не превышает 20%. Исследовалась статическая электризация моделей крыльев со следующими лакокрасочными покрытиями:

- на основе отечественных акриловых эмалей АС-1115;
- на основе отечественных полиуретановых эмалей УР-1161;
- на основе полиуретановых эмалей Аэрозур С21/75 фирмы Сиккенс (Голландия);
- на основе лаков 643-5-1, 643-18-1, 643-16-16 фирмы Бостик—Финч (ФРГ).

Так как основные наружные поверхности самолетов гражданской авиации, покрытые белыми (верх фюзеляжа, вертикальное оперение) и светло-серыми (низ фюзеляжа, крылья, горизонтальное оперение) эмалями и лаками, в основном и участвуют в электризации самолетов при их полетах в облаках, то исследовалась электризация указанных выше эмалей и лаков белого и светло-серого цветов.

На рис. 2 представлены зависимости плотности тока, заряжающие модели крыльев с различными лакокрасочными покрытиями, от скорости аэрозольного потока при постоянных средних для исследуемых диапазонов значениях водности среднеэффективного диаметра капель в спектре. Как видно из рис. 2, плотность токов, заряжающих модели, резко возрастает с увеличением скорости аэрозольного потока, причем все окрашенные модели электризуются отрицательно, а неокрашенная дюралевая модель крыла имеет положительное заряджение. Из сравнения заряджения моделей крыльев видно, что уровень электризации моделей, окрашенных акриловыми эмалями АС-1115, полиуретановыми эмалями Аэрозур С21/75 фирмы Сиккенс и полиуретановыми лаками 643-5-1,

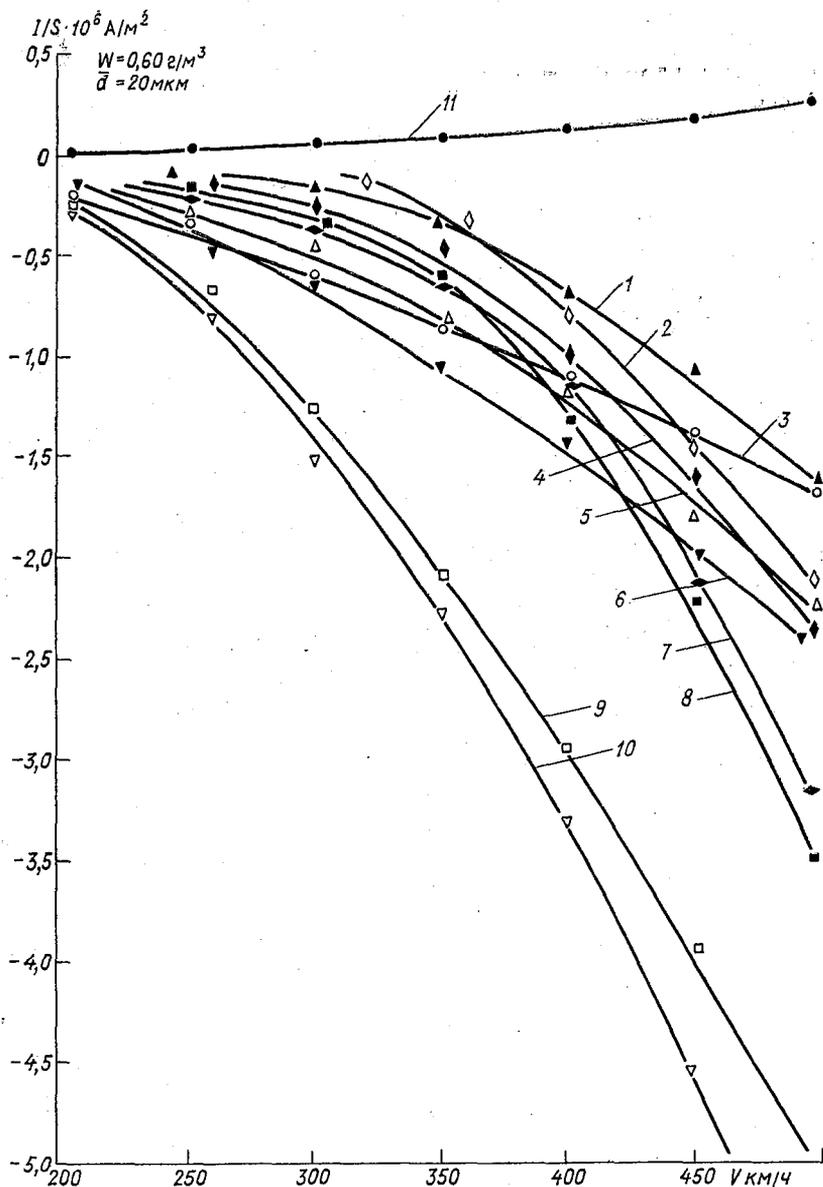


Рис. 2. Зависимость плотности токов, текущих на модели крыльев, от скорости аэрозольного потока.

Модель крыла, окрашенная: 1 — светло-серой эмалью С21/75, 2 — серым лаком 443-3-2, 3 — белой эмалью АС-1115, 4 — белым лаком 643-18-1, 5 — светло-серой эмалью АС-1115, 6 — серым лаком 643-16-3, 7 — белой эмалью С21/75, 8 — белым лаком 643-5-1, 9 — светло-серой эмалью УР-1161, 10 — белой эмалью УР-1161, 11 — неокрашенная дюралевая модель крыла.

643-18-1, 643-16-3 фирмы Бостик-Финч по абсолютной величине в 5—10 раз выше, чем у неокрашенной дюралевой модели крыла. Уровень же электризации моделей крыльев, окрашенных отечественными полиуретановыми эмалями УР-1161, по абсолютной величине в среднем в 20 раз выше, чем у неокрашенной дюралевой модели крыла. Следовательно, электризация полиуретановых лакокрасочных покрытий фирмы Сиккенс (Голландия) и Бостик-Финч (ФРГ) находится на таком же уровне, что у применяемых в настоящее время у нас покрытий на основе акриловых эмалей АС-1115. Уровень же электризации покрытий на основе отечественных полиуретановых эмалей УР-1161 в среднем в 2 раза выше, чем у покрытий на основе полиуретановых эмалей фирм Сиккенс и Бостик Финч.

Обработка экспериментальных данных показала, что плотность токов, заряжающих модели, растет пропорционально скорости потока в степени 3,5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бекряев В. И., Качурин Л. Г., Псаломщиков В. Ф. Электризация тел в потоке аэрозоля.— Труды ЛГМИ, 1972, вып. 45, с. 3—18.
2. Боровиков А. М. и др. Физика облаков. Л., Гидрометеиздат, 1961.
3. Данилов Ю. И. и др. К исследованию электризации тел в аэрозольных потоках.— Труды ГГО, 1977, вып. 350, с. 101—111.
4. Данилов Ю. И. и др. Экспериментальные исследования влияния лакокрасочных покрытий на степень электризации тел в аэрозольном потоке.— Труды ГосНИИГА, 1977, вып. 141, с. 64—68.
5. Имянитов И. М. К вопросу о механизации электростатического заряжения.— ДАН СССР, 1958, т. 121, № 1, с. 93—96.
6. Имянитов И. М. Электризация самолетов в облаках и осадках.— Л., Гидрометеиздат, 1970. 211 с.

Б. Ф. Евтеев

ОЦЕНКА КОЛЛЕКТОРНОГО ЭФФЕКТА В РАЗРЯДКЕ САМОЛЕТА

При анализе компонент баланса токов на самолет в работе [3] было сделано допущение о малости коллекторного эффекта при разрядке самолета. В данной работе предлагается способ расчета эквивалентной проводимости цепи разрядки самолета, обусловленной коллекторным эффектом.

При исследовании статической электризации самолетов для измерения силы тока, текущего на лобовую поверхность, использовались датчики, представлявшие собой металлические пластины, хорошо изолированные от корпуса самолета [4].

Пластины размещались на передней кромке крыльев, по две на каждой плоскости самолета. Одна располагалась достаточно близко к фюзеляжу, другая — ближе к законцовке крыла. Предполагалось, что при таком размещении выполняется условие $\sigma_2 > \sigma_0$ и $\sigma_1 < \sigma_0$.

Поверхность пластины точно вписывалась в контур крыла и благодаря этому условия обтекания крыла с пластиной и соседних участков крыла можно считать одинаковыми.

Пластины изготовлялись из материала обшивки крыла. Сходство аэродинамических и поверхностных свойств датчика и крыла позволяет считать равными условия разделения зарядов на них.

О силе тока на пластину судят по падению напряжения на сопротивление R_n , включенном между пластиной и массой самолета.

Рассмотрим эквивалентную схему датчика тока на крыло самолета [1]. На рис. 1 изображена часть крыла 1 самолета, от которого изоляторами 2 отделены пластины датчиков 3 и 3'. Цепь разрядки самолета представлена проводимостями — коллекторной $\lambda_{\Sigma k}$ и острийных разрядников $\lambda_{\Sigma p}$.

Очевидно, что ток I_n , текущий в цепи измерительного прибора, будет

$$I_n = I_3 - I_{kp}$$

Поскольку условия разделения зарядов на каждой из пластин приняты одинаковыми, то различие между токами $I_{п_1}$ и $I_{п_2}$, текущими на каждую из пластин, будет обусловлено только различием коллекторных эффектов на каждой из них.

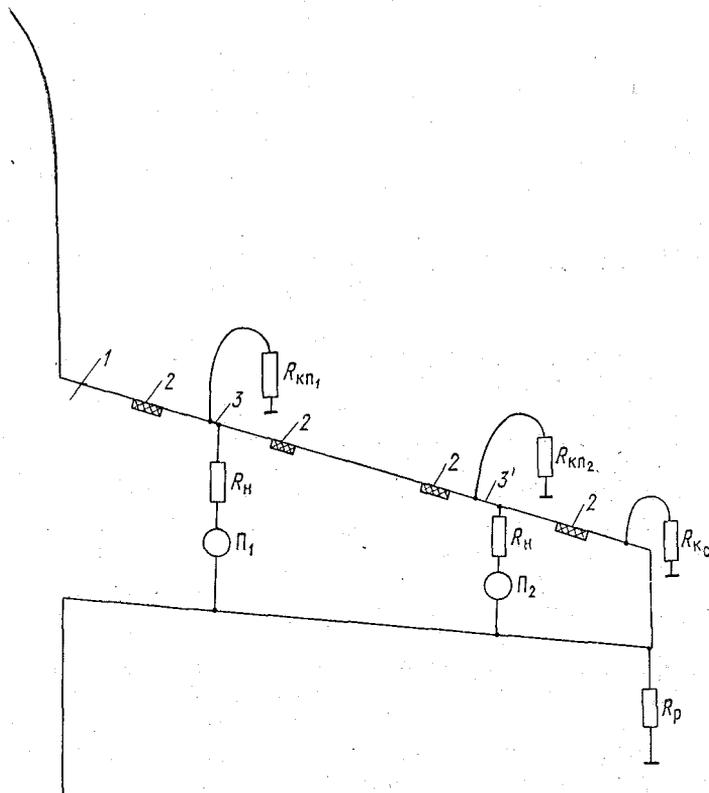


Рис. 1. Эквивалентная схема цепи разрядки самолета.

R_N — сопротивление нагрузки в цепи измерения тока на пластину;
 R_c — эквивалентное сопротивление цепи коллекторной разрядки самолета;
 $R_{кп_1}$ и $R_{кп_2}$ — то же для участков, занятых пластинами на крыле;
 R_p — сопротивление цепи разрядки самолета через разрядники.

Используя схему, представленную на рис. 1, можно написать:

$$\left. \begin{aligned} I_{п_1} &= V_c (\lambda_{\Sigma_p} + \lambda_{\Sigma_k} + \lambda_{кп_2}); \\ I_{п_2} &= V_c (\lambda_{\Sigma_p} + \lambda_{\Sigma_k} + \lambda_{кп_1}). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь $\lambda_{кп_1}$ и $\lambda_{кп_2}$ — коллекторные проводимости первого и второго датчиков соответственно.

Откуда

$$\lambda_{кп_2} - \lambda_{кп_1} = \frac{I_{п_1} - I_{п_2}}{V_c}, \quad (2)$$

где $I_{п1}$, $I_{п2}$ и V_c — измеряемые в полете величины.

Поскольку в реальных условиях $\sigma_2 \gg \sigma_1$, то можно для расчета коллекторной проводимости самолета λ_{Σ_k} написать следующее выражение:

$$\lambda_{\Sigma_k} \geq \lambda_{кп2} \frac{\alpha_{ср}}{\alpha_{п2}} \frac{L}{l}. \quad (3)$$

Здесь $\alpha_{п2}$ — относительная поверхностная плотность заряда на крыле в зоне размещения второй пластины; $\alpha_{ср}$ — среднее значение относительной поверхностной плотности заряда по всем зонам захвата капель самолета; L/l — отношение длины зоны захвата капель самолета и длины пластины.

При определении λ_{Σ_k} данным способом следует иметь в виду, что источником погрешности является неравенство токов $I_{\Sigma 1}$, $I_{\Sigma 2}$ из-за различия свойств поверхности, случайных загрязнений, неточности в определении $\alpha_{п2}$ и $\alpha_{ср}$, значения которых находятся обычно на модели самолета.

Оценим погрешность, с которой определяется коллекторная проводимость λ_{Σ_k} . Относительная погрешность измерения λ_{Σ_k} , определяемой по формуле (3), будет

$$\Delta \lambda_{\Sigma_k} / \lambda_{\Sigma_k} = \frac{\Delta(\Delta I_{п})}{\Delta I_{п}} + \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta \alpha_{ср}}{\alpha_{ср}} + \frac{\Delta \alpha_{п2}}{\alpha_{п2}} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta l}{l}. \quad (4)$$

Определим $\Delta(\Delta I_{п})/\Delta I_{п}$. Расчетная формула для определения тока на пластину $I_{п}$ имеет вид

$$I_{п} = b \Delta l / R_{н},$$

где b — коэффициент, определяемый по результатам градуировки из выражения $u_0/\Delta l_0$ (u_0 — напряжение, подаваемое на вход измерительного усилителя, Δl_0 — отсчет по ленте при подаче на вход u_0), или

$$I_{п} = \frac{u_0 \Delta l}{\Delta l_0 R_{н}},$$

тогда

$$\frac{\Delta I_{п}}{I_{п}} = \frac{\Delta u_0}{u_0} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta l_0}{l_0} + \frac{\Delta R_{н}}{R_{н}}.$$

Здесь $\Delta u_0/u_0$; $\Delta l/l$; $\Delta R_{н}/R_{н}$ не превышают 1% каждый. Величина $\Delta l/l$, в которую входит также дрейф нуля усилителя постоянного тока, равна примерно 2%. Таким образом, $\Delta I_{п}/I_{п} \approx 5\%$ и $\Delta(\Delta I_{п}/I_{п}) \approx 10\%$.

Относительная ошибка $\Delta Q/Q$ при $E_a=0$ определяется точностью, с которой измерены коэффициенты k_Q искажения электрического поля у поверхности заряженного самолета [2]. Поскольку $\Delta k_Q/k_Q$ не превышает 5%, то, согласно оценкам, сделанным в [5], $\Delta Q/Q$ не более 20%.

Величина $\Delta\alpha_{\text{ср}}/\alpha_{\text{ср}}$ и $\Delta\alpha_{\text{п2}}/\alpha_{\text{п2}}$, так же как и $\Delta k_Q/k_Q$, примерно 5%. Из-за малости $\Delta L/L$ и $\Delta l/l$ не учитываем. Таким образом, $\Delta\lambda_{\Sigma_k}/\lambda_{\Sigma_k} \approx 40\%$. Перейдем к определению величины λ_{Σ_k} по экспериментальным данным.

Таблица 1

Разница токов на пластины датчиков тока на крыло Ту-104, измеренные на $H=4,2$ км; $V=650$ км/ч, в облаках Ас

№ режима	$\Delta I_{\text{п}} \cdot 10^{-6}$ А	$Q \cdot 0,3 \cdot 10^{-6}$ Кл	№ режима	$\Delta I_{\text{п}} \cdot 10^{-6}$ А	$Q \cdot 0,3 \cdot 10^{-6}$ Кл
9	1,5	-160	19	8,0	-550
10	1,5	-150	20	7,5	-540
11	1,8	-220	21	7,8	-560
12	2,7	-240	22	7,4	-520
13	3,1	-250	23	4,7	-410
14	3,5	-300	24	4,7	-360
15	2,5	-250	25	4,0	-290
16	2,5	-250	26	4,8	-380
17	4,7	-340	27	4,8	-170
18	5,3	-390			

Воспользуемся результатами измерений, проведенных на самолете-лаборатории Ту-104, оборудованном полным комплексом электрометрической аппаратуры. В табл. 1 приведены значения разности токов $\Delta I_{\text{п}} = I_{\text{п1}} - I_{\text{п2}}$ на участке крыла, измеренные с помощью описанных выше датчиков, и соответствующие им значения заряда Q самолета. Отметим, что все измерения, использованные здесь для расчета, проводились в облаках, где зарядка самолета была достаточно большим, так что в любой точке поверхности самолета выполнялось условие $E_Q \gg E_a$, при котором установленные на модели величины $\sigma_{\text{п2}}$ и $\sigma_{\text{ср}}$ применимы для самолета.

При анализе экспериментального материала было установлено, что:

1) ток, текущий на пластину, расположенную вблизи фюзеляжа, имеет знак, соответствующий заряду самолета;

2) когда токи на пластины имеют одинаковый знак, то ток на пластину

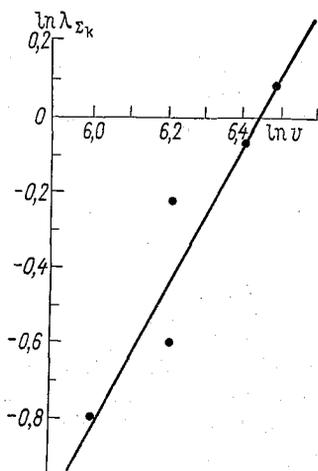


Рис. 2. Зависимость величины коллекторной проводимости самолета λ_{Σ_k} от скорости его полета.

у законцовки крыла всегда меньше тока на первую пластину;

3) когда токи пластин имеют противоположные знаки, то ток на вторую пластину у законцовки крыла по абсолютной величине может быть больше тока первой пластины. Кроме того, в этом случае ток второй пластины совпадает по знаку с токами, текущими через разрядники, что указывает на наличие интенсивной коллекторной разрядки самолета.

Приведем пример расчета коллекторной проводимости. Общая длина передних кромок плоскостей и оперения самолета составляет $L=53,2$ м. Длина пластины 0,1 м. Измерения на модели самолета показали, что $\alpha_{п2}/\alpha_{ср} \approx 4$. Емкость самолета $C_c=1670$ см [3]. Значение $\Delta I_{п}$ и соответствующего ему Q взяты из табл. 1.

$$\lambda_{\Sigma_k} = \frac{\Delta I_{п} C_c \alpha_{ср} L}{Q \alpha_{п2} l} = \frac{1,5 \cdot 10^{-7} \cdot 1670 \cdot 53,2}{160 \cdot 10^3 \cdot 300 \cdot 4 \cdot 0,1} = 0,7 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}^{-1}.$$

Подобным образом были выполнены расчеты по другим режимам измерений, проводившихся в интервале высот от 1 до 6 км, интервале скоростей от 400 до 650 км/ч в облаках различных видов. Сводка результатов этих расчетов дана в табл. 2.

Таблица 2

Значения λ_{Σ_k} самолета Ту-104 в различных условиях полета

Высота, км	Скорость, км/ч	$\lambda_{\Sigma_k} \cdot 10^{-9}$ Ом ⁻¹	Тип облаков
2,2	500	0,55	Ns
3,9	600	0,95	As
1,2	500	0,8	St
4,2	650	1,1	As
1,1	400	0,45	St
5,3	600	0,88	As

Анализ данных табл. 2 показал, что λ_{Σ_k} зависит от скорости полета, причем эта зависимость близка к квадратичной, как это следует из рис. 2.

Таким образом видно, что коллекторная проводимость оказывается сравнимой с проводимостью, обусловленной коронированием с острый самолета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евтеев Б. Ф. Датчик плотности электрического тока на самолет и анализ его эквивалентной схемы.—Труды ГГО, 1974, вып. 301, с. 130—133.
2. Евтеев Б. Ф. Измерение напряженности электрического поля у поверхности самолета.—Труды ГГО, 1972, вып. 277, с. 130—133.
3. Имянитов И. М. Электризация самолетов в облаках и осадках. Л., Гидрометеиздат, 1970. 211 с.
4. Имянитов И. М. и др. Исследование статической электризации самолетов.—Труды ГГО, 1968, вып. 225, с. 106—116.
5. Красногорская Н. В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы ее измерения. Л., Гидрометеиздат, 1972, 323 с.

*Ю. И. Данилов, Б. Ф. Евтеев, Р. Р. Казак,
А. А. Капранс, Я. В. Селвилян*

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДНИКОВ САМОЛЕТОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

В настоящее время острийные разрядники, устанавливаемые на законцовках крыльев и оперения самолетов гражданской авиации, являются единственным и широкоприменяемым средством, предназначенным для уменьшения электростатического заряда летательного аппарата.

Основными характеристиками разрядников являются их динамическое сопротивление и порог срабатывания. Под динамическим сопротивлением понимается величина, соответствующая $\Delta Q_c / \Delta i_p C$, где ΔQ_c приращение заряда самолета Q , Δi_p — соответствующее данному ΔQ_c приращение тока, текущего через разрядник, C — электрическая емкость самолета как уединенного тела.

Порог срабатывания определяется величиной заряда $Q_{нк}$ (или потенциала начала коронирования $U_{нк}$ самолета относительно окружающей его среды), при котором возникает ток коронирования с острия.

Определение характеристик разрядников обычно ведется непосредственно во время полета самолета в облаках. Однако, кроме вольт-амперных, других зависимостей из-за сложностей контроля свойств среды установить в полетах не удавалось. [1; 2].

В проведенных в аэродинамической трубе исследованиях удалось более детально изучить зависимость характеристик разрядников от свойств обдувающего их потока (скорости, влажности, дисперсности) и полярности напряжения, подаваемого на коронирующее острие.

В данных исследованиях обеспечивалась имитация летных условий по параметрам:

— скорости от 33 до 133 м/с (118—480 км/ч), что соответствует условиям в режиме взлета и посадки, в которых самолеты наи-

более часто поражаются разрядами атмосферного электричества;

— водности $\omega = 0,3 - 1,0$ г/м³;

— среднеэффективному диаметру капель $d = 18 - 28$ мкм, что соответствует средним условиям полета в облаках.

Подаваемое на острие напряжение изменялось в пределах $U = \pm 70$ кВ.

Опыты проводились в рабочих частях аэродинамической трубы с сечением $1,5 \times 2,0$ и $0,8 \times 1,0$ м². Для создания аэрозоля использовалась дистиллированная вода, которая по своим показателям близка к облачной.

Испытываемые разрядники вместе с обтекателем закреплялись на изолированной подставке, которая устанавливалась в центре рабочей части. Через полую часть подставки проходил высоковольтный кабель, по которому от источника высокого напряжения подавалось напряжение на исследуемый электростатический разрядник. Сила тока коронирования измерялась прибором М-24 с пределом измерения $(0 - 200) \cdot 10^{-6}$ А, напряжение на выходе источника высокого напряжения измерялось с помощью киловольтметра типа С-100 с пределом измерения $(0 - 75) \cdot 10^3$ В.

Измерения проводились при следующих наружных условиях:

— наружная температура $t = 14 - 24^\circ$ С;

— атмосферное давление 750—765 мм. рт. ст.

— относительная влажность 55—80%.

Были получены следующие результаты.

1. Пороговые значения напряжения оказались не зависимыми от скорости, водности и среднеэффективного диаметра капель в потоке. Начало коронирования разрядников составило $U_{нк} = 10^4$ В. Необходимо отметить, что в условиях трубного эксперимента напряженность электрического поля на острие разрядников оказывается больше, чем в случае его установки на самолете, вследствие влияния заземленных элементов конструкции аэродинамической трубы.

2. Подтвержден линейный характер зависимости вольт-амперных характеристик разрядников от скорости. Исходя из полученных результатов, можно отметить, что повышение эффективности разрядников может быть достигнуто путем:

— уменьшения диаметра коронирующих электродов;

— расположения разрядников в местах с максимальной напряженностью электрического поля;

— расположения в местах с хорошим обдувом.

В реальных условиях при полете в облаках и осадках может иметь место как положительное, так и отрицательное заряджение самолета. В табл. 1 представлены значения токов, стекающих с разрядников при положительной и отрицательной полярности подаваемого напряжения. Электростатические разрядники обеспечивают одинаковые стекающие токи практически независимо от знака потенциала.

Экспериментальные данные показывают, что при изменении водности аэрозольного потока от 0,3 до 1,0 г/м³ и при

Таблица 1

Значения токов (мкА), стекающих с разрядников, при различной полярности напряжения

м/с	Полярность	$U_{кВ}$					
		20	30	40	50	60	70
58	+	10	20	28	34	41	51
	-	11	23	32	36	45	57
83	+	12	27	40	50	57	62
	-	16	32	43	52	59	63
111	+	20	36	57	72	86	97
	-	21	41	60	69	88	104
125	+	22	42	60	79	93	105
	-	25	45	70	81	97	116
133	+	20	44	61	80	94	111
	-	23	49	72	82	101	124

$d=20$ мкм, $v=111$ м/с и фиксированных значениях приложенного напряжения изменение тока разрядника происходит в пределах погрешности эксперимента (табл. 2).

Таблица 2

Значения токов (мкА) разрядников в воздушном потоке и при изменении водности ω (г/м³) в аэрозольном потоке при $d=20$ мкм, $V=111$ м/с

Тип разрядника и полярность напряжения	Приложенное напряжение $U_{кВ}$	В воздушном потоке	В аэрозольном потоке			
			$\omega=0,3$	$\omega=0,6$	$\omega=0,8$	$\omega=1,0$
Ту-134 полярность (+)	30	21	22	21	22	20
	40	32	35	33	32	30
	50	45	50	45	45	43
	60	58	62	60	56	59
	70	68	70	73	72	74
Ту-134 полярность (-)	30	22	22	21	22	20
	40	31	35	33	32	30
	50	45	51	45	45	43
	60	57	62	60	56	59
	70	64	70	72	72	70
Ил-62 полярность (-)	30	29	27	28	22	24
	40	42	37	39	34	37
	50	60	53	52	49	63
	60	71	67	66	62	69
	70	79	72	73	69	71

При изменении среднеэффективного диаметра капель с 18 до 28 мкм при постоянных значениях скорости $v=111$ м/с и водности $\omega=0,6$ г/м³ аэрозольного потока изменений тока разрядника также не наблюдается (табл. 3).

Значения токов (мкА) разрядников в воздушном потоке и при изменении среднеэффективного диаметра d (мкм) капель в аэрозольном потоке при $V=111$ м/с, $\omega=0,6$ г/м³

Тип разрядника, полярность напряжения	Приложенное напряжение UкВ	В воздушном потоке	В аэрозольном потоке			
			$d=18$	$d=23$	$d=28$	$d=30$
Ту-134 полярность (—)	30	21	20	22	21	20
	40	32	33	35	32	30
	50	45	46	43	45	51
	60	58	60	59	56	62
	70	65	62	70	71	70
Ил-62 полярность (—)	30	29	26	34	49	31
	40	42	36	37	53	43
	50	60	55	60	66	57
	60	71	67	62	67	62
	70	79	75	63	45	71

Выводы

1. Пороговое значение потенциала (начало коронирования) разрядников самолетов гражданской авиации практически не зависит от скорости, водности и диаметра капель набегающего потока.

2. Вольт-амперные характеристики исследованных разрядников практически не зависят от полярности поданного напряжения и не изменяются при обдуве аэрозольным или воздушным потоками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Имянитов И. М. Электризация самолетов в облаках и осадках. Л., Гидрометеиздат, 1970. 211 с.
2. Имянитов И. М. и др. Исследование статической электризации самолетов. Труды ГГО, 1968, вып. 225, с. 106—116.
3. Франчук Г. М. Исследование электрогазодинамических характеристик нейтрализаторов статического электричества летательных аппаратов в газовом и аэрозольном потоках. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук, КИИГА, Киев, 1975.

В. С. Александров, Б. Ф. Евтеев,
Н. П. Зиганов, Н. Т. Маркчев

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОНИРУЮЩИХ ОСТРИЙ САМОЛЕТА В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПОЛЕТА

Острым разрядникам принадлежит существенная роль в создании эффективной проводимости λ_p между самолетом и окружающей его средой.

Рядом экспериментов было доказано, что $\lambda_p \gg \lambda_v$ и $\lambda_p > \lambda_d$, где λ_v и λ_d — электропроводность соответственно воздуха и горячих газов двигателей самолета [1, 2].

Величина λ_p существенно зависит от места установки острий на самолете, поскольку напряженность электрического поля, управляющая коронным разрядом данного разрядника, пропорциональна плотности заряда σ_i в i -й точке, где установлен разрядник.

Опыты, проведенные на самолетах [3], показали, что ток коронного разряда, текущий с острия, как правило, является линейной функцией заряда самолета, а опыты в аэродинамических трубах [4, 5] — что сила тока коронного разряда пропорциональна скорости обдува острия.

Однако не установлено, имеет ли место подобная зависимость для острий на самолете, в зонах установки которых, например на законцовках крыльев, благодаря индукционному эффекту и появлению концевых вихря условия работы разрядника, а следовательно, и $\lambda_p = f(v)$ могут отличаться от таковых в аэродинамической трубе.

Недостаточно ясна и зависимость $\lambda_p = f(H)$.

Со ссылкой на [6], в [2] указывается, что $i_p = f(H_0/H)^{1,6}$, в то же время опыты в аэродинамических трубах [4] показали, что $i_p = f(H_0/H)^{0,6}$. Экспериментальных данных, полученных в полете и позволяющих судить о действительной зависимости λ_p от перепада давления, пока нет.

Для изучения данного вопроса были поставлены опыты на одном из самолетов-лабораторий при исследовании закономерностей его электризации в различных метеорологических условиях. На

борту самолета во время полета в облаках обычно велись измерения и синхронная регистрация токов коронирования i_p со штатных разрядников и заряда Q самолета. И хотя во время измерений на режиме скорость v и высота полета H всегда поддерживаются постоянными, из-за флуктуаций свойств внешней среды, сопровождающихся изменениями условий коронирования, и конечных точностей измерения i_p и Q случайная погрешность, с которой определяется λ_p , оказывалась достаточно большой, что препятствовало выяснению $\lambda_p = f(v)$ и $\lambda_p = f(H)$.

Однако при заряджении самолета от бортового источника, проводимом вне облаков, когда флуктуации внешних условий незначительны, такие закономерности оказалось выделить проще.

На самолете-лаборатории Ту-134 ГосНИИГА, оснащенном измерителями его заряда Q и напряженности электрического поля атмосферы E , измерителями токов I_p коронирования со штатных острых разрядников, установкой для принудительного заряджения в полете, были проведены опыты, позволившие установить искомые зависимости в безаэрозольной среде. Перечисленный

Таблица 1

Эффективная электропроводность, обусловленная коронированием крыльевых и килевого разрядников самолета Ту-134 и вычисленная по их кулон-амперным характеристикам, измеренным при искусственном заряджении самолета

H м	v км/ч	$\lambda_p \cdot 10^{-9} \text{ Ом}^{-1}$		σ
		крыльевые разрядники	килевой разрядник	
2 400	545	1,2	0,44	0,15±0,05
2 400	655	1,33	0,5	0,2 ±0,08
5 100	440	1,27	0,48	0,2 ±0,1
5 100	690	1,52	0,57	0,2 ±0,1
5 100	755	1,7	0,6	0,15±0,1
7 900	540	1,48	0,64	0,2 ±0,1
7 900	730	2,0	0,75	0,3 ±0,1
7 900	880	2,6	0,8	0,3 ±0,1
2 400	400	1,15	0,45	0,2 ±0,5
2 400	570	1,45	0,5	0,2 ±0,1
5 400	470	1,3	0,45	0,25±0,1
5 400	645	1,55	0,52	0,3 ±0,1
5 400	765	1,83	0,67	0,25±0,1
8 400	590	1,6	0,6	0,2 ±0,08
8 400	750	2,1	0,75	0,3 ±0,1
10 000	620	1,74	0,8	0,3 ±0,1
10 000	840	2,78	1,3	0,3 ±0,1

комплекс электрометрической аппаратуры и принципы его размещения разработаны в ГГО и применялись ранее в совместных с ГосНИИГА исследованиях статической электризации самолетов гражданской авиации различных типов [3].

Принудительное заряджение самолета осуществлялось путем выпуска сжатой углекислоты за борт самолета через систему штуцеров из баллона типа ОС-8м. При этом самолет получал отрицательный (как и обычно в полетах в облаках) электрический заряд.

Величина заряда значительно превышала порог коронирования разрядников, что позволило построить их характеристику $i_p = f(Q)$ и по ее линейному участку рассчитать $\lambda_p = \Delta i_p C / \Delta Q$, где C — емкость самолета.

В опытах с заряджением самолета от бортового источника измерения на каждой высоте проводились на трех скоростях полета, соответствующих минимально допустимой, крейсерской и максимально допустимой для заданной высоты.

Синхронные записи $Q = f(t)$ и $i_p = f(t)$ на ленте регистратора позволили в каждом случае получать зависимости $i_p = f(Q)$, а по ним вычислить λ_p . В табл. 1 даются величины λ_p для двух крыльевых и килевого разрядников. Погрешность обработки осциллографных лент не превышала 5%. Значения средней квадратической ошибки σ расчета λ_p также приведены в табл. 1.

Сопоставим результаты, полученные на самолете, с результатами работы [4], в которой приводятся данные о зависимости тока коронирования с острия от скорости спутного потока и давления, полученных в аэродинамической трубе. На рис. 1 показана зависимость $\lambda_p = f(v)$, построенная по данным [4], а на рис. 2 — зависимость $\lambda_p = f(P_0/P)$ по данным [4] и табл. 1. Для построения кривых 2 и 3 на рис. 2 данные о $\lambda_p = f(v)$ при $v = 700$ км/ч были получены линейным интерполированием. Как следует из рис. 3, где представлены зависимости $\ln \lambda_p = f[\ln(P_0/P)]$, зависимость тока коронирования острия на самолете от изменения давлений аналогична таковой, измеренной в аэродинамической трубе. Заметим, что при построении кривых 2 и 3 на рис. 2 перепад давлений рассчитывался по стандартной атмосфере.

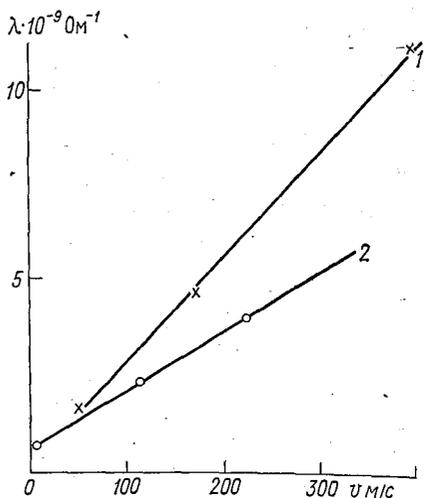


Рис. 1. Изменение λ_p коронирующего острия в зависимости от скорости обдува при различных давлениях P , по данным [4].

1 — при $P = 0,15$ атм, 2 — при $P = 0,54$ атм.

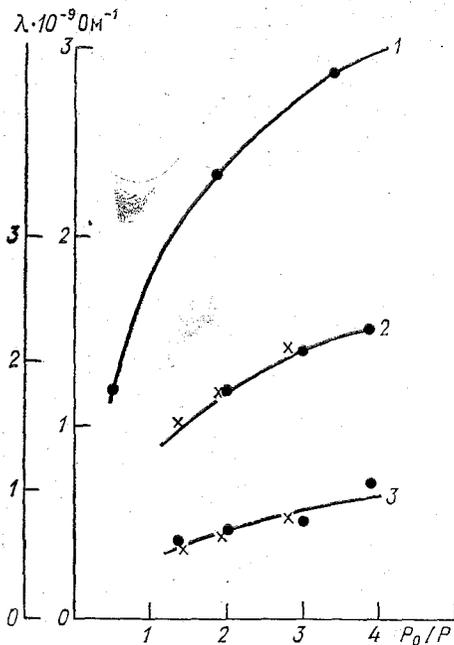


Рис. 2. Изменение λ коронирующего острия при изменении давления P на задней скорости обдува.

1 — для одиночного острия в аэродинамической трубе при $v=110$ м/с, по данным [4]; 2, 3 — соответственно для крыльевых и килевых разрядников Ту-134 при $v=194$ м/с, по данным табл. 1.

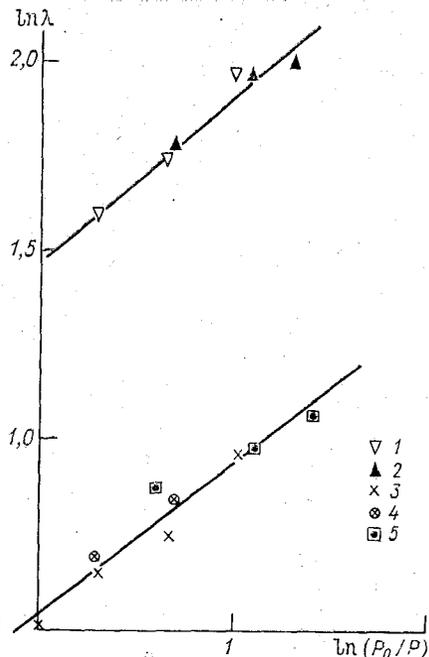


Рис. 3. Зависимость $\ln \lambda$ от $\ln(P_0/P)$ по данным опытов на самолете Ту-134 и в аэродинамической трубе [4].

1 и 4 — соответственно λ крыльевых и килевого разрядников в первом опыте; 2 и 3 — то же во втором опыте; 5 — данные опытов в аэродинамической трубе

Таким образом, зависимость λ_p острий на самолете может быть описана уравнением

$$\lambda_p = B (P_0/P)^{0,4} v.$$

Значение коэффициента B определяется геометрическими особенностями самолета и зависит от места расположения разрядников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евтеев Б. Ф., Маркчев Н. Т. О зарядении самолета, связанном с работой его двигателей.—Труды ГГО, 1977, вып. 350, стр. 116—120.
2. Имянитов И. М. Электризация самолетов в облаках и осадках. Л., Гидрометеиздат, 1970, 211 с.
3. Имянитов И. М. и др. Исследование статической электризации самолетов.—Труды ГГО, 1968, вып. 225, с. 106—116.
4. Chapman S. Corona point current in wind.—J. Geophys. Res., 1970, vol. 75, № 12, p. 2165—2169.
5. Hendric R., Chapman S. Corona discharge current measurements from an isolated point in wind.—Bull. Amer. Met. Soc., 1955, vol. 55, p. 544.
6. Tamm F. Über der Einfluss des Luftdrucks und der Luftfeuchtigkeit auf, Entladung Statischer Electricität aus Spitzen.—Ann. Phys., 1901, Bd 6 S. 259—279.

СОДЕРЖАНИЕ

И. М. Имянитов, Г. П. Павлова, Ю. Ф. Пономарев, Е. В. Чубарина. Анализ условий поражения самолета атмосферно-электрическим разрядом вне кучево-дождевых облаков	3
И. И. Камалдина. Исследование условий поражения самолетов молниями в негрозовых зонах	16
В. А. Камышанова. Длительные тенденции в изменении градиента потенциала электрического поля атмосферы и его связь с эпохами атмосферной циркуляции	25
В. П. Колоколов, Г. П. Павлова, В. А. Камышанова. Исследование естественного цикла развития гроз в Ленинградской области	29
В. А. Камышанова, Т. В. Лободин, Г. П. Павлова. Климатические типы и грозовая деятельность	40
Л. Г. Махоткин, Б. К. Иньков, Г. П. Лещенко, В. И. Синегубов. Вопросы оперативного использования данных наблюдений по счетчикам местных грозовых разрядов	45
Б. К. Иньков, Г. П. Лещенко, Л. Г. Махоткин. Опыт автоматического измерения продолжительности местных гроз	51
Л. Г. Махоткин, Г. П. Лещенко, Б. К. Иньков. Изменение разности фаз компонентов атмосфериков вблизи источника	57
В. П. Закарюкин. Некоторые особенности структуры электрического поля молнии	62
Л. Г. Махоткин. О резонансных частотах полости Земля—ионосфера	67
Я. М. Шварц. О поляризационном токе в атмосфере	72
К. А. Семенов, Л. Г. Соколенко, Я. М. Шварц. Исследование прибора для измерения электропроводности воздуха	74
Т. В. Лободин, Л. В. Огурьева. О длине рядов атмосферно-электрических наблюдений	83
И. М. Имянитов, Е. В. Чубарина. Лабораторные исследования контактной электризации частиц	88
Б. Ф. Евтеев, Н. Т. Маркчев. Электризация диэлектрических участков поверхности самолета, омываемых аэрозольным потоком	98
Ю. И. Данилов, Б. Ф. Евтеев, Р. Р. Казак, А. А. Капранс, Я. В. Селвкийн. Заряжение пробных тел с различными электропроводящими покрытиями поверхности	103
Ю. И. Данилов, В. И. Доценко, Б. Ф. Евтеев, Р. Р. Казак, А. А. Капранс, Я. В. Селвкийн. Экспериментальное исследование влияния заряда капель на электризацию тела в их потоке	105
Ю. И. Данилов, В. И. Доценко, Б. Ф. Евтеев, Р. Р. Казак, А. А. Капранс, Я. В. Селвкийн. К методу оценки электризации лакокрасочных покрытий самолетов гражданской авиации	109
Б. Ф. Евтеев. Оценка коллекторного эффекта в разрядке самолета	115
Ю. И. Данилов, Б. Ф. Евтеев, Р. Р. Казак, А. А. Капранс, Я. В. Селвкийн. Исследование характеристик электростатических разрядников самолетов гражданской авиации в аэродинамической трубе	121
В. С. Александров, Б. Ф. Евтеев, Н. П. Зиганов, Н. Т. Маркчев. Исследование характеристик коронирующих острий самолета в различных условиях полета	125

Труды ГГО, вып. 424

АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Редактор О. Д. Рейнгерц. Техн. редактор М. И. Брайнина. Корректор Т. Н. Черненко.

Сдано в набор 20.01.79. Подписано в печать 24.01.80. М-23222. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типограф.
№ 1. Литературная гарнитура. Печать высокая. Печ. л. 9. Уч.-изд. л. 9,17. Тираж 600 экз. Индекс
МЛ-110. Заказ 709. Цена 65 коп. Заказнос. Гидрометеоздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, д. 23.

Типография имени Анохина Управления по делам издательств, полиграфии и книжной
торговли Совета Министров Карельской АССР, г. Петрозаводск, ул. «Правды», 4.