

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И КОНТРОЛЮ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

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

Выпуск

442

АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

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



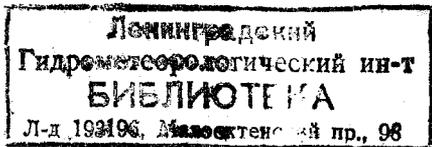
ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1981

Сборник (за очень немногими исключениями) посвящен всестороннему исследованию гроз пассивными методами, применяемыми в работах по атмосферному электричеству. Рассмотрен широкий круг вопросов — от метеорологических условий развития местных гроз до особенностей глобального распределения грозовой деятельности, от различных радиотехнических методов использования атмосфериков для наблюдений за грозовыми очагами до определения зарядов в облаках по скачкам напряженности электрического поля. В комплексе этих исследований более широко представлены работы по атмосферикам, имеющие практическую направленность, и лишь частично затронуты общие вопросы атмосферного электричества.

Сборник предназначен для специалистов различного профиля, использующих в исследовательской или практической работе сведения о грозах.

The publication deals basically with thorough investigation of thunderstorms by passive techniques used in works on atmospheric electricity. A wide range of problems has been examined: from the meteorological conditions of local thunderstorm development to the distinctive features of the global distribution of thunderstorm activity, from different radio techniques for using spherics for observation of thunderstorm centres to determining charges in clouds from jump in electric field strength. In these studies works on spherics are most widely represented, and the general problems of atmospheric electricity are only partly touched upon.

The publication is intended for specialists of different profiles using information on thunderstorms in research or practical work.



Г. П. Павлова, Ю. Ф. Пономарев, Е. В. Чубарина

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОНВЕКТИВНОГО ОБЛАКА

Измерение электрических характеристик в сочетании с термодинамическими и микрофизическими параметрами в различных стадиях развития облаков остается одной из важнейших задач в изучении электризации облаков. Авторами было сделано обобщение информации о конвективных облаках с целью выбора возможных режимных характеристик связи, с одной стороны, электрических величин, с другой — метеорологических параметров, сопутствующих жизни облака.

При оценке факторов, влияющих на образование и эволюцию кучевых облаков, наибольшее внимание уделяется устойчивости воздушной массы, изменению температуры и влажности в процессе ее перемещения. Однако значительную часть энергий конвективные потоки получают и за счет скрытого тепла фазовых переходов воды в атмосфере. Поэтому определение запасов неустойчивости в облаке должно быть дополнено учетом процессов, происходящих внутри самой облачной массы. Вид спектра размеров капель, водность существенно влияют на электрическое состояние облака. Разделению зарядов способствуют восходящие токи и гравитационные силы. В свою очередь рост электрического поля увеличивает скорость коагуляционных процессов. Но непосредственные измерения микроструктуры облака очень сложны.

В последнее десятилетие получили развитие работы по исследованию конвективных облаков с помощью радиолокации (МРЛ). Методика наблюдений основана на связи распределения радиоэха и его численных величин с характеристиками облаков. Данные МРЛ позволяют получить высоты верхней и нижней границ облака, опасные явления на ограниченной территории.

Так как отражаемость радиосигналов связана только с микроструктурой облака, то такие измерения являются объективной информацией о полях облачности по площади. Анализ статистически полных материалов по литературным данным показал, что структура полей метеоэлементов неодинакова для облаков, нахо-

дящихся в различных стадиях развития [5, 14]. Следовательно, существенно получение и электрических характеристик в зависимости от стадий кучевого облака, которые физически представляют собой лишь различные ступени развития атмосферной конвекции. Это подтверждается данными о водности, микроструктуре [5, 13]. В капельно-жидких облаках незначительной мощности средние значения электрических полей и зарядов сравнительно невелики. В небольших же объемах водность и электрические характеристики могут значительно превышать свои средние значения.

Важным практическим этапом в изучении Св является возможность оценить граничные значения термодинамических параметров облака, при которых начинаются грозовые разряды. В настоящее время имеется ряд работ, посвященных анализу многих факторов, содержащих теоретическое обоснование развития конвективного облака. Учет комплекса из большого числа величин, характеризующих состояние атмосферы, возможен при применении математической статистики. В работе [8] методом дискриминантного анализа рассмотрены термогидродинамические и синоптические параметры, обуславливающие развитие грозы. Сравнительный анализ информативности и средних значений факторов при грозе и ее отсутствии показал, что наилучшими характеристиками, определяющими наличие грозы, являются рассчитанная мощность облака и температура на его вершине, а также отклонение кривой стратификации на уровне с температурой -10°C .

Позже с использованием более надежного материала была получена дискриминантная функция, где выявлено, что, по-прежнему, на формирование гроз наибольшее влияние имеет неустойчивость (на изобарической поверхности 600 мбар) [7].

Материалы, приведенные в [10], показали, что значительную информативность о грозах дает сочетание сведений о мощности облака в области отрицательных температур и температуры на его верхней границе, которая указывает на возможность появления ледяной фазы и выпадения осадков. Эти проведенные обобщения оптимальных условий возникновения молниевых разрядов подтвердили результаты натурных измерений метеорологических характеристик облаков.

Для выявления процессов накопления и разделения зарядов в кучевых облаках необходимо установить основные различия метеорологических характеристик облаков.

Можно сформулировать следующие критериальные значения различных параметров конвективных облаков в догрозовой и грозовой стадиях их развития:

1) если мощность облаков меняется в пределах 2...4 км, то следует ожидать, что развивающиеся облака не грозового, а ливневого характера. Если мощность облака превышает 4,5 км то вероятно возникновение грозовой деятельности;

2) скорость конвективного потока, которая выражает запас

энергии неустойчивости (на уровне 600 мбар) согласно [9] при ливнях имеет значение 6...8 м/с, а при грозах 9...10 м/с;

3) если радиолокационный критерий грозоопасности [4] $Y \leq 10$, то исследуемое конвективное облако надо отнести к стадии негрозового; в случае, когда $Y \geq 20$, облако относится к грозовому;

4) если высота верхней границы радиоэха лежит ниже изотермы -30°C , то облако классифицируется как кучево-дождевое в ливневой стадии, при увеличении верхней границы радиоэха от -30 до -40°C в облаке обычно возникают грозовые разряды [3].

Данные для анализа облаков по перечисленным критериям могут быть получены с ближайшей станции радиозондирования или с помощью метеорографа, установленного на борту самолета.

Таблица 1

Значение параметров, определяющих стадии развития кучевого облака

	$Cu\text{ cong.}$	Cb в ливневой стадии	Cb в грозовой стадии
Мощность облака ΔH , км	< 4	2 . . . 4	$\geq 4,5$
Скорость вертикального потока W , м/с	< 6	6 . . . 8	≥ 9 . . . 10
Радиолокационный критерий грозоопасности Y	—	≤ 10	≥ 20
Высота верхней границы радиоэха	—	$\leq -30^\circ\text{C}$	$\geq -30 \dots -40^\circ\text{C}$
Удельная влажность воздуха q_3 ; q_{850} ; q_{700}	5; 3; 1,5	7,3; 5,2; 3,0	9,2; 7; 3,8

Анализ этих параметров должен проводиться в сопоставлении с синоптической обстановкой в рассматриваемом районе. Здесь необходимо рассмотреть наличие фронтов, слоев инверсии, учесть влияние на стратификацию атмосферы величины упорядоченных вертикальных движений, отражающих мезомасштабные особенности барических полей.

Так как существенным источником энергии вертикальных движений является высвобождаемое тепло конденсации, то надежной характеристикой влагосодержания является удельная влажность воздуха. Интенсивность конвекции в значительной степени определяется запасом влаги в слое от поверхности земли до изобарической поверхности 700 мбар. Как показали исследования [9], в дни с грозами удельная влажность у поверхности земли (q_3) составляет $\sim 9,2$ г/кг, на уровне 850 мбар (q_{850}) ~ 7 г/кг, на уровне 700 мбар (q_{700}) $\sim 3,8$ г/кг. При ливневых осадках соответственно средняя удельная влажность $q_3 \sim 7,3$ г/кг, $q_{850} \sim 5,2$ г/кг, $q_{700} \sim 3,0$ г/кг.

Таким образом, имеются следующие критерии, по которым можно судить о степени развития кучевого облака (табл. 1).

Отметим, что приведенные критериальные значения не являются конечно-жесткими, а определяются обычно довольно широкими полосами значений, часто перекрывающимися друг друга на граничных значениях [1].

Изучение электрических характеристик конвективных облаков очень сложно. Изучение с земли затруднено влиянием экранирующих объемных зарядов, а также искажающим влиянием поверхности земли.

Самолет имеет ограниченный вход в конвективные облака. Кроме того, самолет в облаке значительно электризуется, что увеличивает ошибку в измерении электрических параметров облачной среды.

Тем не менее к настоящему времени в ГГО накоплен материал, позволяющий провести некоторую статистическую обработку электрических параметров облаков. На рис. 1 представлены в вероятностно-логарифмической шкале распределения абсолютных значений вертикальной составляющей напряженности электрического поля в конвективных облаках на различных стадиях их развития.

На графике видно, что средняя напряженность электрического поля в облаках типа $Cu\text{cong.}$ (прямая 1) невелика. Медианные значения ее составляют 40...50 В/м. По характеру кривой распределения можно заключить, что по своим электрическим характеристикам облака $Cu\text{cong.}$ близки к облакам As (близкие средние величины, одинаковый наклон кривых [1]).

В стадии $Cu\text{cong.}$, переходящих в Cb ($Cu\text{cong.} \rightarrow Cb$), характеризующейся началом выпадения осадков, напряженность электрического поля сразу же резко возрастает примерно на порядок (рис. 1, кривая 2). Медианные значения ее в этой стадии составляют 150...200 В/м, но могут доходить с вероятностью 0,1 % до 10^4 В/м. Судя по кривой распределения, электрические характеристики конвективного облака в стадии $Cu\text{cong.} \rightarrow Cb$ близки к электрическим характеристикам слоисто-дождевых облаков [1].

Распределение величин напряженности электрического поля в конвективном облаке в стадии Cb представлено на рис. 1 прямой 3. Видно, что медианные значения напряженности электрического поля в облаках в начальной (негрозовой) стадии $Cb \sim 4...5 \cdot 10^3$ В/м, т. е. на порядок выше, чем в стадии $Cu\text{cong.} \rightarrow Cb$ и на два порядка выше, чем в стадии $Cu\text{cong.}$ Таким образом, при переходе облака из стадии $Cu\text{cong.}$ в стадию Cb резко на 1...2 порядка возрастают величины напряженности электрического поля в облаке. Проведенные исследования [2, 6, 11, 12] позволяют утверждать, что процесс организованной электризации в конвективных облаках наступает в период появления осадков. В облаках на стадии $Cu\text{cong.}$ отмечаются хаотически расположенные объемные заряды разных знаков, но, как правило, слабо выражена организованная электризация всего объема. В облаках типа Cb помимо характерной черты кучевых облаков — наличия многочисленных областей разноименных за-

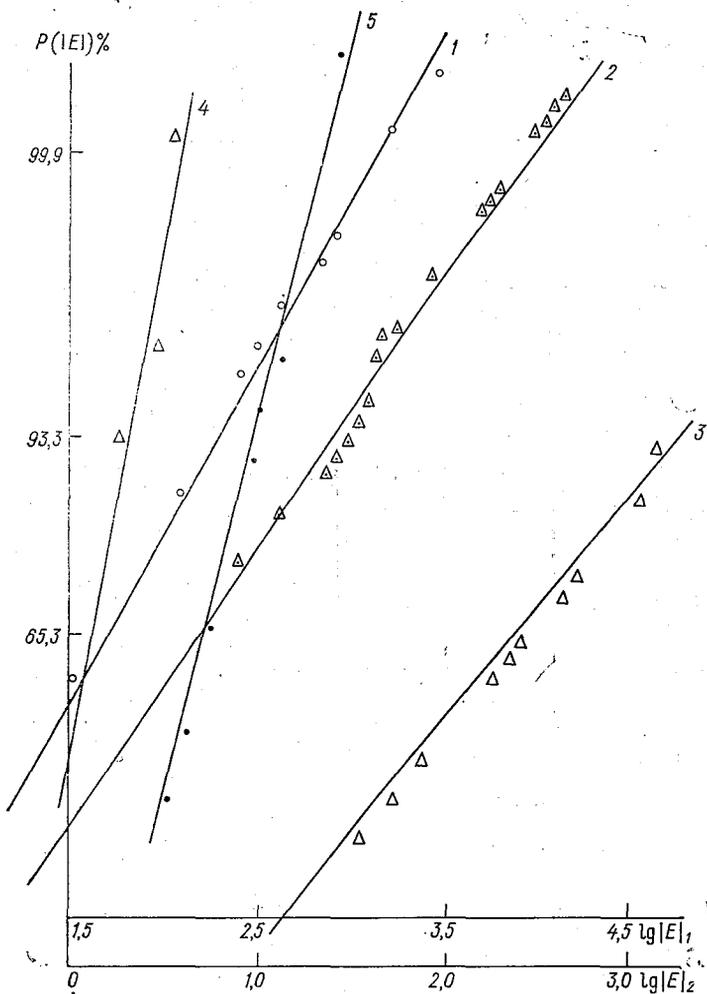


Рис. 1. Распределение абсолютных значений напряженности электрического поля в конвективных облаках, представленные в вероятностно-логарифмической сетке.

1 — в облаках типа Cu cong., 2 — Cu cong. + Cb, 3 — Cb (по шкале $\lg|E|_1$), 4 — над или около Cu cong. (в удалении ~100—200 м), 5 — над Cu cong. + Cb (по шкале $\lg|E|_2$).

рядов — возникают области основных зарядов, создающих основное электрическое поле в облаке.

Средние значения напряженности электрического поля внутри активной части Cb составляют $\sim 10^4 \dots 10^5$ В/м. Но для начала грозовых разрядов она должна доходить до $(1 \dots 3) \cdot 10^6$ В/м, следовательно, в отдельных неоднородностях облака должны возник-

Средние метеорологические, радиолокационные и электрические ха

Характеристика	1975 г.			1977 г.		
	13 VII	14 VII	15 VII	22 VII	23 VII	27 VII
	По данным					
ΔH км	5,0	5,4	5	4,4	4,0	1,2
$T_{в.г}$ °C	-35	-45	—	-32	-20	-8
w м/с	9	8	.	8	7	6
q_3 г/кг	8	7	7	6	7	7
q_{850}	6	6	5	4	5	5
q_{700}	4	4	3	2	2	3
	По данным					
ΔH км	4	5,3	5	4,0	4,0	5,6
$T_{в.г}$ °C		-28		-28	-7	-38
Y				3	3	7
$ \bar{E} $ В/м (до воздействия)	х. ф.	х. ф.	м. гр.	х. ф.	х. ф.	х. ф.
до облака	<10	<10	<10	<10	<10	<10
над или около облака	~20	<10	50	10	3	<10
после облака	<10	<10	<10	<10	<10	<10
$ \bar{E} $ В/м (после воздействия)						
до облака	<10	<10	<10	<10	<10	<10
над или около облака	<10	~30	50	300	<10	<10
после облака	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Стадия развития						
до АВ	Cu cong.	Cu cong.	Cb	Cu cong.	Cu cong.	Cu cong.
после АВ	облако разрушилось	Cu cong.	Cb	Cu cong. → Cb	Cu cong.	Cu cong.

Примечание. х. ф. — холодный фронт, м. гр. — малоградиентное

коть хоть на небольшое время такие величины. Судя по кривым распределения, они возможны с вероятностью 0,1 %.

В ГГО проведены обширные измерения напряженности электрического поля атмосферы над конвективными облаками, находящимися на разных стадиях развития. Благодаря тому, что са-

Таблица 2

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ В РАЗНЫХ СТАДИЯХ РАЗВИТИЯ

1978 г.						
6 VII	12 VII	17 VII	19 VII	20 VII	26 VII	27 VII
радиозонда						
9,4	8,5	6,1	5,8	6,2	4,0	5,8
-28	-35	-37	-29	-12	-28	-32
10	6	5	3	10	6	8
7	9	7	6	7	7	8
6	6	4	4	5	5	4
3	4	3	2	3	2	3
радиолокатора						
9,0	8,5	5,0	4,8	4,3	4,0	5,4
-48	-47	-28	-21	-16	-20	-30
9	10	6	4	5		8
х. ф.	х. ф.	х. ф.	х. ф.	х. ф.	х. ф.	х. ф.
20	<10	<200	<10	10	<10	<10
40	<10	10 000	200	16	<10	<10
20	<10	<10	<10	20	<10	<10
30	<10	~10	<10	10	<10	<10
230	10	~5000	~3800	200	<10	<10
30	<10	<10	<10	20	<10	<10
Cu cong. → →Cb	Cu cong. → →Cb	Cb	Cu cong. → →Cb	Cu cong. → →Cb	Cu cong.	Cu cong.
Cb	Cu Cong. → →Cb	Cb	Cb	Cb	Cu cong.	Cu cong.

поле.

молеты совершали несколько последовательных проходов над вершиной одного и того же облака, удалось установить коррелятивные связи между стадией его развития и напряженностью электрического поля атмосферы над ним [2, 11]. Выводы этих исследований дают основание утверждать, что величина напряженно-

сти электрического поля над конвективными облаками, не дающими осадков, обычно невелика и, как правило, мало отличается от фоновых значений на высоте полета. При пролетах же над кучево-дождевыми облаками наблюдаемые величины напряженности электрического поля на 2...3 порядка превосходят таковые над *Cu cong.* Кучево-дождевые облака вносят явную неоднородность в распределение напряженности электрического поля в окрестности облака. Это свидетельствует о наличии объемного заряда в облаке, стадия же *Cu cong.* не отмечается по такой электрической характеристике, как включение объемного заряда в атмосферу.

На рис. 1 прямыми 4 и 5 представлены распределения напряженности электрического поля над конвективными облаками, находящимися в стадии *Cu cong.* (прямая 4) и в стадии *Cu cong.*→*Cb* (прямая 5). Видно, что величины напряженности электрического поля над облаками на 1,5...2 порядка меньше, чем в облаках и разброс значений очень невелик; кривые распределения в вероятностно-логарифмическом масштабе идут с очень небольшим наклоном. Это и свидетельствует о том, что конвективные облака в начальной стадии развития не вносят большой неоднородности в распределение электрического поля над ними.

Прямые 4 и 5 получены по материалам полетов над конвективными облаками во время летних полетов 1975, 1977, 1978 гг. Полеты проводились под руководством Ю. Ф. Пономарева. Мы попытались рассмотреть характеристики исследованных облаков в соответствии с приведенными выше данными рассуждениями и сопоставить их с критериальными значениями этих характеристик, приведенных в табл. 1. Осредненные величины этих характеристик, соответствующих времени полета, приведены в табл. 2.

В полетах облако исследовалось сначала в естественном развитии, затем на втором или третьем проходе над облаками (или около них, если верхняя граница выше, чем мог подняться самолет ИЛ-14) проводились активные воздействия (АВ) на облака. Воздействия проводились пиропатронами С-55, вводящими в облако кристаллообразующий реагент AgI . Воздействия на облако искусственно деформировали стадию его развития. О степени деформации можно судить только по изменению электрических характеристик и по визуальным наблюдениям.

Сопоставление всех критериев дало возможность заключить, что исследованные облака находились в стадии *Cu cong.* или в стадии *Cu cong.*→*Cb* и *Cb*. Это сопоставление с одновременным анализом метеобстановки по синоптическим картам позволяет сделать заключение об эффективности одновременного применения нескольких критериев для анализа метеорологической обстановки, в которой развивается исследуемое облако.

Об изменении же стадии развития облака в процессе его естественной жизни или в результате активного воздействия на него можно судить только по измерениям специальной бортовой

аппаратуры [14], а в наших случаях только по электрическим измерениям и визуальным наблюдениям. Все исследованные облака на совокупности представленных в табл. 2 средних характеристик можно было отнести к облакам в стадии $Cu\ congesta$ и $Cu\ congesta \rightarrow Cb$. После воздействия наблюдалось оледенение вершины и выпадение осадков. В четырех случаях из семи за 1978 г. это привело к разрушению облака, в трех случаях — сначала к его бурному развитию с переходом в стадию Cb и даже с возникновением в них (19 июля 1978 г.) молниевых разрядов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Имянитов И. М., Чубарина Е. В., Шварц Я. М. Электричество облаков. — Л.: Гидрометеоздат, 1971, с. 92.
2. Камалдина И. И. Об изменении электрической структуры кучево-дождевых облаков в процессе их развития. — Труды ГГО, 1968, вып. 225, с. 85—91.
3. Лапчева В. Ф. Уточнение интерпретации радиолокационных данных на картах сети МРЛ с целью распознавания кучево-дождевых градовых облаков. — Труды ГМЦ СССР, 1977, вып. 176, с. 35—41.
4. Минакова Н. Е. Результаты анализа радиолокационных данных по распознаванию ливней и гроз. — Труды ГМЦ СССР, 1974, вып. 136, с. 35—41.
5. Мучник В. М. Физика гроз. — Л.: Гидрометеоздат, 1974.
6. Никитюк В. А., Павлюченков Г. Ф., Сумин Ю. П. К вопросу об изменении электрической структуры $Cu\ congesta$ после воздействия на него реагентом PbJ_2 . — Труды ГГО, 1974, вып. 323, с. 86—93.
7. Песков Б. Е. Исследование метеорологических условий образований гроз последовательным дискриминантным анализом. — Труды ГМЦ СССР, 1977, вып. 185, с. 24—40.
8. Песков Б. Е., Вербичкая С. Н., Тимошенко Л. В. Исследование комплексного влияния на образование гроз различных метеорологических условий с применением линейного дискриминантного анализа. — Труды ГМЦ СССР, 1974, вып. 149, с. 20—54.
9. Пономаренко С. И., Кузнецова С. А. Условия возникновения и прогноз гроз в районе Москвы. — Труды ГМЦ СССР, 1974, вып. 139, с. 38—46.
10. Решетов Г. Д. Прогноз дневных и ночных гроз. — Труды ГМЦ СССР, 1977, вып. 176, с. 86—99.
11. Сумин Ю. П., Шварц Я. М. Электрическое поле в окрестности кучевых облаков, подвергнутых воздействию. — Труды ГГО, 1970, вып. 262, с. 73—80.
12. Сумин Ю. П., Шварц Я. М. Электрические поля в окрестности конвективных облаков. — Труды ГГО, 1972, вып. 278, с. 113—120.
13. Физика облаков/А. М. Боровиков, И. И. Гайворонский, Е. Г. Зак и др. Под ред. А. Х. Хргиана. — Л.: Гидрометеоздат, 1961. — 459 с.
14. Шметер С. М. Структура полей метеорологических элементов в зоне кучево-дождевых облаков. — Труды ЦАО, 1969, вып. 88.

И. И. Камалдина, Г. Г. Корниенко

ЧАСТОТА РАЗРЯДОВ ИЗ ГРОЗОВЫХ ОБЛАКОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

В настоящее время перед исследователями атмосферного электричества встает задача отыскания связи между аэросиноптическими и электрическими характеристиками грозовых облаков.

Прогнозирование гроз в современной метеорологии осуществляется одновременно с прогнозом количества осадков; между тем известны случаи выпадения очень интенсивных ливней из негрозовых облаков, с одной стороны, и явлением так называемых «сухих гроз» — с другой. Поэтому рассмотрение такого фактора, как частота молниевых разрядов, и отыскание взаимосвязи его с аэросиноптическими факторами представляет интерес. Цель настоящей работы — установление предикторов, наиболее значимых при прогнозировании гроз.

Частота разрядов характеризуется их числом в единицу времени или характерным временем между разрядами. Имеющиеся в настоящее время сведения о частоте грозовых разрядов опираются на наблюдения у поверхности земли, полученные с помощью счетчиков молний с различным радиусом действия и с помощью панорамных грозорегистраторов.

Измерения, проведенные в Молдавии [2], показывают, что для гроз холодного фронта частота разрядов N колеблется от 0,1 до 4,4 разряд/мин, для гроз Ленинградской области средняя частота разрядов составляет 1,5 разряд/мин [1].

Связь частоты разрядов с аэросиноптическими условиями исследована мало. В работе [6] сравнивалась частота разрядов с так называемыми грозовыми индексами, учитывающими температурные условия и условия влажности на нижних и средних уровнях. Установлена также тесная корреляция между высотой основания облака и N .

В некоторых работах приводится частота разрядов в грозах при различных синоптических ситуациях. По данным Филиппова [4], для гроз Восточной Сибири наибольшая частота разрядов наблюдается в грозах малоградиентного поля, пониженного давления, наименьшая — в тыловой части циклона.

В отличие от цитированных работ, авторы определяли частоту разрядов по данным самолетных измерений напряженности поля с помощью электростатического флюксметра, фиксируемых на ленте фотоэлектрического самописца. Использовались материалы полетов в районе вершин грозových облаков в течение летних сезонов 1961—1965 гг., проводимых ГГО совместно с ЦАО. Методика исследовательских полетов описана в работе [5]. Выбирались изолированные облака, отстоящие от соседних на расстоянии не менее 25 км. Согласно измерениям, средняя высота верхней кромки исследованных облаков равнялась 9,4 км, площадь основания отдельного облака в среднем составляла 40 км². По данным проведенных исследований, учитывающих ход электрического поля над облаком и радиолокационные данные, в 70 % случаев исследованные облака имели одноячеистую структуру, в 26 % — двухячеистую. Это согласуется с данными визуальных наблюдений, по которым в 60...70 % случаев вершины $Cb\text{calv}$ состоят из одного купола диаметром около 10 км и лишь в 10...15 % случаев наблюдается более двух куполов.

Всего было совершено 228 проходов около вершин 100 грозových облаков в течение 45 грозových дней.

Была сделана оценка минимальной величины фиксируемого разряда. При этом авторы исходили из следующих соображений. Запись напряженности поля на ленте осциллографа начиналась обычно за 25...30 км от центра облака и велась на периферии на I и II чувствительностях (напряженность поля 500 и 2500 В/м), вблизи центра облака на III чувствительности (до 250 В/м). Согласно данным авторов, переключение на III чувствительность происходило в среднем на расстоянии 7 км от электрического центра облака. Среднее из максимальных полей в слое 0...100 м над облаком составляло 13300 В/м. IV чувствительность (напряженность поля до 2500 В/м) включалась только при входе в облако, но при этом подсчет электрических разрядов не производился.

Примем, что фиксация разряда возможна при отклонении линии записи не менее чем на 1 мм. На I чувствительности это соответствовало скачку напряженности поля 10 В/м, на II чувствительности — 60 В/м, на III чувствительности — 600 В/м. Принимая максимальное расстояние по вертикали от разряда до уровня полета 6 км, элементарно можно рассчитать, что на расстоянии 7 км от центра облака фиксируемый минимальный нейтрализуемый при разряде заряд составлял 3 Кл, на расстоянии 25 км при записи на II чувствительности 6...7 Кл, при записи на I чувствительности — порядка 1 Кл.

По данным авторов, в среднем для ЕТС частота разрядов N из отдельного облака составляет 0,8 разряд/мин, т. е. среднее время между разрядами $\Delta T = 72$ с.

Частота разрядов от отдельных грозových облаков зависит от характера синоптической ситуации, на фоне которой происходит развитие Cb . Исследовались облака внутримассового развития,

а также облака холодных, теплых фронтов и фронтов окклюзии.

Около облаков внутримассового развития совершено 100 проходов, вблизи облаков холодного фронта — 82 прохода, вблизи облаков теплого фронта и фронта окклюзии совершено соответственно 15 и 29 проходов.

Среднее время между разрядами ΔT и среднее квадратическое отклонение его распределения σ для этих четырех групп равно 53,8 и 44,4, 70,0 и 65,4 с; 27,1 и 16,3, 71,9 и 80,2 с соответственно. Наименьшие ΔT и σ наблюдаются для Сb теплых фронтов, однако эти данные нельзя считать надежными из-за малого объема выборки.

Таблица 1

Вероятность (%) ΔT для внутримассовых облаков и облаков холодного фронта

Интервал ΔT , с	Тип облаков		Интервал ΔT , с	Тип облаков	
	внутри-массовые	холодного фронта		внутри-массовые	холодного фронта
0 . . . 20	17,0	29,5	120 . . . 140		8,5
20 . . . 40	44,0	19,4	140 . . . 160	4,0	4,9
40 . . . 60	12,0	11,2	160 . . . 180	3,0	6,3
60 . . . 80	8,0	4,9	180 . . . 200	1,0	
80 . . . 100	4,0	4,9	200 . . . 220	1,0	1,2
100 . . . 120	6,0	4,9	220 . . . 240		1,2
120 . . . 140		8,5			
			Число случаев	100	83
			σ	44,4	65,4

Облака внутримассового развития значительно более активны в электрическом отношении, чем облака холодного фронта. Распределение вероятности ΔT для этих облаков приведено в табл. 1.

В программу исследовательских полетов 1961—1965 гг. входило изучение изменения электрических и аэрологических характеристик облаков в течение всего жизненного цикла от стадии роста до стадии диссипации. В 194 из 228 проходов вблизи исследованных облаков удалось определить стадию развития облака согласно динамической классификации. В 58 проходах, так называемых режимах, совершаемых при неизменной высоте, курсе и скорости самолета, облака находились в стадии Сb calv. Среднее время между разрядами ΔT для этих облаков 80 с, среднее квадратическое отклонение его распределения $\sigma=48$ с. Для облаков, находящихся в стадии Сb calv., Сb inc. (число случаев 54) среднее время между разрядами составляет 67 с, $\sigma=57$ с, для облаков Сb inc. числом 82, $\Delta T=64$ с, $\sigma=64$ с.

Вероятность (%) ΔT для облаков, находящихся на различных стадиях развития, и для облаков с различной высотой верхней границы

Стадия развития Сб	Интервал ΔT , с												Число случаев	с с									
	Интервал ΔT , с																						
	0...20	20...40	40...60	60...80	80...100	100...120	120...140	140...160	160...180	180...200	200...220	220...240			240...260	260...280							
Cb calv.	12,3	33,7	7,0	10,5	5,2	7,0	3,5	7,0	7,0	1,8					1,8							58	48
Cb calv.—Cb inc.	6,7	35,0	11,0	9,3	0,9	7,4	3,8	5,6	7,4	0,9												54	57
Cb inc.	31,3	18,1	19,3	5,9	3,5	2,3	7,2	3,5	3,5	1,1					1,1							82	64
Cb ₊	15,8	33,6	14,0	14,0	3,4	5,4	3,4	3,4	3,4						1,7							54	82,9
Cb ₀	31,6	26,4	7,9	7,9	5,2	2,6	5,2	2,6	5,2	2,6												128	103,1
Cb ₋	6,4	22,6	22,6	6,4	3,2	9,7	6,4	6,4		3,2					3,2							39	117,9
Cb inc. _{+,0}	39,3	17,4	17,4	8,7	4,3			4,4		4,4												23	85
Cb inc. ₋	—	21,0	26,0	4,3	8,6	4,3	8,6	4,3	8,6	4,3					4,3							23	124

Примечание. Cb₊ — растущие облака, Cb₀—облака без изменения высоты верхней границы, Cb₋ —облака с оседающей вершиной.

Распределения вероятности ΔT для всех трех стадий развития Сб приведены в табл. 2.

Согласно динамической классификации стадий развития кучево-дождевых облаков, на стадии Сб calv. происходит рост вершины облака, на стадии Сб calv.—Сб inc. нет заметных изменений высоты верхней границы облака, на стадии Сб inc. начинается оседание вершины облака.

Однако известны случаи, когда наблюдается оседание вершины на стадии Сб calv. и, наоборот, появление новых куполов ранее диссипирующих Сб inc. Малое затухание «жизнедеятельности» и последующая регенерация, по нашим наблюдениям, сопровождаются изменением интенсивности разрядной деятельности, высоты возникновения молниевых разрядов и характера восстановления напряженности электрического поля.

Авторами была изучена связь интенсивности разрядной деятельности с характером изменения высоты верхней границы облака. При этом растущим облакам независимо от стадии развития присваивался индекс «+»; облакам, у которых не наблюдалось заметного изменения высоты верхней границы — индекс «0»; облакам с оседающей вершиной — индекс «-».

Для облаков Сб (число случаев 54) среднее время между разрядами равно 60 с, для облаков Сб₀ (число случаев 128) — 75 с и для

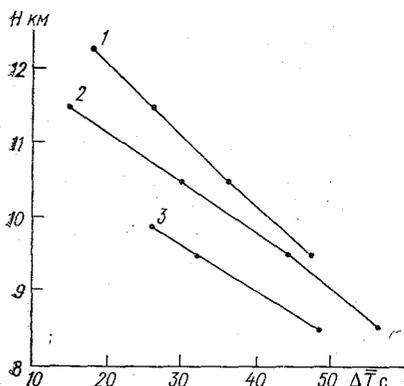


Рис. 1. Среднее время между разрядами ΔT (с) как функция высоты облака H (км) при различных значениях электрической проводимости λ в 10^{-12} См/м.

1 — $4,7 > \lambda > 4,4$, 2 — $4,4 > \lambda > 4,1$, 3 — $4,1 > \lambda > 3,8$.

облаков Сб₋ (число случаев 39) — 97 с.

Аналогичная процедура была проведена отдельно для облаков Сб inc. Облака были разбиты на две группы. В первую вошли Сб inc.₊ и Сб inc.₀, во вторую — Сб inc.₋ (табл. 2). В каждой группе число случаев оказалось равным 23. Полученные значения ΔT для этих групп 56,5 с и 102,3 с.

Приведенные данные показывают, что, хотя ΔT на стадии Сб calv.—Сб inc. несколько меньше, чем на стадии Сб inc., частоту разрядов следует считать наибольшей на последней стадии, поскольку интервал наиболее часто повторяющихся значений ΔT на стадии Сб inc. смещен в сторону меньших значений. Незначительное увеличение ΔT по сравнению со стадией Сб calv. происходит за счет появления нескольких облаков с очень большими ΔT . Характер изменения высоты уровня верхней границы значительно сказывается на величине ΔT , что особенно хорошо ил-

люстрируется диаграммами вероятностей ΔT для облаков $Cb\ inc.+$, $Cb\ inc.oi$ и $Cb\ inc.-$. Характерно резкое увеличение ΔT и ΔT_{max} для $Cb\ inc.-$. Таким образом, для характеристики электрической активности облаков, вероятно, следует рассматривать характер изменения высоты верхней границы облака в его жизненном цикле.

В работе [1] была исследована зависимость ΔT от высоты верхней границы облака и от величины эффективной электропроводности облаков λ . Эта зависимость иллюстрируется рис. 1. По оси абсцисс отложено ΔT , по оси ординат — высота верхней границы облака. Наклонные кривые 1, 2, 3 характеризуют увеличение частоты молниевых разрядов с увеличением высоты верхней границы облака для трех градаций проводимости.

Авторами была сделана попытка установить связь между частотой разрядов на стадии максимального развития электрической активности облаков и средней интенсивностью осадков из

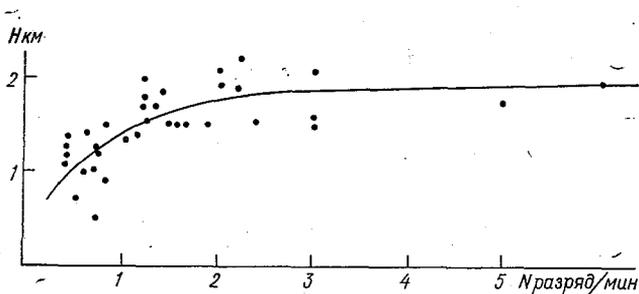


Рис. 2. Зависимость частоты разрядов N от высоты уровня конденсации H .

них в районе исследования, полученной по пювиографическим данным. Результаты исследования для 40 грозовых дней показывают, что для сухих гроз и гроз с интенсивностью осадков $0...0,05$ мм/мин наблюдается наименьшая частота разрядов ($N = 0,7$ разряд/мин). Для следующей градации интенсивности ($0,05...0,1$ мм/мин) имеет место резкое увеличение частоты разрядов до $2,7$ разряд/мин. Дальнейшее увеличение интенсивности осадков не влияет на частоту разрядов молний.

Полученные данные говорят об отсутствии зависимости частоты разрядов от высоты изотермы $0^\circ C$, определенной по данным аэрологического зондирования.

Зависимость между частотой разрядов N и высотой уровня конденсации представлена на рис. 2. Частота разрядов N увеличивается с возрастанием уровня верхней границы облачности. Такой вывод был получен в работе [6]. Можно дать следующее физическое объяснение этого явления. Высокий уровень конденсации возможен только при сочетании двух факторов: низкой влажности у земли и градиентах температуры, близких к адиабатическим.

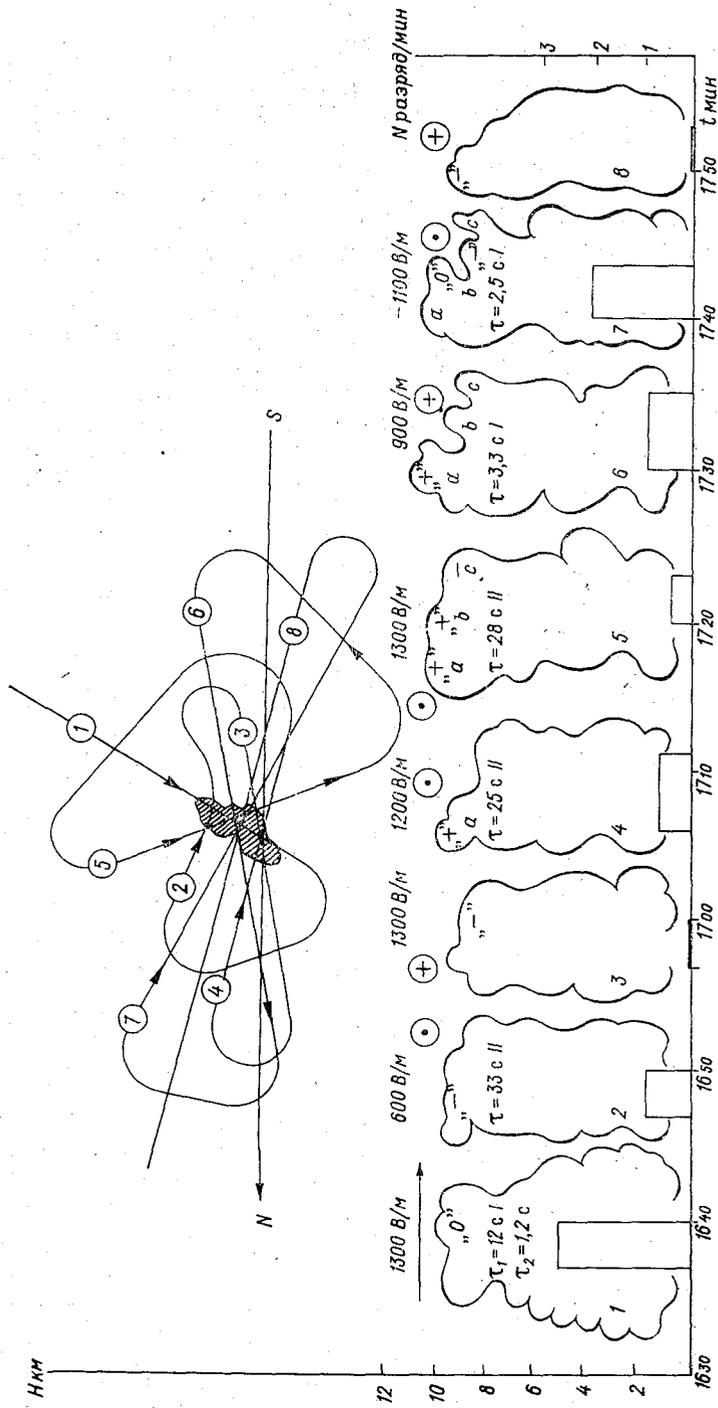


Рис. 3. Изменение электрических характеристик в процессе развития облака, исследованного 27 июля 1965 г. в районе Харькова.

1-8 — номер прохода самолета.

тическим, распространяющихся до больших высот. В этом случае велика вертикальная мощность слоя воздуха, вовлекаемого в конвекцию, а значит, велики и горизонтальные размеры конвективных ячеек. С увеличением же площади конвекции, видимо, возрастает и частота разрядов.

Исследовалась зависимость частоты разрядов от термодинамической неустойчивости на средних уровнях (850...500 мбар). Для характеристики неустойчивости использовался грозовой индекс, предложенный Симиля [6]. Четкой связи между этим грозовым индексом и частотой разрядов авторы не обнаружили.

Комплексное исследование свойств облаков наводит на мысль о взаимосвязи стадий развития облака с частотой разрядов, характером разрядов и формой кривых восстановления напряженности электрического поля после разрядов молнии.

В качестве примера приводится рис. 3, на котором наглядно изображено развитие облака от стадии $Cb\text{calv.}$ до стадии диссипации. Облако принадлежало системе холодного фронта. Исследование облака началось в 16 ч 40 мин и закончилось в 17 ч 55 мин. Около облака сделано восемь проходов. Схема этих проходов относительно облака дана в верхней части рисунка. На рисунке по оси ординат отложены характерные высоты облака и отдельных его куполов, высота полета самолета. Знаками «+», «0», «—» обозначена тенденция изменения высоты верхней границы облака, знаками \rightarrow , \odot , \oplus — схема движения самолета относительно облака мимо зрителя, на зрителя и от зрителя соответственно; «a», «b» и «c» — вновь образовавшиеся купола. Высота столбца, данного в нижней части рисунка, характеризует число разрядов в минуту N , ширина столбца — период времени исследования. На рисунке даны также значения τ — времени восстановления поля после разряда. Цифрами I и II обозначен тип кривой восстановления по классификации, предложенной в работе [3]. Над схематическим изображением облаков даны максимальные значения напряженности поля, измеренные при проходе над облаком.

При оседании облака уменьшается частота разрядов, увеличивается время восстановления напряженности электрического поля τ , изменяется тип кривой восстановления с I на II. Регенерация облака, рост новых куполов приводят к возобновлению разрядной деятельности, при этом τ вновь уменьшается по величине, поле восстанавливается по типу I.

Изучение взаимосвязи динамических и электрических свойств облаков кажется весьма перспективным и составит предмет дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Камалдина И. И. Влияние эффективной электрической проводимости облака на интенсивность грозовых процессов. — Труды ГГО, 1974, вып. 301, с. 120—122.

2. Камалдина И. И. К методике определения времен релаксации электрического поля грозовых облаков после удара молнии.—Труды ГГО, 1969, вып. 242, с. 32—37.

3. Славин И. А. Термодинамика гроз.—Л., ЛВИКА им. А. Ф. Можайского, 1969.—318 с.

4. Филиппов А. Х. Грозы Восточной Сибири.—Л.: Гидрометеониздат, 1974.

5. Шметер С. М. Структура полей метеорологических элементов в зоне кучево-дождевых облаков.—Труды ЦАО, 1969, вып. 88. 119 с.

6. Lundquist S., Israelson S., Jacobson C., Laitinen L. Lightning Discharges under different Meteorological conditions.—Uppsala Universitet, Institutet för Hogspänningsforskning, 1978, unrie: 100—78, 20 p.

В. П. Колоколов, Л. В. Столярчук, Г. П. Павлова

О ВОЗМОЖНОСТИ УСТАНОВЛЕНИЯ СВЯЗИ МЕЖДУ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ГРОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И АЭРОЛОГИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ МЕТОДОМ ДИСКРИМИНАНТНОГО АНАЛИЗА

В последнее время появляются работы, посвященные исследованию комплексного влияния на образование гроз различных метеорологических условий. При этом в качестве математического аппарата применяются статистический метод дискриминантного анализа [1, 2], который позволяет объективным путем выявить роль отдельных факторов атмосферы. Прогноз грозы носит обычно альтернативный характер, а его оправданность оценивается путем визуальных наблюдений грозы на метеорологических станциях.

В настоящей работе делается попытка выявить зависимость интенсивности грозы, характеризуемой числом молний в грозе или их числом в единицу времени, от метеорологических условий. Число молний измерялось счетчиком молний системы ГГО [3], установленным в Воейкове на Центральной полевой базе ГГО. Радиус действия счетчика составлял 100 км. Был использован ряд наблюдений за числом грозных разрядов за период с 1973 по 1978 г. Аэрологические параметры, которые обычно применяются в оперативной практике при составлении прогноза гроз, необходимые для построения численной схемы, были получены с помощью радиозондирования тоже в Воейкове.

Регулярно проводимый анализ термобарических полей показал, что грозы в Ленинградской области за рассматриваемый период возникали преимущественно на холодном фронте, в ложбине глубокого циклона, располагавшегося в районах Скандинавии. В связи с этим в рассматриваемом районе преобладали мощные процессы, формирующие обширные зоны грозовой деятельности.

Для определения возможности возникновения грозы проводился обзор наиболее информативных параметров. Прогностическая зависимость отыскивалась с помощью линейной дискриминантной функции.

В качестве предиктантов рассматривались следующие параметры гроз:

Y_1 — число грозовых разрядов за сутки,

Y_2 — продолжительность грозы (число часовых интервалов с грозовыми разрядами),

Y_3 — среднее число грозовых разрядов за час,

Y_4 — максимальное число разрядов за час.

В качестве возможных предикторов рассматривались следующие аэрологические характеристики:

X_1 — отклонение кривой температуры точки росы ($^{\circ}\text{C}$) от кривой стратификации на уровнях 850, 700, 500 мбар (в дальнейшем именуемое дефицитом точки росы) град.,

Таблица 1

Коэффициенты парной корреляции

Переменные	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
Y_1	1,000								
Y_2	0,508	1,000							
Y_3	0,877	0,244	1,000						
Y_4	0,944	0,416	0,851	1,000					
X_1	-0,018	-0,171	0,071	-0,001	1,000				
X_2	0,144	0,089	0,179	0,165	0,051	1,000			
X_3	0,130	-0,059	0,145	0,135	0,317	-0,023	1,000		
X_4	0,169	0,276	0,125	0,128	-0,154	0,364	-0,199	1,000	

X_2 — высота уровня конвекции (км),

X_3 — высота уровня конденсации (км),

X_4 — скорость вертикальных потоков (м/с).

Для обработки данных использованы стандартные программы пошаговой множественной регрессии и множественного дискриминантного анализа, а также программа расчета частного расстояния Махаланобиса и программа расчета дискриминантного уравнения по Дэвису. Все операции выполнялись на ЭВМЕС-1020. Они проводились с отбором на каждом этапе по схеме последовательного корреляционного, регрессионного и дискриминантного анализов.

Для анализа зависимости между всеми переменными построена матрица коэффициентов парной корреляции (табл. 1).

Как видно из таблицы, характерной особенностью рассматриваемого массива данных является тесная корреляция между предиктантами, вполне выраженная корреляция между отдельными предикторами и значительно более слабая зависимость между предикторами и предиктантами.

Из предиктантов для дальнейшего анализа выбраны Y_4 — максимальное число разрядов за час и Y_2 — продолжительность грозы. Определенный интерес представляет также среднее число разрядов за час, мало связанное с продолжительностью грозы. Общее число разрядов, видимо, является производным от максимального числа ($r=0,944$), среднего числа разрядов за час ($r=0,877$) и продолжительности грозы ($r=0,508$).

Для предикторов следует отметить определенную корреляцию между дефицитом точки росы и высотой уровня конвекции ($r=0,317$), между высотой уровня конвекции и скоростью вертикальных потоков ($r=0,364$). Наличие этих корреляций следует учесть при проведении дискриминантного анализа, когда из двух коррелированных факторов следует выбрать наиболее информативный.

Таблица 2

Группировка данных по максимальному числу грозовых разрядов за час. Средние арифметические величины параметров (a) и средние квадратические отклонения (σ) по группам

Параметр	I		II		III		IV		V	
	a	σ	a	σ	a	σ	a	σ	a	σ
Y_4	301,68	179,3	60,04	17,17	27,88	4,73	13,08	3,70	4,75	1,73
X_1	15,00	5,1	11,68	6,22	15,32	8,36	12,84	7,29	14,96	7,74
X_2	8,84	2,30	9,01	2,46	7,85	2,26	7,97	2,18	7,04	2,38
X_3	1,42	0,38	1,24	0,45	1,19	0,36	1,12	0,51	1,22	0,37
X_4	7,47	3,06	6,82	3,15	7,52	2,94	6,63	3,01	5,59	3,50

Пошаговый регрессионный анализ проведен с ограничением по накопленному сокращенному отношению (0,01) с оценкой значимости регрессии по F -критерию, t -критерию и истинной величине сводного коэффициента корреляции. Для выбранных предиктантов получены следующие уравнения линейной регрессии:

$$Y_2 = 0,404X_4 - 0,092X_1 + 5,188 \quad R = 0,305(0,293);$$

$$Y_4 = 9,159X_2 + 42,905X_3 - 51,382 \quad R = 0,216(0,197).$$

Для первого уравнения критерий Фишера значительно (в три раза) выше табличного. В обоих случаях наблюдается прямая значимая зависимость, выраженная весьма слабо. По значимости коэффициентов регрессии отобраны следующие факторы:

- при анализе данных по продолжительности грозы — скорость вертикальных потоков и дефицит точки росы,
- при анализе максимального числа разрядов за час — высота уровня конвекции и высота уровня конденсации.

Дискриминантный анализ при группировке данных по максимальному числу грозовых разрядов за час выполнен для 124 на-

блюдений. Весь ряд наблюдений, расположенных по величине максимального числа разрядов в убывающем порядке, разделен на пять групп без применения каких-либо критериев. В каждую группу вошло от 22 (группа I) до 28 наблюдений. Средние арифметические величины параметров и средние квадратические отклонения от средних приведены по группам в табл. 2. Следует отметить, что по средним величинам группы различаются достаточно резко. Некоторые сомнения вызывает группа I. Большая величина среднего квадратического отклонения свидетельствует о сильном варьировании в группе.

Таблица 3

Группировка данных по максимальному числу грозовых разрядов

Пре-диктор	Группы									
	I-II	I-III	I-IV	I-V	II-III	II-IV	II-V	III-IV	III-V	IV-V
X ₁	0,346	0,002	0,122	0,000	0,249	0,030	0,221	0,100	0,002	0,080
X ₂	0,005	0,188	0,150	0,589	0,241	0,201	0,661	0,003	0,122	0,166
X ₃	0,202	0,396	0,450	0,278	0,014	0,055	0,001	0,022	0,010	0,054
X ₄	0,043	0,000	0,077	0,328	0,053	0,004	0,137	0,090	0,359	0,102

Для каждой пары групп рассчитаны частные расстояния Махаланобиса по максимальному числу грозовых разрядов (табл. 3) и по продолжительности грозы (табл. 4).

Анализ результатов первого этапа дискриминантного анализа позволяет сделать следующие выводы:

1) для максимального числа грозовых разрядов за час наиболее информативным предиктором (из рассмотренных) является высота уровня конденсации. По этому признаку группа I четко отличается от всех остальных. Остальные четыре группы между собой по этому признаку различаются слабо;

2) группы I и II (наиболее интенсивные грозы) могут быть четко отделены от группы V (наименее интенсивные грозы) по высоте уровня конвекции.

Таблица 4

Группировка данных по продолжительности грозы

Предиктор	Группы		
	I-II	I-III	II-III
X ₁	0,112	0,362	0,088
X ₂	0,018	0,153	0,251
X ₃	0,000	0,194	0,187
X ₄	0,337	0,791	1,100

От остальных групп по этому признаку они отличаются слабо;

3) данные выводы следует рассматривать как предварительные.

Необходимо попробовать другую разбивку на группы, желательно с использованием какого-либо критерия интенсивности.

Таким образом, по пред-

варительным данным дискриминантное уравнение, составленное для прогноза интенсивности грозы (по максимальному числу разрядов за час), должно включать следующие аэрологические характеристики: высоту уровня конденсации, высоту уровня конвекции и, возможно, дефицит точки росы.

Дискриминантный анализ данных по продолжительности грозы выполнен для 127 наблюдений (табл. 5). Значения предикторов распределены по степени убывания продолжительности грозы и сгруппированы в три группы по 27, 68 и 32 наблюдения в каждой. Первую группу составили грозы, наблюдавшиеся в течение 10...24-часовых интервалов (по приборным данным), вторую группу — грозы, длившиеся в течение 3...9-часовых интервалов, и третью — грозы, продолжавшиеся менее 3 ч.

Таблица 5

Группировка данных по продолжительности грозы. Средние арифметические значения (a) и стандартные отклонения (σ) предикторов по группам

Предиктор	I		II		III	
	a	σ	a	σ	a	σ
X_1	11,70	6,21	13,90	6,92	16,23	8,86
X_2	8,17	2,18	8,48	2,37	7,25	2,54
X_3	1,19	0,43	1,19	0,43	1,36	0,37
X_4	8,31	2,49	6,71	3,03	5,69	3,39

Для прогноза продолжительности грозы наиболее информативными предикторами (из рассмотренных) являются скорости вертикальных токов. Эта характеристика позволяет четко отделить наиболее продолжительные грозы от остальных групп. Обобщенное расстояние Махаланобиса для всего комплекса из пяти предикторов групп I и III — 16 832. Группы II и III различаются слабо.

Выводу прогностических уравнений должен предшествовать анализ большего числа повторностей и, видимо, большего числа предикторов.

В заключение следует отметить, что целесообразно провести исследование на предмет установления связей между интенсивностью грозовой деятельности и аэрологическими параметрами методом дискриминантного анализа путем использования в качестве предиктантов данных о числе грозových разрядов, их интенсивности и продолжительности гроз, полученные не в одной точке, как это имело место в настоящей работе, а на сети станций. Такое исследование может быть выполнено, например, на

материале опытной сети станций в Ленинградской области, оснащенных грозорегистраторами системы ГГО. Эта сеть состоит из 15 пунктов и работает в течение восьми лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Песков Б. Е. Исследование метеорологических условий образований гроз последовательным дискриминантным анализом. — Труды ГМЦ СССР, 1977, вып. 185, с. 24—40.
2. Решетов Г. Д. Прогноз дневных и ночных гроз. — Труды ГМЦ СССР, 1977, вып. 176, с. 86—99.
3. Лызар П. С. Полупроводниковые грозорегистраторы. — Труды ГГО, 1964, вып. 157, с. 54—58.

В. П. Колоколов, Г. П. Павлова, К. Б. Шевченко

ОСОБЕННОСТИ ГРОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ В 1978 г.

Становится более или менее достоверным фактом, что грозы при различных синоптических ситуациях обладают разной активностью. Так, например, в Восточной Сибири меньше всего грозовых разрядов наблюдается при грозах, образовавшихся на теплых фронтах. Наибольшее число разрядов приходится на грозы, связанные с фронтами окклюзии [6]. В работе [1] отмечается, что интенсивность внутримассовых гроз значительно меньше фронтальных. Наиболее интенсивные грозы отмечаются на фронтах окклюзии, затем на холодных фронтах. Если классифицировать грозы по их продолжительности, как следует из той же работы, то средняя продолжительность внутримассовых гроз равна 4 ч, фронтальных — 9 ч. Грозы на холодных фронтах более продолжительны, чем на теплых. Аналогичные результаты получены для Ленинградской области. Если говорить о зарубежных территориях, то имеются данные об интенсивности гроз при различных синоптических положениях в Швеции [7] (табл. 1).

Как следует из таблицы, число разрядов, генерируемых грозами, возникающими на холодном фронте, в несколько раз больше, чем число разрядов, генерируемых грозами, возникающими на теплом фронте.

С другой стороны, инструментальные наблюдения за грозами (например, с помощью счетчиков молний) показывают, что в оди-

Таблица 1

Число молний при различных погодных условиях

Погодная система	Процент от общего числа наблюдений	Среднее число разрядов
Холодный фронт	31,0	75
Теплый фронт	14,5	14
Холодная воздушная масса	50,0	50
Теплая воздушная масса	4,5	19

наковых синоптических ситуациях грозы могут различаться по своей интенсивности на один-два порядка.

Обычно официальный прогноз гроз носит альтернативный характер. Он, естественно, не дает ответа на вопрос, какой интенсивности будет гроза.

В настоящей статье приводятся данные о грозовой деятельности в Ленинградской области в 1978 г., полученные путем наблюдений на сети станций грозорегистраторами системы ГГО [3] радиус действия которых 100 км. Одновременно приводятся си-

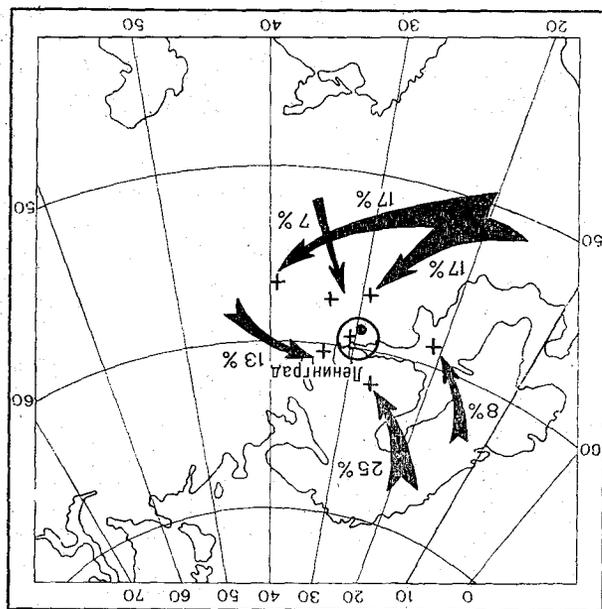


Рис. 1. Сборно-кинематическая карта за летний период 1978 г.

1 — малоподвижные заполняющиеся циклоны (13 %).

ноптические особенности этого грозового сезона на рассматриваемой территории, а также анализируется оправдываемость официальных прогнозов с учетом данных о грозах, полученных с помощью инструментальных наблюдений.

Большое число гроз в Ленинградской области в 1978 г. в значительной степени определялось характером синоптических процессов. Из рассмотрения сборно-кинематической карты движения барических систем за этот период (рис. 1) следует, что в это время почти непрерывно происходило перемещение циклонов из Атлантики и с севера Скандинавии на северо-запад европейской территории Советского Союза.

К моменту выхода на ЕТС каждый из рассмотренных циклонов являлся хорошо выраженным барическим образованием. Над Ленинградской областью преобладало поле пониженного давления. Характерным было наличие высотного циклона над Скандинавией, который являлся регулирующим для всех синоптических процессов. По его западной периферии осуществлялся интенсивный заток влажного холодного воздуха до больших высот. Мезомасштабные восходящие движения достигали 17 мбар за 12 ч. Такие условия при дополнительном дневном прогреве воздуха обусловили развитие 90 % гроз на холодных фронтах.

Циклоны, которые смещались с запада и северо-запада, часто наполнялись над Ленинградской областью, так как значительные нисходящие движения способствовали охлаждению воздушной массы во всей толще.

Для изучения особенностей грозовой деятельности были организованы комплексные наблюдения за грозовой активностью инструментальными методами. Материалы сети грозорегистраторов, состоящей из 17 станций, позволили получить данные, отражающие мезомасштабные особенности грозовой активности.

Для исследования активности и структуры атмосфериков использовался также блок счетчиков из пяти приборов радиусами 150, 100, 50, 25 и 5 км, установленных на Центральной полевой базе ГГО в пос. Воейково.

Из общего количества циклонов, обусловивших фронтальные грозы Ленинградской области, в 67 % случаев имел место их выход из районов северо-запада, 13 % циклонов смещалось с востока, столько же было низких малоподвижных барических образований, заполнявшихся на территории нашего района, и 7 % циклонов имели южные траектории. Над Скандинавией почти весь период стационарировала высотная область пониженного давления. В рассматриваемый сезон антициклонический тип погоды почти не отмечался.

С целью выявления конкретных особенностей погоды летнего периода рассматриваемого района были проанализированы данные наблюдений метеостанций, штормовые оповещения об опасных явлениях, аэрологические диаграммы, с помощью которых вычислялись характеристики состояния атмосферы. Известно, что в развитии Сб вертикальные движения играют важную роль. Воздух становится насыщенным либо благодаря увеличению влагосодержания за счет адвекции и испарения, либо из-за охлаждения, которое зависит от величины восходящего потока. Одним из факторов увеличения конвекции является достаточное влагосодержание воздуха. Так как выше уровня 500 мбар содержится примерно 10 % влаги, то удельная влажность воздуха приводится на трех уровнях: у поверхности земли, на 850 и 700 мбар. На основании работ [4, 5] нами выбраны аэросиноптические параметры, наиболее полно отражающие эволюцию грозового облака: величина максимальной скорости конвективного потока, мощность облака, температура на его верхней границе.

Результаты наблюдений за грозовой деятельностью на сети станций Ленинградской области в 1978 г.

Число, месяц	P	D	L	n ₁	n ₂	\bar{N}	Δt	N ₅	N ₄	N ₃	N ₂	N ₁	T	ΔH	t °C	ψ	q ₃	q _{esp}	q _{тот}
8 VI	1	+	X	16	—	22	7	107	56	11	—	—	1	7,4	-53	11	9	7	4
9 VI	1	—	X	12	0	12	4	—	—	—	—	—	0	4,7	-32	6	9	8	4
26 VI	1	+	X	16	9	16	7	31	7	—	—	—	2	5,1	—	10	9	8	4
27 VI	1	+	X	18	10	61	7	838	417	129	30	9	2	6,8	-49	6	9	6	3
28 VI	0	+	X	18	8	10	4	—	—	—	—	—	1	4,3	-28	6	10	7	4
3 VII	1	+	X	14	9	9	6	146	101	33	15	9	2	6,6	-45	12	7	6	2
5 VII	0	+	X	15	11	48	12	153	59	16	4	—	2	6,6	-25	9	10	5	2
6 VII	1	+	X	15	2	21	10	203	87	13	4	3	1	6,7	-48	10	10	8	5
7 VII	1	+	X	14	13	49	10	199	75	16	5	1	2	4,7	-34	3	11	9	4
11 VII	1	+	X	15	7	38	16	1108	781	408	135	59	2	4,8	-36	4	9	6	3
12 VII	1	+	X	14	2	25	9	311	139	23	5	—	2	5,2	-35	4	9	6	4
16 VII	1	—	X	11	0	8	12	50	17	3	—	—	0	4,3	-29	3	6	5	3
17 VII	1	+	X	14	4	23	11	405	230	56	17	4	2	5,5	-37	5	7	4	2
18 VII	1	+	X	14	6	9	9	118	86	56	27	10	2	6,3	-45	6	8	5	2
19 VII	1	+	X	14	3	8	5	81	56	42	32	19	2	4,7	-32	3	6	3	1
20 VII	1	+	X	15	1	10	10	131	75	23	12	8	2	—	—	11	7	5	2
21 VII	1	+	X	15	11	13	8	332	216	99	29	5	2	6,1	-42	12	8	4	2
22 VII	1	—	X	12	0	11	7	17	4	—	—	—	1	4,5	-26	6	7	5	3
27 VII	1	+	X	12	3	8	9	65	41	15	6	4	1	5,4	-34	9	8	4	3
29 VII	1	+	BM	13	4	10	5	151	85	59	34	13	2	4,2	-28	5	10	6	4
30 VII	1	+	X	11	2	14	3	155	114	49	17	4	2	4,5	-28	13	12	6	4
3 VIII	1	+	BM	18	5	31	8	1188	726	428	94	34	2	7,9	-58	13	11	6	4

4 VIII	1	+	X	17	12	69	10	2104	1280	451	106	37	2	5,9	-42	12	11	7	4
7 VIII	1	+	T	11	4	9	7	35	14	4	2	1	0	4,5	-28	6	7	5	3
8 VIII	1	+	X	14	3	8	6	32	10	—	—	—	0	3,4	-27	6	7	6	3
12 VIII	0	+	X	9	3	10	8	42	18	4	—	—	0	3,2	-28	—	6	4	2
13 VIII	1	+	X	17	3	14	7	95	58	33	20	7	1	5,4	-38	8	8	4	2
14 VIII	1	+	X	13	1	11	4	21	9	1	1	—	0	2,1	-15	11	4	3	1
18 VIII	1	-	X	12	0	17	3	207	89	31	11	3	0	3,9	-29	8	10	7	4
19 VIII	1	+	X	17	8	27	10	314	165	33	12	2	2	5,0	-34	6	11	9	5
20 VIII	1	+	X	17	8	11	6	367	237	95	26	4	2	6,4	-47	11	8	3	2
21 VIII	1	+	X	14	1	8	6	37	15	2	1	—	0	3,9	-25	11	7	5	3
24 VIII	1	+	X	15	2	8	6	87	49	22	9	5	1	5,8	-42	8	8	4	1
25 VIII	1	-	ППД	8	0	11	5	5	4	2	1	—	0	3,2	-20	9	—	5	3
26 VIII	1	+	ППД	16	4	18	7	139	83	19	8	1	1	5,5	—	12	—	3	3
29 VIII	0	+	ППД	13	1	8	4	5	1	1	—	—	0	3,4	—	6	—	4	2

Примечание. P — прогноз погоды (1 — гроза ожидается, 0 — гроза не ожидается), D — оценка прогноза (плюс — оправдался, минус — не оправдался), L — синоптическая обстановка (X — холодный фронт, T — теплый фронт, BM — внутримассовая гроза, ППД — малоградентное поле пониженного давления), n_1 — число станций, отметивших грозу грозо-регистраторами, n_2 — число метеостанций, отметивших грозу, \bar{N} — среднее число разрядов на одну станцию за час, Δt — продолжительность грозы на одну станцию (ч), $N_5 \cdot \bar{N}_1$ — число разрядов, зарегистрированных счетчиками в Боейкове (разряд/сут), I — интенсивность грозы по панорамному грозорегистратору (0 — слабая, 1 — умеренная, 2 — сильная), ΔH — мощность облака (км), t — температура на верхней границе облачности (°C), $\varphi_{\text{в}}$ — вертикальная скорость (м/с), q_3 — влажность на уровне земли, q_{850} — влажность на уровне 850 мбар, q_{700} — влажность на уровне 700 мбар.

Результаты наблюдений за грозами сведены в табл. 2, в которой также приведены прогностические данные.

Структура таблицы дает возможность каждый случай грозы (оправдавшийся, неоправдавшийся) подробно анализировать с разных точек зрения с использованием синоптических, аэрологических, инструментальных и визуальных наблюдений за грозами.

Используя данные, приведенные в табл. 2, можно сделать попытку оценивать прогнозируемые явления количественно, например, числом разрядов, зарегистрированных в одном пункте, средним числом разрядов, зарегистрированных на сети станций, и некоторыми другими количественными грозовыми параметрами.

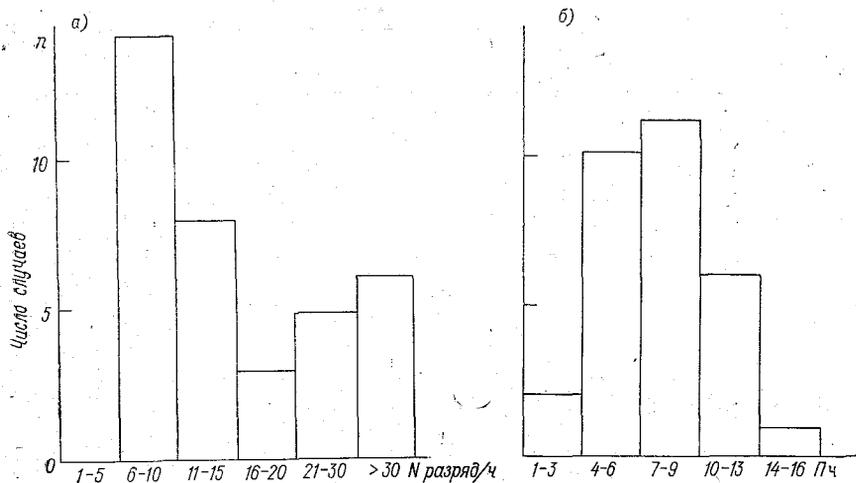


Рис. 2. Повторяемость числа разрядов N (а) и продолжительности гроз Π (б), наблюдавшихся в Ленинградской области в 1978 г.

За летний сезон 1978 г. зарегистрировано счетчиками молний 36 дней с грозами. Предсказывалось 32 грозы, из них пять не оправдалось (по официальной оценке), что составило 15,6%. Не было предсказано, но фактически имели место и были отмечены счетчиками четыре грозы, или 12,5%. Из неоправдавшихся по официальной статистике гроз, но фактически имевших место, в четырех случаях наблюдались слабые грозы и в одном — умеренные грозы. Из непредсказанных гроз в двух случаях наблюдались слабые грозы, в одном — умеренная и в одном — сильная. Деление гроз по интенсивности на три градации носит до некоторой степени условный характер; производилось оно по данным панорамного грозорегистратора [2].

Среднее число разрядов N , приходящихся на одну станцию в час, составляло для всей сети 15, в случае же неоправдавшихся гроз оно было равно 7. В случае непредсказанных гроз число разрядов, приходящееся на одну станцию в час, составляло 10.

На рис. 2 приведены данные о повторяемости различных значений N , зарегистрированных счетчиками ПРГ-100 и приходящихся на одну станцию в час, и данные о повторяемости продолжительности гроз Π в часах, полученные путем регистрации теми же счетчиками.

Коэффициент вариации числа разрядов составляет 80 %, а продолжительности гроз — 25 %.

Что касается связи грозовой активности с аэрологическими параметрами, то наблюдается тенденция усиления грозовой деятельности с увеличением толщины облака, температуры верхней границы и вертикального потока.

В заключение также следует отметить, что визуальные наблюдения на метеостанциях за грозами приводят к значительным пропускам явления.

Выводы

1. Коэффициент вариации числа разрядов составляет 80 %, а продолжительности гроз — 25 %.

2. Наблюдается усиление грозовой активности с увеличением толщины облаков, понижением температуры на верхней границе облака и возрастанием вертикального потока, а также при возрастании удельной влажности у поверхности земли и на уровнях 850 и 700 мбар.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алехина Н. М., Потапкин В. И. Инструментальные исследования грозовой деятельности в районе Томска. — Труды ЗСРНИГМИ, 1976, вып. 21, с. 41—48.

2. Иньков Б. К. Объединение особенностей традиционной аппаратуры в панорамном регистраторе близких гроз. — Труды ГГО, 1977, вып. 350, с. 3—17.

3. Лыдзар П. С. Полупроводниковые грозорегистраторы. — Труды ГГО, 1964, вып. 157, с. 54—58.

4. Песков Б. Е. Исследование метеорологических условий образований гроз последовательным дискриминантным анализом. — Труды ГМЦ СССР, 1977, вып. 185, с. 24—40.

5. Решетов Г. Д. Прогноз дневных и ночных гроз. — Труды ГМЦ СССР, 1977, вып. 176, с. 86—99.

6. Филиппов А. X. Грозы Восточной Сибири. — Л.: Гидрометеоздат, 1974. — 75 с.

7. Lundquist S., Israelson S., Jacobson C., Laitiner L. Lightning Discharges under different Meteorological conditions. — Uppsala Universitet, Institutet för Högspänningsforskning, 1978, unrie: 100—78, 20 p.

В. К. Иньков, Л. Г. Махоткин

ШИРОТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГРОЗОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Привычные общие представления о широтном изменении приземных метеорологических условий, знакомые всем даже без обращения к данным инструментальных наблюдений, приводят к естественному выводу о зависимости интенсивности грозовой деятельности от широты. Более благоприятные термические условия, встречающиеся в среднем при продвижении от полярных зон к тропикам, способствуют (при достаточных запасах влаги) развитию гроз. Независимость суточного хода грозовой деятельности от широты также представляется вполне очевидной, так как наиболее благоприятные условия для развития гроз создаются, естественно, в послеполуденное время при достаточном солнечном прогреве поверхности земли и нижнего слоя атмосферы (в привычных континентальных условиях).

Более детальные оценки грозовой деятельности, выходящие за пределы обычного повседневного опыта, заставляют внести некоторые частные коррективы и дополнения к этим вообще правильным выводам. По крайней мере, в отдельных районах тропической зоны могут почти круглый год встречаться условия, благоприятные для развития гроз, а в средних широтах, вероятно, должны встречаться хотя бы отдельные месяцы, когда (по приземным данным) имеются не менее благоприятные условия. Для проверки этого предположения была сделана дополнительная обработка данных о среднем числе дней с грозой по справочнику ВМО [11]. Из приведенных в нем таблиц для каждой станции выбиралось наибольшее среднее месячное значение числа дней с грозой, характеризующее их вероятность при наиболее благоприятных средних условиях в этом месте. Когда полученные данные были нанесены на график и расположены на нем в зависимости от широты станций, обнаружилось, что огибающая совокупности точек достигает уровня 60..80 % на широтах менее 40°, а на более высоких широтах не превышает 40%. Весьма уместно было припомнить, что на широтах 35—45° наблюдается разрыв между высокой тропической и низкой полярной тропопаузой [2, 3]. Очевидно, что более благоприятные условия для появления гроз, создаваемые облаками вертикального развития, возникают

при достаточно больших вертикальных размерах пространства, ограниченного сверху тропопаузой.

Зависимость типа разрядов от широты далеко не так очевидна из общих соображений. Почти все данные о соотношении числа разрядов различных типов (облако—облако и облако—земля) были получены до сих пор в результате эпизодически проводившихся визуальных наблюдений и поэтому очень ограничены. Обобщив имевшиеся раньше разрозненные данные, Пирс в 1970 г. [9] предложил эмпирическую формулу, характеризующую зависимость процента облачных разрядов p_0 от широты φ :

$$p_0 \approx 90 - \frac{\varphi^2}{90}, \quad (1)$$

в которой φ выражено в градусах, а величина p_0 берется по отношению к общему числу разрядов обоих типов. Вскоре были приведены некоторые дополнительные материалы, подтверждающие эту формулу [7]. Из формулы (1) следует также эквивалентное ей соотношение:

$$r(o/z) \approx \frac{n(o-o)}{n(o-z)} \approx \frac{9 - (\varphi^*)^2}{1 + (\varphi^*)^2}, \quad \text{§ 1 - с. 717} \quad (2)$$

где $n(o-o)$ — число облачных разрядов; $n(o-z)$ — число разрядов на землю; $\varphi^* = (\varphi/30)$. Дальнейшее уточнение формулы (2) и соответственно (1) по более полным данным (с учетом наблюдений, проведенных в СССР [5]) было сделано Прентисом и Макерасом [10], которые получили для интервала $0 \leq \varphi \leq 60^\circ$

$$r(o/z) \approx 4,16 + 3,16 \cos 3\varphi. \quad (3)$$

Изменение величины $r(o/z)$ в зависимости от широты напоминает изменение высоты тропопаузы h_T , для средних значений которых, по-видимому, еще не предлагались эмпирические формулы. Используя в качестве исходных данных средние значения h_T , полученные в [4], можно подобрать подобную формулу для интервала $0 \leq \varphi \leq 70^\circ$:

$$h_T \approx 13 + 3,5 \cos 3\varphi + k \sin 3\varphi, \quad (4)$$

представляющую значение h_T в километрах при $k=1$ для средних годовых величин и $k=2$ для лета со средней квадратической погрешностью $\pm(0,2...0,4)$. Заметим, что в формуле (3) коэффициент k принят равным нулю. Наглядное представление о связи осредненных значений h_T и $r(o/z) = r$ дает рис. 1, на котором сопоставлены средние годовые значения h_T при широт $0, 10...60^\circ$ со значениями r , вычисленными по формулам (2) (светлые кружки) и (3) (черные кружки). Как видно из этого графика, уточненная формула (3) приводит к еще более простой и определенной зависимости r от h_T по сравнению с предварительной формулой (2). По графику, представленному на рис. 1, для интервала $10 \leq h_T \leq 17$ получается соотношение:

$$r \approx 0,6h_T - 4. \quad (5)$$

Трудность представления широтного изменения h_T простой элементарной формулой для любых значений φ (т. е. без ограничения $\varphi \leq 70^\circ$) вызвана, очевидно, тем, что даже осредненные экспериментальные данные передают в сглаженном виде скачок в области разрыва тропопаузы. Характерно, что уточненная формула (3) для параметра r относится также к ограниченному сверху интервалу $\varphi \leq 60^\circ$. Так как экспериментальные данные о типах разрядов и об их соотношении несравненно беднее и отрывочнее данных о высоте тропопаузы, представляется весьма вероятным, что в дальнейшем, при получении более полных материалов о параметре r , будет обнаружен скачок и на его широтной кривой (как известно, разрыв h_T был обнаружен не сразу).

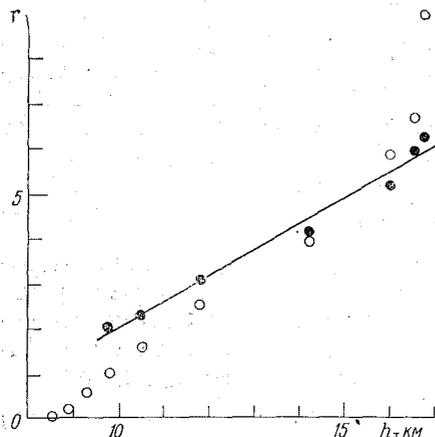


Рис. 1. Связь средних значений отношения числа облачных и наземных разрядов r со средней высотой тропопаузы h_T .

Экспериментальные данные о типе разрядов представляют не только научный, но и большой практический интерес, поэтому в течение многих лет велись поиски инструментальных методов регистрации разрядов определенного типа (на землю), не доведенные пока до конца. Акустические измерения, к которым обратились снова преимущественно в последнее время [6, 8], слишком сложны для широкого распространения и применяются только в исследовательских работах, результаты которых не содержат статистических данных о соотношении числа разрядов различных типов.

Вариант двухчастотного метода приема близких атмосфериков, отличающийся от недостаточно надежных прежних вариантов только выбором близких рабочих частот [1], требует еще тщательной экспериментальной проверки и вызывает ряд вопросов относительно его обоснованности. Визуальные наблюдения за типом разрядов, сравнительно редко проводившиеся до сих пор из-за трудоемкости такой работы, остаются в настоящее время как основным средством контроля разрабатываемых инструментальных методов, так и источником новых экспериментальных данных, необходимых для дополнения имеющихся пока весьма ограниченных материалов по этому вопросу.

В 1976 г. одним из авторов данной статьи (В. К. Иньковым) были организованы визуальные наблюдения за типом разрядов в Северной Провинции Республики Замбия в пункте, расположенном около 10° ю. ш., 32° в. д. К наблюдениям была привлечена

группа из 16 студентов одного из учебных заведений этой провинции. Наблюдения проводились в течение второй половины характерного для этой местности дождливого сезона (в феврале, марте и апреле). Каждый из наблюдателей самостоятельно выбирал время наблюдений, регламентируя его возможностями точного определения типа разрядов. В случае возникновения затруднений в отношении определения типа разрядов наблюдения прерывались, но могли возобновиться снова при наличии подходящих условий. Всего было проведено 295 серий наблюдений, во время которых отмечено 6666 разрядов обоих типов, в том числе 5686 облачных разрядов и 980 разрядов на землю, откуда $p_0 = 83\%$. Таким образом, вычисленные для данной широты значения $p_0 = 89\%$ по формуле (1) и особенно $p_0 = 86\%$ по формуле (3) оказываются близкими к действительной величине p_0 . При расчете p_0 по формуле (3) использовалось очевидное соотношение $p_0 = r/(1+r)$.

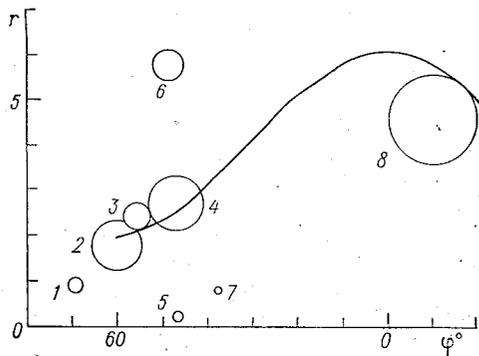


Рис. 2. Зависимость величины параметра r от широты φ по данным наблюдений в Мурманске (1), Ленинграде (2), Москве (3), Ростове-на-Дону (4), Аральске (5), Киеве (6), Ашхабаде (7) и в Замбии, 10° с. ш. (8).

Результаты наблюдений, проведенных ранее в СССР [5], сопоставлены с полученным в Замбии результатом на рис. 2, где кривая вычислена по формуле (3), центры кружков соответствуют найденным значениям r , а площади кружков пропорциональны количеству отмеченных молний. Как показывает график, представленный на рис. 2, наиболее надежные данные, полученные по наблюдениям наибольшего числа молний, располагаются вблизи кривой, вычисленной по эмпирической формуле (3). При уменьшении объема наблюдений разброс значений параметра r и соответственно p_0 резко увеличивается. В частности, распределение значений p_0 , полученных в Замбии по данным каждого из 16 наблюдателей в отдельности, характеризуется величиной стандартного отклонения $\sigma \approx 0,11$, так что для всей серии в целом $\sigma \sim (0,11/\sqrt{17}) \sim 0,03$ и $p_0 = 0,82 \pm 0,03$.

В заключение можно отметить особенность, замеченную при анализе данных наблюдений в Замбии, на которую было обращено внимание еще раньше [1, 6]. При анализе результатов выяснилось, что по количеству отмеченных разрядов на землю всех

наблюдателей можно разделить на две группы. Наблюдатели первой группы (9 человек) отметили в отдельности от 22 до 48 разрядов на землю и в общем итоге подсчитали 3558 разрядов всех типов при $r \approx 8$. Наблюдатели второй группы (7 человек) отметили от 75 до 106 разрядов на землю и в сумме подсчитали 3108 разрядов при $r \approx 3$. По этим данным общее увеличение интенсивности грозовой деятельности ведет прежде всего к абсолютному и относительному росту числа облачных разрядов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алехина Н. М., Дульзон А. А., Потапкин В. И. Доля наземных разрядов в грозах при различных синоптических условиях. — Труды ЗСРНИГМИ, 1978, вып. 36, с. 89—94.
2. Блютген И. География климатов, т. 2. — М.: Прогресс, 1973. — 402 с.
3. Курбанов Г., Тагаймурадов Ю. Т. Об аэроклиматографии субтропического разрыва тропопаузы. — В кн.: Анализ и прогноз метеорологических полей и вопросы мезометеорологии. Ташкент: ФАН, 1977, с. 42—45.
4. Маховер З. М. О распределении высоты тропопаузы над земным шаром. — Труды ВНИИГМИ — МЦД, 1976, вып. 34, с. 3—15.
5. Семенов К. А. Соотношение между числом внутриоблачных разрядов и разрядов на землю. — Труды ГГО, 1967, вып. 204, с. 68—69.
6. Фью А. Гром. — Успехи физических наук, 1976, т. 119, № 4, с. 735—748.
7. Sangnon S. A. Comments on the "Latitudinal variation of lightning parameters". — J. Appl. Met., 1970, vol. 9, N 4, p. 720—722.
8. Nakano M. Characteristics of lightning channel in thunderclouds determined by thunder. — J. Met. Soc. Japan, ser. 2, 1976, vol. 54, N 6, p. 441—447.
9. Pierce E. T. Latitudinal variation of lightning parameters. — J. Appl. Met., 1970, vol. 9, N 1, p. 194—195.
10. Prentice S. A., Mackerras D. The ratio of cloud to cloud-ground lightning flashes in thunderstorms. — J. Appl. Met. 1977, vol. 16, N 5, p. 545—550.
11. World distribution of thunderstorm days, part 1. Geneva, WMO/OMM N 21, TP 6, 1953, 204 p.

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ГРОЗ НА ЗЕМНОМ ШАРЕ

Данные о продолжительности гроз представляют интерес как с точки зрения оценки вклада грозовой деятельности в поддержание заряда Земли, так и для практических целей электроэнергетики. Основная трудность при обобщении данных о продолжительности гроз на земном шаре состоит в том, что в относительно малом количестве стран производятся регулярные наблюдения за этой характеристикой. По этой причине наряду с использованием прямых наблюдений за продолжительностью гроз в настоящей работе была выявлена функциональная связь средней годовой продолжительности гроз (Π) с числом дней с грозой (T). Затем для трех регионов, для которых отсутствуют материалы непосредственных наблюдений за продолжительностью гроз, по данным о числе дней с грозой [10] рассчитывались средние годовые значения Π .

При построении карты продолжительности гроз на земном шаре были использованы материалы наблюдений около 1500 метеорологических станций СССР, а также данные зарубежных станций: Австралии, Австрии, Великобритании, Венгрии, Вьетнама, ГДР, Индии, Норвегии, Польши, Румынии, Сингапура, США, Финляндии, ФРГ, Швеции, Швейцарии, Чехословакии, ЮАР, Югославии [3, 7, 8, 9]. Из общего числа зарубежных станций (около 300) 56 находится в областях сильной грозовой деятельности ($T=80\ldots 130$ дней) [4, 5, 6] и поэтому данные этих станций представляют наибольший интерес. Детальное исследование связи $\Pi=f(T)$ привело к следующему результату. Для районов с очень слабой грозовой деятельностью ($T=0\ldots 5$ дней) уравнение регрессии имеет вид:

$$\Pi = 0,6T. \quad (1)$$

Для интервала значений $T=5\ldots 15$ дней зависимость между Π и T выражается формулой:

$$\Pi = T. \quad (2)$$

Интервалу значений $T=15\ldots 40$ дней соответствует функциональная связь между Π и T , которая выражается уравнением:

$$\Pi = 3,3(T - 10). \quad (3)$$

И, наконец, для широкого интервала значений $T=40\text{--}130$ дней связь между Π и T удовлетворительно описывается следующим уравнением:

$$\Pi = 0,14T^{1,7}. \quad (4)$$

Рассматривая функциональную зависимость $\Pi=f(T)$, можно отметить, что найденная в работе [1] зависимость $\Pi=f(T)$ для всех станций отдельных УГКС близка к полученной автором зависимости для отдельных станций в интервале значений $20 \leq T \leq 40$ дней.

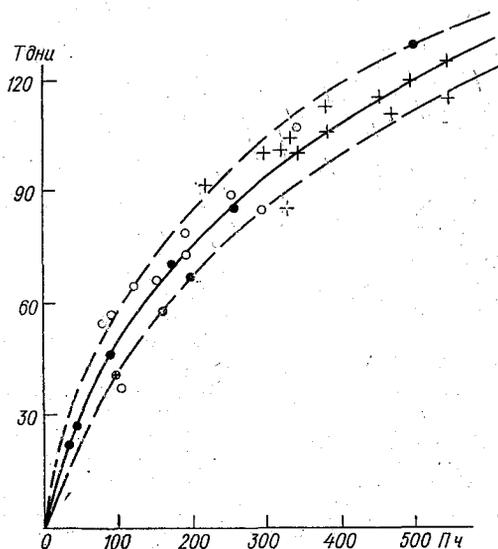


Рис. 1. Зависимость средней за год продолжительности гроз Π от числа дней с грозой.

Зависимость Π от T для широкого интервала значений Π ($0 \leq \Pi \leq 600$ ч) представлена на рис. 1. Для того чтобы не заполнять рисунок большим количеством экспериментальных точек, на нем нанесена линия регрессии, определяемая по методу наименьших квадратов.

Разброс S определялся по формуле из работы [2]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(T' - T)^2}{N}}, \quad (5)$$

где T' и T — число дней с грозой, определенное с помощью линии регрессии, и фактически наблюдаемое; N — число случаев наблюдений. На рис. 1 величина разброса обозначена пунктирными линиями.

Исследования показали, что коэффициент вариации связи $\Pi=f(T)$ изменяется от 0,3 при значениях $T=10$ дням до 0,1 при значениях $T=100$ дням. Величины разброса S и коэффициента вариации C_v для разных T приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что с увеличением T наблюдается увеличение S и уменьшение C_v соответственно. Таким образом, в зонах интенсивной грозовой деятельности наблюдается более тесная связь между Π и T .

Построенная по указанной выше методике карта средней годовой продолжительности гроз на земном шаре представлена на рис. 2. Изолинии на рис. 2 обозначают среднее за год значение Π в часах. Рассматривая сезонные изменения продолжительности гроз на земном шаре, можно отметить следующие ее особенности.

Таблица 1

Изменение S и C_v связи $\Pi=f(T)$ в зависимости от T

T дни	10	20	40	60	80	100	120
S дни	3,0	3,5	7,8	9,0	9,8	10,5	11,5
C_v	0,3	0,17	0,19	0,15	0,12	0,10	0,09

В период лета северного полушария (июнь, июль, август) грозы в основном наблюдаются на континентах северного полушария. При этом для Евразии и Северной Америки карта продолжительности гроз для летнего периода мало отличается от карты средней годовой продолжительности гроз на земном шаре. В мировых очагах гроз средняя за квартал продолжительность гроз в 3—5 раз меньше средней годовой. Практически отсутствуют грозы в Австралии.

В осенний период (сентябрь, октябрь, ноябрь) резко уменьшается грозовая деятельность на континентах северного полушария. Весь широтный пояс $40-70^\circ$ с. ш. имеет среднюю за год продолжительность $\Pi < 5$ ч, усиливаются грозы на юге Африки, в Южной Америке и в Австралии. Усиливается грозовая деятельность над морями и океанами.

В зимний период (декабрь, январь, февраль) на континентах северного полушария грозы отсутствуют. Наблюдается заметная грозовая деятельность ($\Pi=10$ ч) над Средиземным морем. Несколько ослабевает грозовой очаг в Южной Америке, смещается к югу африканский очаг. Значительно усиливаются грозы в Северной Австралии ($\Pi=100$ ч).

В весенний период (март, апрель, май) в широтном поясе северного полушария $40-70^\circ$ с. ш. значение продолжительности гроз находится в пределах $0=\Pi=5$ ч. Наблюдается значительное увеличение продолжительности гроз на юге Азии и на юге Северной Америки.

Таким образом, в годовом ходе продолжительности гроз на земном шаре летом определяющим является северное полушарие,

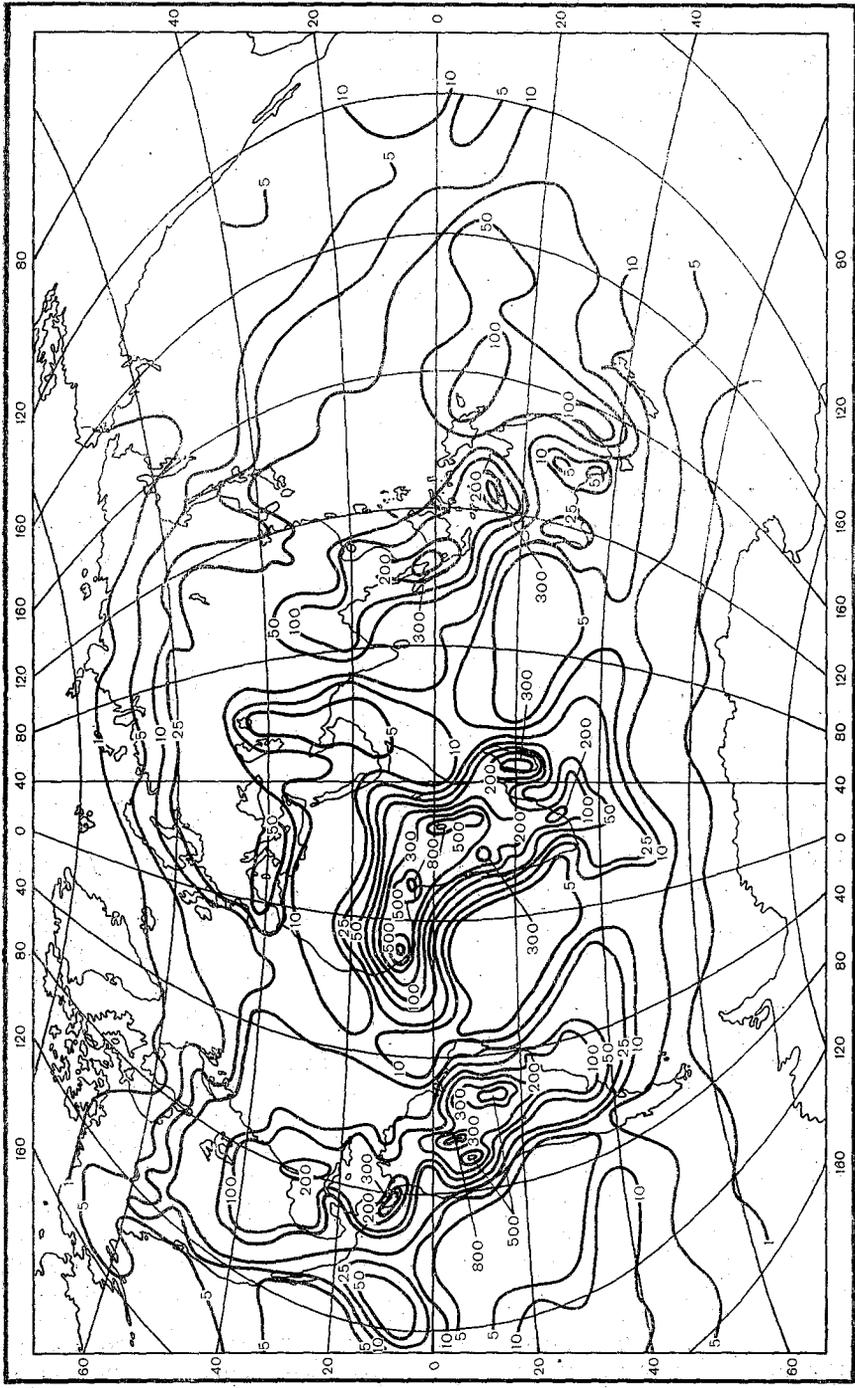


Рис. 2. Карта средней годовой продолжительности гроз на земном шаре.

а зимой — южное. В весенний и осенний периоды грозовая деятельность в основном определяется приэкваториальными областями обоих полушарий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колоколов В. П., Павлова Г. П. Соотношение между некоторыми грозовыми параметрами. — Труды ГГО, 1972, вып. 277, с. 38—41.
2. Пановский Г. А. Статистические методы в метеорологии. — Л.: Гидрометеоздат, 1967. — 224 с.
3. Илиеску М. Изучение грозовых явлений на территории Румынии. — Rev. Roum. de geologie, geoph. et geogr., 1973, vol. 17, N 1, p. 33—37.
4. Anderson R. B., Niekerk H. R. Eighth progress report on the development and testing of lightning flash counters in the Republic of South Africa during 1975/76. — Nat. elect. eng. res. inst. coun. for sci. and industr. res., CSIR special rep., ELEK 101, Pretoria, 1976.
5. Eriksson A. I. The measurement of lightning and thunderstorm parameters. — Nat. elect. eng. res. inst. coun. for sci. and industr. res., CSIR special rep., ELEK 51, Pretoria, 1974.
6. Manh D. Thunderstorm distribution on North Vietnam. — Materialy i prace Zakl. geofiziki, 1968, N 28, p. 112—126.
7. Meteorologische Beobachtungen in Finland im Jahre 1945—1975. Helsinki, 1956—1976.
8. Meteorologische Jahrbuch der Deutschen Demokratischen Republik 1962—1973. Meteorologischen Dienst der DDR, Potsdam, 1964—1974.
9. Meteorological observations in Sweden. — Sveriges Meteor. och hidrol. inst., Stockholm, 1954—1974.
10. World distribution of thunderstorms days, part 1. Geneva, WMO/OMM, N 21, TP 6, 1953, 204 p.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОГО ЧИСЛА РАЗРЯДОВ НА ЗЕМНОМ ШАРЕ

Мировая карта распределения числа разрядов на землю была составлена и опубликована В. П. Колоколовым 10 лет назад [1]. Данные об общем числе разрядов различных типов (облако — облако и облако — земля) также представляют известный интерес, но сводка полученных результатов еще не была представлена в литературе. Исходным материалом для построения макета карты общего числа разрядов (N_{Σ}) могут служить пока только данные метеорологических наблюдений за числом дней с грозой (T) и суммарной продолжительностью гроз (P), связываемое с искомой величиной эмпирическим соотношением, подобным соотношению между числом разрядов на землю N и T или соответственно P [1]. Для определения зависимости N_{Σ} от T были использованы годовые значения T и P , полученные по наблюдениям 10 станций Советского Союза, расположенных в различных физико-географических условиях. Данные об общем числе разрядов N_{Σ} на этих станциях были получены с помощью установленных на них счетчиков молний типа ПРГ [2]. По нанесенным на графики 109 точкам соотношение между N_{Σ} (числом разрядов всех типов на 1 км²), T и P (в часах) для пунктов, где $T \leq 40$ дней, можно представить приближенными формулами:

$$N_{\Sigma} \approx 0,06T^{1,82}, \quad (1)$$

$$N_{\Sigma} \approx 0,085P^{1,4}, \quad (2)$$

причем разброс точек характеризуется коэффициентами вариации $C_v \leq 0,35$ (при сопоставлении N_{Σ} и T) и $C_v \leq 0,25$ (для N_{Σ} и P). Для тех районов земного шара, где $T > 40$ дней, величина N вычислялась по данным Пополанского [5] с учетом зависимости соотношения количества облачных и наземных разрядов от широты φ по формуле, выведенной в работе [6].

Необходимо отметить, что соотношение, связывающее N_{Σ} с T , получено для континентальных условий. Применение этой зависимости для океанов требует своего обоснования. Для этого по данным работы [3] по пяти широтным поясам восточного побе-

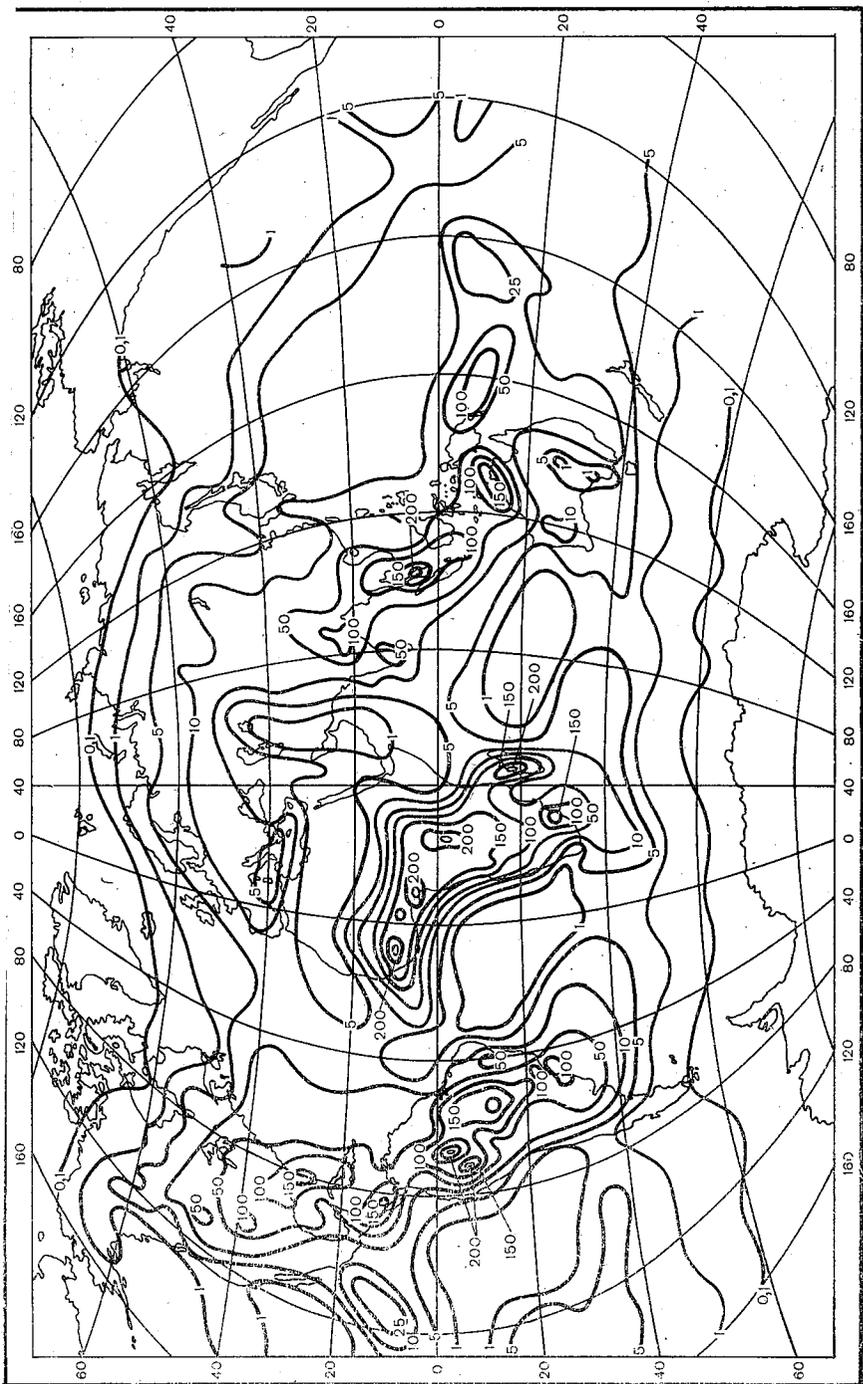


Рис. 1. Карта суммарного распределения числа грозных разрядов.

режья Атлантического океана была построена зависимость числа очагов атмосфериков $N_{0,a}$ от расстояния до берега. Число очагов атмосфериков нормировалось по отношению к данным прибрежной зоны. Так как $N_{0,a}$ пропорционально N_z [1], полученные закономерности могут быть с известным основанием перенесены на число разрядов. Результаты проведенной обработки данных показали, что изменение $N_{0,a}$ в зависимости от расстояния до побережья соответствует изменению T . Следовательно, имеются основания считать, что для расчета N над океанами можно пользоваться соотношениями, полученными для континентов. При проведении соответствующих расчетов сведения о распределении T брались по данным ВМО [4]. Построенная таким образом мировая карта общего числа разрядов представлена на рис. 1, где изолиниями показано среднее число грозовых разрядов на 1 км^2 в год.

Имея карту распределения общего числа грозовых разрядов на земном шаре, можно подсчитать среднее число грозовых разрядов, появляющихся в единицу времени на всей нашей планете. По данным расчета автора, в течение года на земном шаре возникает примерно $8,5 \cdot 10^9$ разрядов, т. е. около 270 разрядов в секунду, в том числе 50 наземных и 220 облачных разрядов. Над континентами в среднем появляется 170 разрядов в секунду, а над океанами около 100 разрядов. Мировые центры гроз ($T \geq 100$ дней) генерируют около 25 % общего числа разрядов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колоколов В. П. О характеристиках глобального распределения грозовой деятельности. — Метеорология и гидрология, 1969, № 11, с. 47—55.
2. Лыдзар П. С. Полупроводниковые грозорегистраторы. — Труды ГГО, 1964, вып. 157, с. 58—62.
3. Соловьев В. А. Грозовая активность в районах северо-восточной Атлантики и Западной Европы по данным об атмосфериках. — Труды ГГО, 1965, вып. 177, с. 31—36.
4. Israëli H. Atmospheric electricity. Vol. 2. — Jerusalem, 1973. — 795 p.
5. Fujitaka S. Investigation on the results the observation using the Pierce-Golde type lightning flash counter in Japan. — A report presented to the 4-th International conference on atmospheric and space electircity. Tokio, 1968, 16 p.
6. Prentice S. A., Mackerras D. The ratio of cloud-ground lightning flashes in thunderstorms. — J. Appl. Met., 1977, vol. 16, N 5, p. 545—550.

ОПЕРАТИВНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ГРОЗ ПАНОРАМНЫМИ РЕГИСТРАТОРАМИ, УСТАНОВЛЕННЫМИ В ДВУХ ПУНКТАХ

Обычно первым требованием к оперативной информации является быстрота получения данных, указывающих на появление или развитие тех явлений, за которыми непрерывно проводятся наблюдения.

Для выяснения оперативности поступления информации о грозах проанализирована работа станций штормового кольца АМСГ Кировоград за два периода: 1974—1975 и 1976 гг. В телеграммах со штормовой информацией указывается время начала (конца) явления и время поступления оповещения о нем в пункт назначения. По этим данным

вычислены значения $\Delta t_{\text{н}}$ — время между началом отмеченной грозы и приемом информации об этом и $\Delta t_{\text{к}}$ — время задержки информации о конце наблюдавшейся грозы. В результате статистической обработки полученных данных выяснилось, что распределение существенных положительных значений $\Delta t_{\text{н}}$ и $\Delta t_{\text{к}}$ с удовлетворительной точностью описывается нормальным законом [1] и представляется прямыми линиями, на графике которого при использовании вероятностной шкалы по оси ординат для $P(\Delta t)$ превышения данного значения Δt

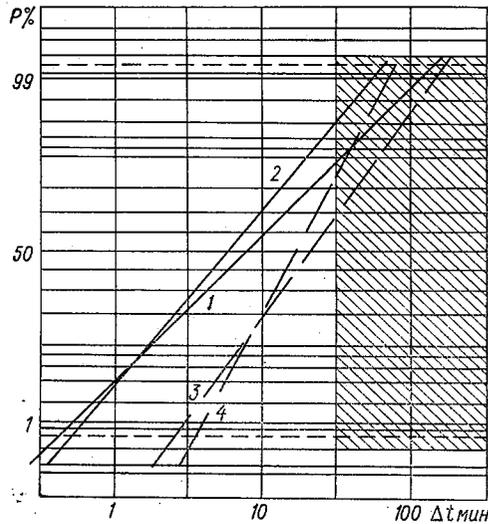


Рис. 1. Вероятное время прохождения штормтелеграмм.

1 — $\Delta t_{\text{н}}$ за 1974—1975 гг., 2 — $\Delta t_{\text{н}}$ за 1976 г.,
3 — $\Delta t_{\text{к}}$ за 1974—1975 гг., 4 — $\Delta t_{\text{к}}$ за 1976 г.

и логарифмической шкалы для аргумента Δt (рис. 1). Параметры полученных распределений значений Δt_n и Δt_k , найденные после обработки материалов за два периода (1 — за 1974—1975 гг., 2 — за 1976 г.), вместе с другими статистическими характеристиками представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1 и рис. 1, время, затрачиваемое только на передачу информации даже при современной технике связи, отнюдь не пренебрежимо мало, а, наоборот, составляет вполне заметную величину по сравнению с длительностью контрольного срока (30 мин), установленного руководящим документом для подачи штормовых предупреждений [5]. Действительно, уже среднее время прохождения телеграмм о начале грозы составляет 10...15 мин (увеличиваясь для сообщений о конце грозы до 20...

Таблица 1

Характеристика времени передачи данных Δt_n и Δt_k

Величина	Период	n	M мин	σ дБ	C мин	$(n \dots n)$ мин
Δt_n	1	454	8	10	16	3...26
	2	228	6	8	9	2...16
Δt_k	1	405	21	7	30	9...48
	2	223	17	5	20	9...31

Примечание. n — общее число телеграмм, M — медианные значения Δt , σ — стандартные отклонения в децибеллах (дБ), C — средние значения Δt , $(n \dots n)$ — интервалы значений Δt от $-\sigma$ до $+\sigma$.

30 мин). Если же говорить об отдельных телеграммах со станций, то с опозданием более 30 мин приходит до 4...10 % сообщений о начале грозы и примерно 20 % о конце грозы.

Результаты, полученные на примере анализа группы конкретных данных, показывают, что старая методика визуальных наблюдений за грозами на метеостанциях даже в сочетании с новейшей техникой связи приходит во все большее противоречие с современными требованиями.

Наиболее эффективное увеличение оперативности, полноты и объективности информации о грозах может быть достигнуто путем использования данных однопунктных инструментальных наблюдений за атмосфериками.

В работах [3, 4] дается достаточно ясное и наглядное представление об эффективности практического применения панорамного регистратора близких гроз [2] при оперативном метеообеспечении полетов на одной АМСГ. В дальнейшем, при оснащении панорамными регистраторами широкой сети АМСГ, появится возможность использования данных инструментальных наблюдений

за грозовой деятельностью в районе аэродрома и в зоне штормового кольца любой АМСГ всеми заинтересованными подразделениями Госкомгидромета и гражданской авиации. Поэтому уже сейчас представляет интерес анализ возможностей взаимного обмена данными и использования их в оперативной работе АМСГ, а также летного и диспетчерского состава гражданской авиации.

Обмен сведениями о грозовой деятельности по результатам инструментальных наблюдений может производиться в соответствии с существующими правилами, регламентирующими переда-

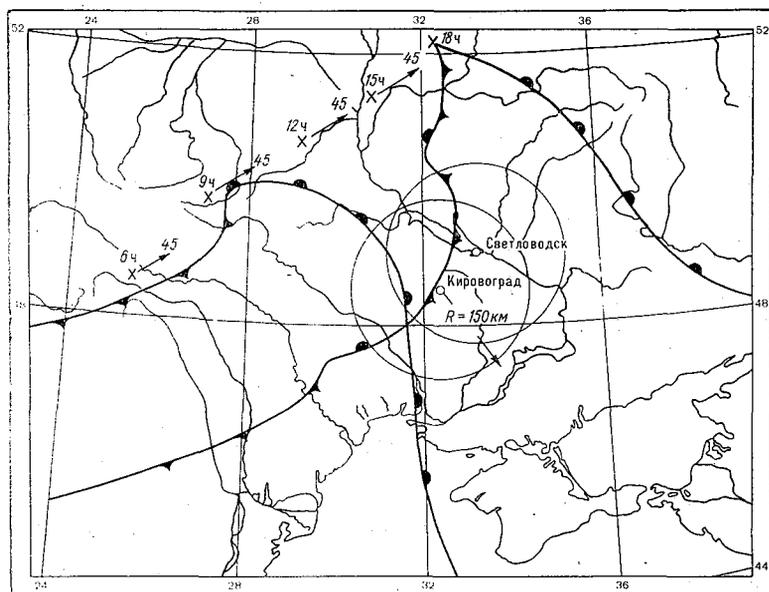


Рис. 2. Синоптическая обстановка 18 июня 1978 г.

Крестиками отмечено положение центра циклона, стрелками показано его направление; цифры на конце стрелок — скорость движения циклона (км/ч).

чу метеорологической информации [5]. Эти сведения должны включаться в текст ежечасной и получасовой телеграмм с авиацией аэродрома, передаваемых в другие аэропорты по средствам связи гражданской авиации, системам прямых авиационных связей (СПАС) и Министерства связи (МС), а также передаваться по радиоканалам УКВ (погода своего аэродрома) и сообщаться экипажам воздушных судов при проведении предполетной метеоконсультации.

Летный и диспетчерский состав при получении инструментальных данных о грозовой деятельности должен уточнить местоположение грозовых очагов по имеющимся наземным или самолет-

ным радиолокационным средствам, оценить опасность создавшейся обстановки, принять решение о возможности обхода гроз и дальнейшей летной работе.

В весенне-летний сезон 1978 г. панорамные регистраторы близких гроз работали на АМСГ Кировоград [3] и Кременчугской гидрометобсерватории (ГМО) в г. Светловодске, который расположен в 97 км северо-восточнее Кировограда. Обнаружение гроз приборами, установленными в двух пунктах, позволило повысить качество и оперативность метеообеспечения народно-хозяйственных организаций, обслуживаемых АМСГ и ГМО, а также накопить определенный опыт использования получаемых данных. Рассмотрим характерный пример комплексного использования данных инструментальных наблюдений и синоптической обстановки при анализе развития грозовой деятельности на АМСГ и в ГМО.

18 июня 1978 г. синоптическая обстановка в центральных и западных районах Украины обуславливалась молодым углубляющимся циклоном, центр которого на кольцевой карте за 6 ч располагался в районе Ивано-Франковска и перемещался на северо-восток со скоростью 45 км/ч. Падение давления в центре достигало 3...4 мбар (рис. 2). Погода в Кировограде и Светловодске в первой половине дня была обусловлена передней частью циклона, при этом теплый фронт проходил по линии Ивано-Франковск, Бухарест, Варна, Стамбул, двигался в сторону Кировограда со скоростью 36 км/ч. Теплый фронт прошел циклон около 13 ч. После прохождения фронта условия погоды в Кировограде обуславливались неустойчивой воздушной массой теплого сектора циклона. С запада со скоростью около 50 км/ч приближался холодный фронт, на котором появились волновые возмущения (на рис. 2 положение атмосферных фронтов показано на 9 и 18 ч).

По картам за 6, 9 и 12 ч грозы не отмечались, хотя в зоне теплого фронта наблюдалась большая неустойчивость, а также кучево-дождевые облака, сопровождавшиеся ливневыми осадками.

Прибор, установленный на АМСГ, начал регистрировать грозовую деятельность на западе в 14 ч 50 мин и на северо-западе в 15 ч 27 мин (рис. 3 а). По картам за 15 ч грозы отмечались в этих же направлениях в пунктах Канев (156 км), Озерная (121 км), Умань (157 км) и были связаны с приближающимся холодным фронтом. По известной скорости перемещения фронта было рассчитано время его подхода и начала грозы в Кировограде. По расчету гроза в Кировограде должна была начаться в 18 ч и продолжаться до 18 ч 30 мин. Фактически наблюдатели отметили ее в 18 ч 25 мин. Информация о начале грозы по прибору на АМСГ была передана в ГМО, где она была учтена при составлении прогнозов погоды. Прибор, установленный в ГМО, начал отмечать грозовую деятельность на западе в 16 ч 21 мин и на севере в 16 ч 30 мин (рис. 3 б), когда фронт приблизился к Светловодску на 120...150 км. Непосредственно в Светловодске

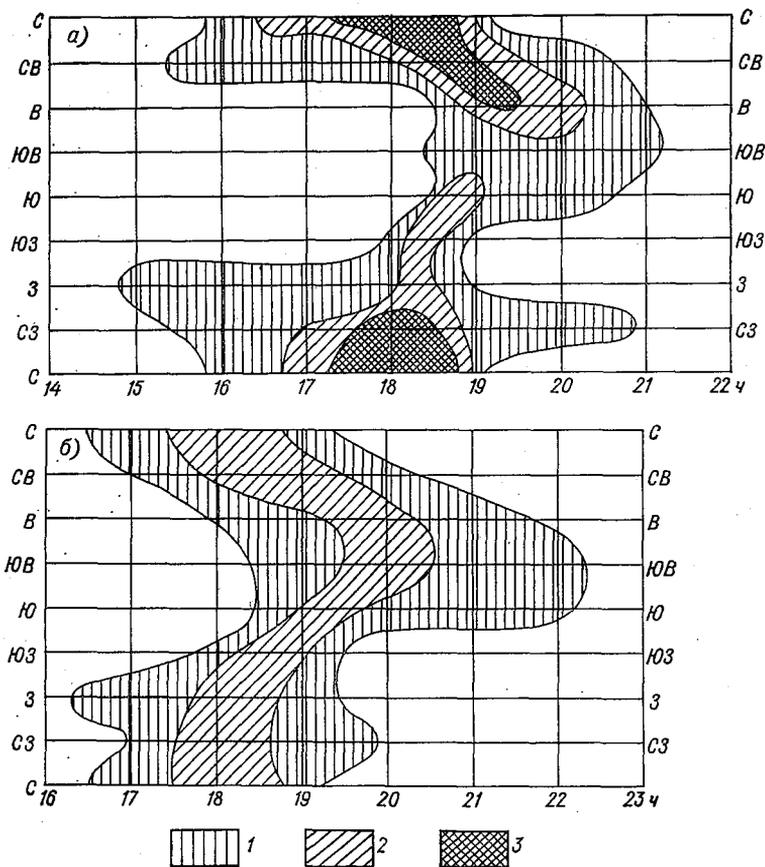


Рис. 3. Развитие грозовой деятельности по записям панорамных регистраторов 18 июня 1978 г.

a — Кировоград, *б* — Светловодск. Количество зарегистрированных разрядов представлено в обобщенном виде по градациям: 1 — до 20 разряд/ч, 2 — от 21 до 50 разряд/ч, 3 — более 50 разряд/ч.

гроза была отмечена в 17 ч 58 мин. По мере удаления фронта от Кировограда и Светловодска интенсивность гроз постепенно ослабевала и после 21 ч они практически прекратились. По картам погоды за 21 ч грозы отмечались только в районе Кривого Рога, располагающегося в 102 км юго-восточнее Кировограда. Перемещение и развитие грозовой деятельности хорошо видно на рис. 3. Совместный анализ обнаружения гроз приборами в двух пунктах позволил заблаговременно предусмотреть время начала и перемещения грозы и интенсивность грозовой деятельности в данном районе.

Результаты проведенного анализа, а также положительный опыт работы АМСГ и ГМО подтверждают целесообразность об-

наружения гроз панорамными регистраторами на всех АМСГ, необходимость организации взаимного обмена результатами однопунктных наблюдений между заинтересованными подразделениями Госкомгидромета (для комплексного использования общей синоптической обстановки и инструментальных данных при обеспечении безопасности полетов судов гражданской авиации) и другими народно-хозяйственными организациями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абергауз Г. Г. и др. Справочник по вероятностным расчетам/ Г. Г. Абергауз, А. П. Тронь, Ю. Н. Копейкин, И. А. Коровина. — М.: Военное изд-во, 1966. — 408 с.
2. Иньков Б. К. Объединение особенностей традиционной аппаратуры в панорамном регистраторе близких гроз. — Труды ГГО, 1977, вып. 350, с. 3—17.
3. Лещенко Г. П., Тысянчук Н. М. Примеры использования панорамного регистратора гроз при метеообеспечении авиации. — Труды ГГО, 1977, вып. 350, с. 18—22.
4. Лещенко Г. П. Автоматическая сигнализация о грозовой деятельности. — Труды ГГО, 1977, вып. 350, с. 23—26.
5. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации (НМО ГА-73). — Л. Гидрометеиздат, 1973. — 137 с.

Л. Г. Махоткин, Б. К. Иньков, В. И. Синегубов

СОПОСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ ПАНОРАМНЫХ РЕГИСТРАТОРОВ БЛИЗКИХ ГРОЗ ПРИ ЧАСТИЧНО ПЕРЕКРЫВАЮЩИХСЯ РАБОЧИХ ЗОНАХ

Панорамные регистраторы близких гроз [5, 6] предназначены главным образом для автономной работы в оперативных подразделениях Госкомгидромета, где получаемая информация используется непосредственно на месте. Пеленгование близких гроз с нескольких пунктов, применявшееся иногда в исследовательских работах [7, 11], без мгновенной автоматической передачи пеленгов в пункт, где должны использоваться эти данные, не удовлетворяет требованиям в отношении оперативности, а большая отбраковка несинхронных отсчетов приводит к недостаточной полноте результатов. Погрешности самих пеленгаторов с магнитными (рамочными) антеннами уже не играют решающей роли при оценке возможностей применения такой методики наблюдений, потому что при правильной настройке аппаратуры ошибки достаточно ограничены [3] и значительно меньше тех преувеличенных значений порядка десятков градусов, которые еще попадают в литературу [8]. Таким образом, сложность организации и обеспечения работы всей системы из нескольких пунктов, а не отдельных ее элементов, является главной причиной практической необходимости использования однопунктных методов наблюдений за близкими грозовыми очагами (тогда как для дальних наблюдений это обусловлено и принципиальными факторами). Лишь в очень редких случаях, например, при детальном исследовании распределения грозовой деятельности в районе самых больших городов [2, 10], представляла бы интерес организация на весьма ограниченной площади очень густой сети пунктов, снабженных простейшими приборами — счетчиками близких грозовых разрядов, характеризующими только интенсивность гроз без каких-либо указаний относительно направления.

При сравнительно широких секторах, принятых в панорамных регистраторах для записи распределения грозовых очагов по восьми румбам, сопоставление данных наблюдений в двух пунктах не может существенно уточнить сведения о местоположении

очагов, получаемые с помощью каждого панорамного регистратора в отдельности. Тем не менее проведение такого сопоставления вполне оправдано в существующих условиях с точки зрения характеристики качества наблюдений за грозами. Наиболее определенные результаты могут быть получены при наличии панорамных регистраторов в пунктах, расстояние между которыми одного порядка с радиусом действия регистраторов, составляющим около 150...200 км. В таком случае наиболее четко выражены альтернативные варианты с наличием гроз на базе (т. е. между пунктами), а также с одной и с другой стороны базы. Таким образом выделяются районы, где должны бы быть в указанное время отметки гроз по данным обычных наблюдений метеорологической сети, но при имеющемся количестве метеостанций и сохраняющейся пока бесприборной методике наблюдений неизбежны пропуски значительного числа грозových очагов. Район, в пределах которого грозы отмечаются наблюдателем, оценивается вообще различными средними величинами. Считается, например, что грозы обнаруживаются на расстояниях до 20 км от метеостанции [6]. В Англии при наличии (кроме 200 метеостанций) очень большой добровольной сети один наблюдатель приходится в среднем на район радиусом 20 км, но вероятность обнаружения грозы в радиусе 15 км оказывается составляющей всего 0,4 [12].

Кроме того, сейчас сами потребители указывают на снижение качества бесприборных наблюдений за грозами из-за высокого уровня звуковых и световых помех от различных видов транспорта и т. д. [9]. Хотя при очень большом осреднении число дней с грозой (T) связано с числом разрядов (g) приближенным соотношением типа $g \sim aT^{1,9}$, где a — некоторый коэффициент [12], энергетики считают, что ошибки несколько уменьшаются при использовании вместо параметра T данных о суммарной продолжительности гроз [4]. Конечно, и таким способом нельзя устранить ряд недостатков и погрешностей бесприборных наблюдений за грозами, поэтому пока остается только дополнить оценку ограниченных возможностей такой методики в результате сравнения с данными опытных инструментальных наблюдений.

Подходящие исходные данные были получены летом 1978 г., когда в Ленинградской области работало два макета панорамных регистраторов, установленных на Центральной полевой базе ГГО в Воейкове (под Ленинградом) и в г. Тихвине при расстоянии между пунктами около 170 км. При сопоставлении лент с записями этих панорамных регистраторов выбирались случаи, когда грозы занимали не всю площадь вокруг пунктов и можно было вполне уверенно связывать базисные данные о зарегистрированных пеленгах (по восьми румбам). Типичные примеры проведенного сопоставления данных представлены схемами, изображенными на рис. 1, где точками отмечено относительное географическое расположение пунктов (левая точка — Воейково, правая — Тихвин, север, как всегда, вверху). При наличии зарегистрированных близких атмосфериков проводились линии, проходящие

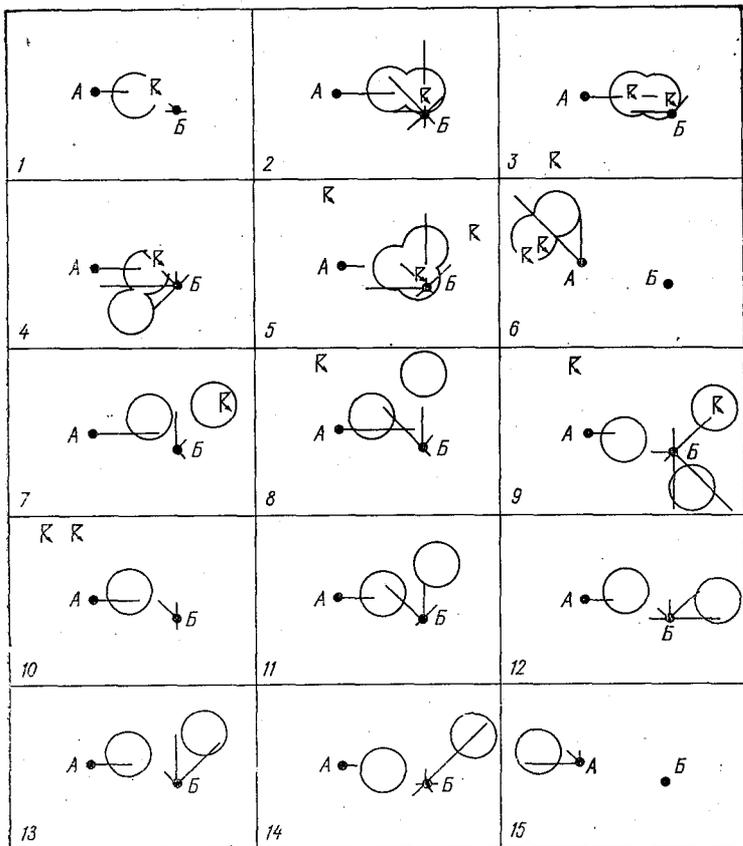


Рис. 1. Схемы расположения грозных очагов по данным панорамных регистраторов близких гроз, работавших в 1978 г. в пос. Воейково (А) и в г. Тихвине (Б).

1 — 18 августа, 19 ч 30 мин — 20 ч; 2 — 26 августа, 12 ч — 13 ч 30 мин; 3 — 26 августа, 13 ч 30 мин — 15 ч; 4 — 18 августа, 20—22 ч; 5 — 2 августа, 15 ч 30 мин — 16 ч 30 мин; 6 — 19 августа, 6 ч 30 мин — 8 ч 30 мин; 7 — 4 августа, 1 ч — 2 ч 30 мин; 8 — 2 августа, 20—22 ч; 9 — 2 августа, 14—15 ч; 10 — 3 августа, 20—22 ч; 11 — 19 августа, 3 ч 30 мин — 4 ч 30 мин; 12 — 3 августа, 0—2 ч; 13 — 2 августа, 22—24 ч; 14 — 31 июля, 13—17 ч; 15 — 24—25 августа, 23 — 3 ч.

из точки, соответствующей данному пункту, по оси сектора, соответствующего данному румбу. Длина линии бралась пропорциональной числу атмосфериков, принятых из указанного румба. Кружками отмечены примерные районы расположения основных грозных очагов по данным двух панорамных регистраторов, а обычным метеорологическим знаком грозы — сведения о наличии этого явления по штормовым телеграммам, поступившим с метеостанций. Схемы 1—5 (рис. 1) иллюстрируют лучшие слу-

чай наблюдений сети, когда при наличии встречных пеленгов между пунктами безусловно имеются грозы, и они отмечаются хотя бы одной метеостанцией. Грозы, отмеченные метеостанциями, расположенными на расстояниях, близких к выбранной для установленных регистраторов предельной дальности действия (около 150 км), могут не отмечаться приборами. К вариантам, представленным схемами 1—5, примыкает схема 6, характеризующая наличием гроз, обнаруженных как установленным там регистратором, так и метеостанциями, в то время как для Тихвина эти грозы были за пределами рабочей зоны регистратора. К следующей группе (схемы 7—10) относятся случаи, когда по сетевым наблюдениям отмечены грозы, расположенные на периферии рабочих зон приборов и частично зарегистрированные ими, но грозовые очаги в районе базы Воейково — Тихвин, зарегистрированные согласованными показаниями приборов, не были обнаружены метеостанциями. Наконец, последнюю третью группу (схемы 11—15) составляют встречающиеся еще на практике наиболее неблагоприятные варианты с отсутствием штормовых предупреждений о грозах, обнаруженных только по записям регистраторов, достоверность показаний которых окончательно подтверждена согласованностью данных, полученных независимо друг от друга в разнесенных пунктах (Воейково и Тихвин), где были организованы инструментальные наблюдения. В общем итоге по полученным данным при бесприборных наблюдениях за грозами метеостанции обнаруживают только 30 % относительно слабых и локальных грозовых очагов, не покрывающих целиком достаточно большую площадь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 619880 (СССР). Устройство для регистрации близких гроз/Б. К. Иньков. — Заявл. 11.03.74, № 2007447/18—09. — В кн.: Бюл. ГК СМ СССР по делам изобретений и открытий, 1978, № 30.
2. Аюсалимова З. Г. Пространственно-временное распределение гроз и града в Москве и Подмоскowie. — Труды ЦВГМО, 1977, вып. 10, с. 53—63.
3. Асташенко А. И., Махоткина Л. Г. О пеленговании ближних грозовых разрядов. — Труды ГГО, 1963, вып. 146, с. 10—16.
4. Бекметьев Р. М., Буртовой В. И. Оценки характеристик интенсивности грозовой деятельности. — Проблемы общей энергетики и единой энергет. системы, 1977, № 11, с. 121—124.
5. Иньков Б. К. Объединение особенностей традиционной аппаратуры в панорамном регистраторе близких гроз. — Труды ГГО, 1977, вып. 350, с. 3—17.
6. Использование грозопеленгатора-дальномера совместно с метеорологическим радиолокатором в горных условиях/Л. С. Болондинская, Г. Б. Брылев, Г. Г. Корниенко, В. Д. Плотников. — Труды ГГО, 1978, вып. 411, с. 48—54.
7. Камалдина И. И. Пеленгование близких атмосфериков и погодные условия. — Труды ГГО, 1964, вып. 157, с. 70—72.
8. Herzman B. D., Uman M. A., Brantley R. D. Test of the principle of operation of a wideband magnetic direction finder for lightning return strokes. — J. Appl. Met., 1976, vol. 15, N 4, p. 402—405.
9. Lacy R. E. Climate and building in Britain. — London, Department of environment building research establishment, 1977.—185 p.

10. Pelz J. Die Gewitter im Berliner Raum.— Meteorologische Abhandlungen frei. Univ. Berlin, Neue Folge, Ser. A, Heft 3, 1977, 55 S.

11. Stansbury E. J., Marshall J. S. Sferics at two stations compared with radar-observed.— Atmosphere-ocean, 1978, vol. 16, N 3, p. 281—292.

12. Stringfellow M. F. Lightning incidence in Britain and the solar cycle.— In: Electr. process. atmosphere, Proceedings 5-th Internat. conference, Garmisch-Partenkirchen, 1974, Darmstadt, 1977, p. 719—723.

В. К. Иньков, Л. Г. Махоткин

ОПЫТ РЕГИСТРАЦИИ СРЕДНЕГО УРОВНЯ АТМОСФЕРИКОВ ПРИ БЛИЗКИХ ГРОЗАХ В ТРОПИЧЕСКОМ ПУНКТЕ

После проведения в 1970 г. серии инструментальных наблюдений за ближними грозами в одном из пунктов Танзании (Экваториальная Африка) [2...5] следующие измерения были сделаны в 1975 г. в той же тропической зоне, но в другом пункте с координатами около 10° ю. ш., 32° в. д., расположенном в Северной Провинции Республики Замбия. По своим физико-географическим условиям район новых наблюдений за грозами существенно не отличается от района предыдущих наблюдений, хотя расстояние между этими двумя пунктами составляет около 700 км. В обоих пунктах времена года характеризуются в основном двумя сезонами, причем дождливый сезон (с октября по март) относится к летнему периоду южного полушария, а сухой (с апреля по сентябрь) — к зимнему периоду. Следует лишь добавить, что новая серия наблюдений проводилась в пункте, расположенном дальше от побережья Индийского океана и на большей высоте над уровнем моря (1600 м), чем в Танзании (600...700 м), хотя местность была более ровной.

В отличие от сделанных ранее наблюдений, когда использовался счетчик местных грозовых разрядов, отмечавший грозы в радиусе до 200 км, как и однотипные с ним приборы, работающие в умеренных широтах [4], в новом пункте производилась запись атмосфериков во время близких гроз на бытовой магнитофон с диапазоном частот от 80 Гц до 10 кГц. Запись близких атмосфериков производилась при скорости протяжки ленты 4,76 см/с. Обработка полученных магнитных записей была проведена в отделе атмосферного электричества ГГО с помощью анализатора гармоник низких частот типа С5-3, показания которого при последовательной установке различных частот записывались подключенным непосредственно к его выходу самопишущим милливольтметром постоянного тока типа Н39. На бумажных лентах самописца Н39 было зарегистрировано для каждой отдельной фиксированной частоты около 450 штрихов, соответст-

зующих отдельным атмосферикам. В общем итоге после проведения записей на 34 частотах получилось около 15 000 отметок относительных амплитуд атмосфериков. Среднее значение стандартного отклонения $\sigma \approx 7,5$ дБ, найденное после обработки лент и подсчета числа атмосфериков, с разными амплитудами, хорошо согласуется с принятой в литературе типичной величиной этого основного параметра логарифмически-нормального распределения [6]. Осредненный амплитудно-частотный спектр совокупности зарегистрированных близких атмосфериков характеризуется полученными медианными значениями E относительно уровня на частоте 0,2 кГц, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Статистический спектр зарегистрированных атмосфериков

f кГц	0,5	1	2	2,2	2,4	2,6	2,8	3	4	5
E дБ	-4	-7	-14	-18	-20	-21	-20	-17	-20	-25

При более или менее обычном убывании амплитуд с увеличением частоты отмечается частный минимум на частоте около 2,6 кГц, который ранее уже проявлялся по данным измерений в умеренных широтах, сделанных другим методом с использованием гармонического анализа форм отдельных атмосфериков [7].

Магнитные записи близких атмосфериков можно было использовать не только для получения указанных средних характеристик всей серии наблюдений, проведенных в Замбии, но и для оценки колебаний интенсивности местных гроз во время их развития. С этой целью во втором варианте перезаписи магнитных лент на бумажную ленту самопишущего милливольтметра Н39 использовалась интегрирующая цепочка. Сигналы с выхода анализатора гармоник передавались в этом случае через диод и сопротивление (47 кОм) на вход самописца Н39, зашунтированный емкостью 100 мкФ и сопротивлением 510 кОм. Анализатор гармоник включался на широкую полосу (составляющую 250 Гц) и каждая магнитная лента переписывалась целиком сначала на первой из выбранных для анализа частот, потом на второй и т. д., причем продолжительность исходной и каждой из воспроизводимых записей была равна приблизительно 20 мин.

Типичный пример воспроизведения одной из записей, сделанных в Замбии 9 февраля 1975 г., дается на рис. 1. Заштрихованными полосами на этом рисунке выделяются тенденции изменения интенсивности близких атмосфериков на соответствующих частотах в пределах данного интервала времени (с 16 ч 51 мин до 17 ч 09 мин местного времени). Неожиданной особенностью полученных результатов явилось то, что тенденции изменения среднего уровня (E) близких атмосфериков могут не только не совпадать на различных частотах, но быть даже противоположными. Уменьшению E в первую половину данного интервала

(примерно с 16 ч 50 мин до 17 ч) на частоте 0,5 кГц соответствует увеличение E в это же время на частоте 7 кГц и, наоборот, увеличение E на частоте 0,5 кГц во второй половине интервала сопровождается уменьшением E на частоте 7 кГц. Ход E на частоте 4 кГц занимает некоторое промежуточное положение по сравнению с ходом на 0,5 и 7 кГц. Эти частные расхождения между атмосфериками на относительно низких частотах (менее

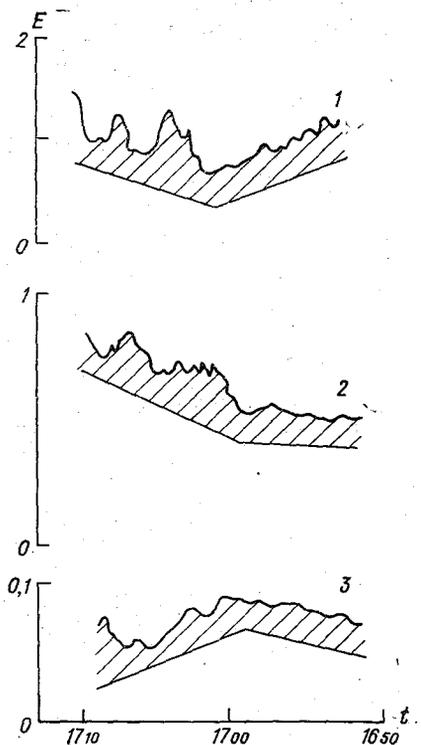


Рис. 1. Пример воспроизведения записи близких атмосфериков на магнитофон, сделанных в тропическом пункте 9 февраля 1975 г.

Средний уровень E дается в относительных единицах на частотах 0,5 кГц (1), 4 кГц (2) и 7 кГц (3).

3...4 кГц) и на частотах выше 4 кГц допускают подразделение диапазона, в котором они преимущественно принимаются, на две части. Тогда встретившаяся выше другая особенность (наличие частного минимума на частоте около 3 кГц) сразу же связывается с таким подразделением в качестве отметки границы между двумя частями диапазона.

Далее следует также указать на данные, полученные позднее в совершенно другом месте. Известно, что для регистрации разрядов на землю сначала пытались использовать частоты ниже 2 кГц, потом комбинацию с двумя частотами 5 и 100 кГц, и, наконец, с одной стороны, частоты около 10 МГц [8], а с другой — полосу частот от 2 до 50 кГц [9], пробежав, таким образом, очень широкий диапазон большими скачками. Все эти попытки не дали ожидаемых результатов или, по крайней мере, не были подтверждены материалами, полученными в различных условиях. В самой последней работе, проведенной в Томске [1], для регистрации

разрядов на землю использовался счетчик молний с двумя совместно действующими каналами, занимающими соответственно участки частот от 0,2 до 2 кГц и от 5 до 10 кГц. Очевидно, нельзя считать случайной полную согласованность выбранных участков с полученным по другим признакам и другим данным подразделением низкочастотного диапазона на две части с границей между ними на частотах около 3...4 кГц. Таким образом, работы, проведенные совершенно независимо друг от друга в разных местах и даже в разных зонах (на широтах 10° ю. ш.

и 57° с. ш.), указывают на существование частных особенностей одинаково выделяемых и сравнительно близких компонентов атмосфериков, принимаемых на небольшом расстоянии из местных грозовых очагов. Конечно, требуется еще получить более полные данные для определения степени связи этих особенностей с типом разряда, так как подобные особенности могли быть вызваны и другими причинами. При решении общей задачи о характеристике среднего уровня грозовой деятельности и для предупреждения о появлении местных гроз эти частные особенности не имеют значения, но представляют несомненный интерес в приложении к отдельным вопросам, связанным с получением дополнительных характеристик гроз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алехина Н. М., Дульзон А. А., Потапкин В. И. Доля наземных разрядов в грозах при различных синоптических условиях. — Труды ЗСРНИГМИ, 1978, вып. 36, с. 89—94.
2. Иньков В. К. Из опыта наблюдений за грозами в тропической зоне. — Труды ГГО, 1970, вып. 253, с. 161—166.
3. Иньков В. К. О годовом ходе гроз в одном из районов Экваториальной Африки (Танзания). — В кн.: Некоторые вопросы физики приземного слоя атмосферы. Киров, 1972, с. 37—40.
4. Иньков В. К. Инструментальные наблюдения за грозами в 1970 г. на периферии одного из мировых грозовых центров. — Труды ГГО, 1974, вып. 301, с. 88—93.
5. Иньков В. К. Проверка универсальности счетчиков грозовых разрядов. — Труды I Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. Л.: Гидрометеониздат, 1976, с. 264—268.
6. Махоткин Л. Г. Оценка параметров амплитудного распределения атмосфериков, генерируемых изолированным источником. — Геомагнетизм и аэрномия, 1964, т. 4, с. 200—202.
7. Махоткин Л. Г., Иньков В. К. Об одной особенности амплитудного спектра близких атмосфериков. — Труды ГГО, 1974, вып. 301, с. 105—109.
8. Kreielsheimer K. S., Lodge-Osborn D. A lightning counter to distinguish between ground and cloud flashes. — In: Planetary electrodynamic, vol. 2, London—New York—Paris, Gorton and Breach sci. publ., 1969, p. 29—42.
9. Van Niekerk H R. General description and specification of the RSA 10 lightning flash counter. — CSIR special report ELEC 50, Pretoria, Nat. electr. eng. research inst., 1974, 11 p.

Л. Г. Махоткин, Б. К. Иньков

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ АМПЛИТУД АТМОСФЕРИКОВ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

В ближней зоне, где эффект распространения атмосфериков принято оценивать в соответствии с зависимостью поля E от расстояния R до дипольного источника (молнии), удобно использовать дифференциальный показатель степени $k(R) = [d(\ln E)/d(\ln R)]$. В таком приближении для любой спектральной составляющей атмосферика с частотой f в статье [6] была получена простая формула:

$$k(R) = -1 + \frac{x^2 - 2}{x^4 - x^2 + 1}, \quad (1)$$

в которой параметр $x = (2\pi/c) fR$, где c — скорость света, или, если f выражено в кГц, а R — в км, $x \approx 0,02 fR$. Аналогичная формула получается и для амплитуд импульсов (A) при аппроксимации формы атмосфериков экспонентой. Ток разряда (отвлекаясь от множителя пропорциональности) представляется обычно в виде комбинации двух экспонент [1, 8]

$$I(t) = e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}, \quad (2)$$

где t — время и коэффициент β примерно на порядок больше коэффициента α . Аппроксимируя $Q(t)$ такой же комбинацией двух экспонент и подставляя это выражение в известную формулу для диполя, в которой $2h$ — расстояние между зарядами $Q(t)$

$$E(t) = \frac{c^2}{R^3} 2hQ(t) + \frac{c}{R^2} 2hQ'(t) + \frac{1}{R} 2hQ''(t), \quad (3)$$

можно написать, не давая здесь развернутых значений множителей A и B ,

$$E(t) = Ae^{-\alpha t} - Be^{-\beta t}. \quad (4)$$

Вычисляя максимальное значение (т. е. амплитуду A_m) импульса такой формы, получим:

$$A_m = A \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^{\frac{\beta}{\beta-\alpha}} \left(\frac{\beta}{\alpha} - 1 \right) \left(\frac{A}{B} \right)^{\frac{\alpha}{\beta-\alpha}}. \quad (5)$$

В частности, при $\beta = 10\alpha$,

$$A_m \approx \left[0,7 \left(\frac{A}{B} \right)^{\frac{1}{9}} \right] A, \quad (6)$$

откуда A_m с достаточным приближением можно считать пропорциональным A (множитель в скобках при изменении отношения (A/B) в 500 раз изменяется всего в 2 раза). Поэтому, избегая излишне громоздких выкладок и выражений, появляющихся при использовании развернутых значений коэффициентов A и B , практически достаточно ограничиться аппроксимацией $Q(t)$ одной экспонентой $Ae^{-\alpha t}$. После подстановки ее в формулу (3) и выполнения соответствующих операций находится простая формула для дифференциального показателя степени убывания амплитуд:

$$k_A(R) = \frac{d(\ln E_A)}{d(\ln R)} = -1 + \frac{y-2}{y^2-y+1}, \quad (7)$$

в которой параметр $y = (\alpha R/c)$. Легко подсчитать, что $k_A(R) = -3$ при $y=0$ и при $y=0,5$; $k_A(R) = -2$ при $y=1$ и $k_A(R) = -1$ при $y=2$ и $y=\infty$. Если взять $\alpha = 3 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, то $y = 0,1 R$, где R выражено в километрах, и уже на расстоянии 20 км от разряда $k_A(R) = -1$. С другой стороны, при значении α больше 1 мс абсолютное значение показателя $k_A(R)$ не меньше трех во всей ближней зоне, где еще можно пользоваться оценками по простой дипольной схеме.

В отличие от определения показателя $k(R)$ для какой-нибудь спектральной составляющей атмосферы, когда сразу же требуется указать выбранную рабочую частоту f , показатель $k_A(R)$ находится только по данным о параметре принимаемого сигнала. Однако отсутствие частоты f в параметре y , по которому находится величина $k_A(R)$, отнюдь не указывает на независимость таких оценок от частотных параметров аппаратуры, охватывающей теперь только различными радиоприемными устройствами область от миллигерц до терагерц [3]. Для определения амплитуд импульсов или оценки их величины по отношению к некоторому заданному порогу необходимо, чтобы весь канал приемного устройства имел частотную характеристику с полосой пропускания, соответствующей спектру выбираемых для регистрации сигналов. Поэтому необходимо помнить, что при анализе работы предлагавшихся регистраторов близких гроз никогда нельзя обойтись без учета частотной характеристики всего канала приемника, по которой только и определяется, от каких импульсов может фактически работать то или другое устройство. Например, при попытке использовать относительно длинные импульсы с $\alpha \sim 1$ мс и менее требуется обеспечить полосу пропускания до частот значительно ниже 1 кГц, так как максимум в спектре экспоненциального сигнала приходится на самые низкие частоты [5]. Практически заход в область слишком низких частот вызывает

значительные затруднения из-за наиболее высокого уровня технических коммутационных помех, аналогичных помехам от коронирования [2, 4, 7], и появления на самых низких частотах естественных помех, не связанных с грозовыми разрядами. Результаты регистрации естественных колебаний в полосе частот ниже 10 Гц, проведенной летом на Центральной полевой базе ГГО под Ленинградом, показывают, что естественные помехи, возникающие при ливневых осадках, вполне сравнимы по величине с атмосфериками в этом участке диапазона (рис. 1), хотя прием производился на изолированную (некоронирующую) вертикальную

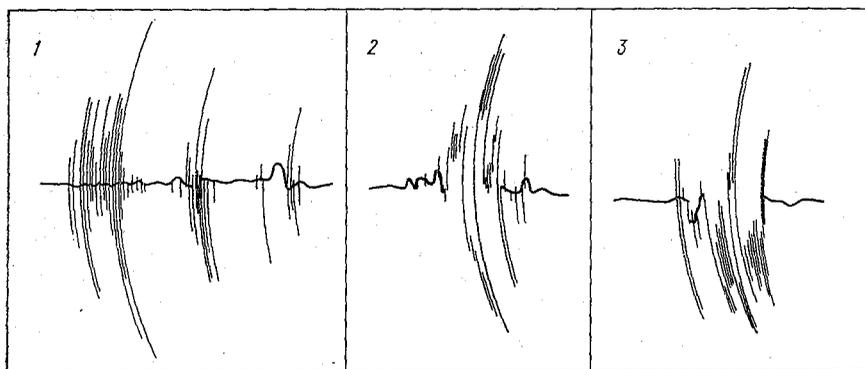


Рис. 1. Примеры регистрации естественных низкочастотных колебаний при грозе (1), ливневом дожде (2) и ливневом снеге (3).

антенну. Большая интенсивность самых низкочастотных естественных помех уже отмечалась ранее и позволяет использовать их с целью инструментальной индикации типа облачности или наличия твердых и жидких осадков [9]. Однако наличие таких помех указывает прежде всего на возмущенный характер погоды (наличие больших электрических полей), но определить конкретный возмущающий фактор (ливневые осадки, ливневую облачность или грозу) по таким данным, вероятно, нельзя или, по крайней мере, очень трудно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. — М.: Наука, 1972. — 563 с.
2. Бомштейн Б. Д., Киселев Л. К., Моргачев Е. Т. Методы борьбы с помехами в каналах проводной связи. — М.: Связь, 1975. — 245 с.
3. Долуханов М. П. От миллигерц до терагерц. — Л.: Судостроение, 1970. — 104 с.
4. Журавлев Э. Н. Радиопомехи от коронирующих линий электропередач. — М.: Энергия, 1971. — 199 с.
5. Зиновьев А. Л., Филиппов Л. И. Методы аналитического выражения радиосигналов. — М.: Высшая школа, 1966. — 104 с.

6. Махоткин Л. Г., Иньков Б. К. О рациональных характеристиках счетчиков местных грозовых разрядов.—Труды ГГО, 1977, вып. 350, с. 32—36.

7. Огороднейчук И. Ф., Журавлев И. Я., Яцышин В. И. Низкочастотная беспроводная связь в шахтах.—М.: Недра, 1975.—231 с.

8. Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ.—М.: Наука, 1972.—195 с.

9. Шатиленко В. М. Радиотехнический комплект аппаратуры для регистрации электромагнитных возмущений в области крайне низких частот от отдельных метеорологических явлений.—Труды ДВНИГМИ, 1978, вып. 73, с. 129—134.

К ОПТИМИЗАЦИИ ПОРОГОВЫХ УСТРОЙСТВ С УСИЛЕНИЕМ ЗАПУСКАЮЩИХ СИГНАЛОВ

Разработанные авторами новые пороговые устройства диодно-регенеративного типа, названные ими пороговыми устройствами с усилением запускающих сигналов, обладают наряду с простой и надежностью такими качествами, как высокая чувствительность (малый пороговый уровень) и стабильность порогового уровня [1—4].

Теоретический анализ этих устройств на величину порога срабатывания и устойчивость, проведенный для случая достаточно протяженных входных импульсов, показывает, что достижение этих качеств обеспечивается путем наиболее полной реализации их основного отличия от существующих пороговых устройств, т. е. путем повышения коэффициента усиления активного четырехполюсника [5].

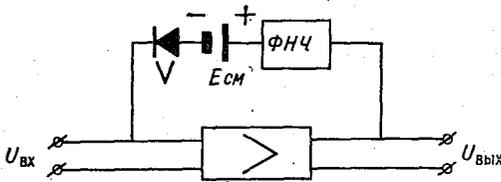


Рис. 1. Эквивалентная обобщенная схема порогового устройства.

При этом величина как самого порогового уровня, так и коэффициента его вариации определяется или шумами источника сигналов, или собственными шумами порогового устройства, на что указывалось еще в [3].

Рассмотрим возможность дальнейшего повышения и стабилизации чувствительности пороговых устройств с усилением запускающих сигналов для случая, когда основными факторами, ограничивающими их чувствительность и стабильность, являются собственные шумы порогового устройства диодно-регенеративного типа.

В физическом отношении сущность дальнейшего усовершенствования пороговых устройств с усилением запускающих сигналов состоит в максимизации отношения С/Ш на входе управляемого (запираемого) вентильного устройства в петле положи-

тельной обратной связи путем выбора оптимального значения ее полосы пропускания частот ($\Delta f_{\text{п}}$), а также сужением этой полосы и выбором более длительных запускающих импульсов.

В техническом отношении решение задачи аналогично операции сглаживания пульсаций случайных паразитных флуктуаций, вызванных собственными шумами порогового устройства, на входе вентиляльного устройства с помощью фильтра низкой частоты (ФНЧ).

Эквивалентная обобщенная схема анализируемого порогового устройства представлена на рис. 1.

Полагаем, что в нашем случае показателем стабильности порогового уровня может служить относительная средняя квадратическая погрешность:

$$\gamma = \sqrt{\frac{D(m_x^*)}{m_x^2}} = \sqrt{\frac{D_z}{\lambda^2 m_x^2}}, \quad (1)$$

где m_x — среднее значение порога срабатывания; $D(m_x^*) = = \frac{1}{\lambda^2} D[z(T)]$ — дисперсия оценки m_x , определяемая собственными шумами; D_z — дисперсия процесса на выходе ФНЧ; $\lambda = \int_0^T h(\tau) d\tau$, $h(\tau)$ — импульсная переходная характеристика ФНЧ.

Решим задачу в общем виде. Найдем дисперсию процесса D_z на выходе ФНЧ.

Согласно формуле Винера — Хинчина, функция корреляции на выходе ФНЧ

$$K_z(\tau) = 2 \int_0^{\infty} G_z(f) \cos 2\pi f \tau df. \quad (2)$$

Спектральная плотность мощности $G_z(f)$ процесса на выходе ФНЧ связана со спектральной плотностью мощности $G_x(f)$ случайного процесса $X(t)$ на входе ФНЧ соотношением

$$G_z(f) = W^2(f) G_x(f), \quad (3)$$

где $W(f)$ — модуль комплексного коэффициента передачи ФНЧ. Из (2) и (3) имеем

$$K_z(\tau) = 2 \int_0^{\infty} G_x(f) W^2(f) \cos 2\pi f \tau df.$$

Откуда, полагая $\tau=0$ и предполагая, что $G_x(f) = G(0) = \text{const}$ в пределах эффективной полосы ФНЧ, имеем

$$D_z \simeq 2G_x(0) \int_0^{\infty} W^2(f) df. \quad (4)$$

Подставляя выражение (4) в формулу (1) с учетом того, что

$$\lambda = \int_0^T h(t) d\tau = W(0); \quad G_x(0) = 2G_x^2 \tau_k$$

и обозначая $\frac{G_x^2}{m_x^2} = X^2$,

имеем

$$\gamma = 2X \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} W^2(f) df}{W^2(0)}} \tau_k.$$

Так как

$$\frac{\int_0^{\infty} W^2(f) df}{W^2(0)} = \Delta f_n,$$

то

$$\gamma \simeq 2X \sqrt{\Delta f_n} \tau_k, \quad (5)$$

или, так как $\Delta F_x \tau_k = 1/4$, то

$$\gamma = X \sqrt{\frac{\Delta f_n}{\Delta F_x}}. \quad (6)$$

Искомое повышение стабилизации и чувствительности определяется соотношением

$$\frac{X}{\gamma} = \sqrt{\frac{\Delta F_x}{\Delta f_n}}. \quad (7)$$

Из соотношения (7) следует, что потенциально достижимый выигрыш в повышении и стабилизации чувствительности равен корню квадратному из величины возможного относительного сужения суммарной полосы пропускания частот усилительного тракта и петли положительной обратной связи.

Таким образом, оптимизация пороговых устройств с усилением запускающих импульсов состоит в сужении суммарной полосы частот пропускания и выборе ее значения согласно известному соотношению В. И. Сифорова:

$$\Delta f_n = \frac{1,37}{\tau}, \quad (8)$$

где τ — длительность запускающих импульсов.

Из соотношений (7) и (8) следует, что наибольшего эффекта при указанном способе оптимизации можно получить при запуске пороговых устройств длительными импульсами.

С целью экспериментальной проверки описанного здесь способа повышения и стабилизации чувствительности пороговых устройств с усилением запускающих импульсов, согласно схеме рис. 1 был собран и испытан опытный макет порогового устройства диодно-регенеративного типа. В качестве ФНЧ в цепи положительной обратной связи использовалась обычная RC цепочка, а регулируемого параметра — величина емкости (C).

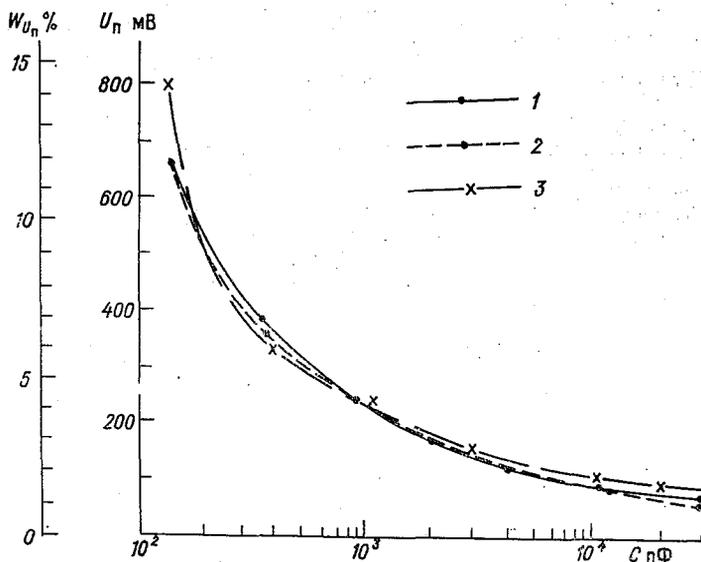


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные кривые.
 1 — $U_{п}$ расчетное, 2 — $U_{п}$ экспериментальное, 3 — $W_{U_{п}}$ экспериментальное.

При этом с изменением величины C , согласно соотношению (8), и исходя из того, что

$$\Delta f_{п} = a/RC, \quad (9)$$

значение τ изменялось пропорционально изменению величины C .

Величина порогового напряжения запуска ($U_{п}$) определялась путем многократных измерений, после чего определялось его среднее значение ($\bar{v}_{п}$) и коэффициент вариации

$$W_{U_{п}} = \frac{S_{п}}{\bar{U}_{п}}.$$

Результаты эксперимента и расчета приведены на рис. 2. Они подтверждают хорошее соответствие с ожидаемым результатом: величина $U_{п}$ изменяется обратно пропорционально корню квадратному из величины C , достигается существенное повышение и стабилизация чувствительности рассматриваемого порогового устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 299023 (СССР). Формирователь импульсов/В. С. Жупахин, К. С. Жупахин. — Заявл. 12.05.69, № 1331459/26—9. — Бюл. изобр., 1971, № 11, с. 189.

2. А. с. 415791 (СССР). Формирователь импульсов/В. С. Жупахин, К. С. Жупахин. — Заявл. 15.11.71, № 1713442/26—9. — Бюл. изобр., 1974, № 6, с. 178.

3. Жупахин В. С., Жупахин К. С. Блокинг-генератор в ждущем режиме с малым запускающим напряжением. — Вопросы радиоэлектроники, 1961, серия X, вып. 4.

4. Жупахин В. С., Жупахин К. С. Об одном способе разрыва цепи обратной связи в некоторых автоматических электронных устройствах. — Радиотехника, 1963, т. 18, № 8.

5. Жупахин В. С., Жупахин К. С. К анализу пороговых устройств с усилением запускающих сигналов. — Труды ГГО, 1976, вып. 383, с. 110—117.

Л. Г. Махоткин, Б. К. Иньков

ЗАВИСИМОСТЬ ФАЗОВЫХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРИКОВ ОТ РАССТОЯНИЯ

В области низких частот зависимость фазовых параметров атмосфериков от расстояния проявляется значительно более определенно и четко по сравнению с вполне очевидной в общих чертах, но лишь статистически уточняемой закономерностью убывания амплитудных параметров при увеличении расстояния. Это обусловлено рядом факторов, прежде всего линейной зависимостью фазовых параметров от расстояния, тогда как амплитуды убывают нелинейно и в простейшем случае (в ближней зоне) приходится иметь дело с геометрической прогрессией, дающей по статистическим данным об амплитудах атмосфериков оценку логарифма расстояния [2, 5]. Фазовые параметры связаны с моментом появления атмосферика, не имеющим отношения к его амплитуде. Важное значение имеет также достаточно слабая зависимость фазовых параметров от неидеальности волновода Земля — ионосфера, так как в основном рабочем диапазоне (6... 25 кГц), используемом для приема дальних атмосфериков, с достаточной точностью применима [4] простая формула для фазовых скоростей электромагнитных колебаний в идеальном волноводе:

$$v^*(f) = \frac{2}{\sqrt{1 - \frac{b}{f^2}}} = \frac{f}{\sqrt{f^2 - b}}, \quad (1)$$

где $v^*(f) = [v(f)]/c$ — относительная фазовая скорость; c — скорость света; f — частота; b — квадрат критической частоты волновода. Простая поправка на сферичность Земли здесь опущена, так как при оценке изменения фазовых параметров атмосфериков она приводит к появлению общего корректирующего множителя, близкого к единице. Зависимость фазовых параметров атмосфериков от расстояния может быть в основном получена при использовании приближенного выражения, вытекающего из формулы (1):

$$\frac{1}{v^*(f)} \approx 1 - \frac{b}{2f^2}. \quad (2)$$

Частоты f_1, f_2, f_3, f_4 , используемые для определения некоторого фазового параметра атмосфериков, могут объединяться парами в промежуточных каналах приемного устройства и для получения определенного показания выходного индикатора должны удовлетворять условию

$$k(f_1 + \alpha f_2) = m(f_3 + \beta f_4), \quad (3)$$

где k и m — целые числа, а α (и независимо β) берутся равными $+1, 0$ или -1 . Применение более чем четырех рабочих частот значительно усложняет измерения, не приводя к существенному уточнению результатов. Из-за сжатия шкалы нецелесообразно также выбирать значения множителей k, m больше 3, наиболее подходящими являются наименьшие величины (1 или 2). Обычно берется $k=1$ при $m=1$ или $m=2$ [1]. Измеряемый фазовый параметр δ определяется разностью фаз на частотах $(f_1 + \alpha f_2)$ и $(f_3 + \beta f_4)$, т. е.

$$\delta = k(\varphi_1 + \alpha \varphi_2) - m(\varphi_3 + \beta \varphi_4), \quad (4)$$

где φ_i — фаза на частоте f_i , индекс i равен соответственно 1, 2, 3 и 4.

Двухчастотный вариант, когда $\alpha = \beta = 0$ и имеются только две рабочие частоты, обозначенные через f_1 и f_3 , приводит к соотношениям:

$$kf_1 = mf_3, \quad \delta = k_1 \varphi_1 - m \varphi_3. \quad (5)$$

Трехчастотный вариант допускает несколько разновидностей:

$$f_1 + f_2 = f_3, \quad \delta = \varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_3, \quad (6)$$

$$f_1 + f_2 = 2f_3, \quad \delta = \varphi_1 + \varphi_2 - 2\varphi_3, \quad (7)$$

$$f_1 + f_2 = 3f_3, \quad \delta = \varphi_1 + \varphi_2 - 3\varphi_3, \quad (8)$$

$$f_1 - f_2 = f_3, \quad \delta = \varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_3, \quad (9)$$

$$2(f_1 - f_2) = f_3, \quad \delta = 2\varphi_1 - 2\varphi_2 - \varphi_3 \quad (10)$$

и т. д. Легко заметить, что случаи (6) и (9) эквивалентны, так как из $f_1 - f_2 = f_3$ следует соотношение $f_2 + f_3 = f_1$, отличающееся от (6) только обозначением частот. Практически применяется и получен известное распространенное соотношение (7), разработанный в Институте Г. Герца в Берлине [6]. Условие (7) может быть переписано в виде $(f_1 - f_3) = (f_3 - f_2)$, что указывает на возможность измерения параметра δ не только по суммарной частоте, но и по разностным частотам. Заметим, что применение режекторных контуров, дающих довольно плоскую фазовую характеристику вблизи резонанса [6], менее выгодно, чем применение обычных контуров с более широким линейным участком в полосе пропускания и, следовательно, достаточно малыми искажениями принимаемых частотных составляющих атмосфериков, передаваемых с одинаковыми задержками в различных каналах при соответствующем выборе их полос.

Среди ряда четырехчастотных вариантов

$$f_1 + f_2 = f_3 + f_4, \quad \delta = \varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_3 - \varphi_4, \quad (11)$$

$$f_1 - f_2 = f_3 - f_4, \quad \delta = \varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_3 + \varphi_4, \quad (12)$$

$$f_1 + f_2 = 2(f_3 + f_4), \quad \delta = \varphi_1 + \varphi_2 - 2\varphi_3 - 2\varphi_4, \quad (13)$$

$$f_1 - f_2 = 2(f_3 - f_4), \quad \delta = \varphi_1 - \varphi_2 - 2\varphi_3 + 2\varphi_4, \quad (14)$$

$$f_1 - f_2 = 3(f_3 - f_4), \quad \delta = \varphi_1 - \varphi_2 - 3\varphi_3 + 3\varphi_4 \quad (15)$$

и т. д., следует сначала отметить разновидность, характеризующую соотношением (14), которое (с добавлением частного условия $f_1 = 2f_3$, откуда и $f_2 = 2f_4$) было использовано в методе наблюдений за фазовыми параметрами атмосфериков, разработанном в ГГО [1, 3]. Разновидности (11) и (12) эквивалентны, так как отличаются только обозначением частот (что уже встречалось при рассмотрении трехчастотных вариантов и также указывает на возможность измерения величины искомого параметра δ как на суммарных, так и на разностных частотах).

Фаза φ_i , вызванная задержкой при прохождении некоторого расстояния R , определяется по числу длин волн $\lambda_i = [cv^*(f_i)/f_i]$, укладываемых на данном отрезке, с переводом этой величины в циклы умножением на 2π :

$$-\varphi_i = \frac{2\pi R}{\lambda_i} = \frac{2\pi R f_i}{cv^*(f_i)}. \quad (16)$$

В соответствии с формулами (4)–(15) значения параметра δ для какого-либо варианта получаются в результате суммирования фаз φ_i , взятых с соответствующими коэффициентами k_i :

$$\delta = \sum k_i \varphi_i = -\frac{2\pi R}{c} \sum \frac{k_i f_i}{v^*(f_i)}, \quad (17)$$

причем величины k_i берутся с учетом знаков (например, для варианта, представленного формулой (14), $k_1 = 1$, $k_2 = -1$, $k_3 = -2$, $k_4 = 2$). Зависимость параметра δ от расстояния удобнее всего характеризовать, как это уже было принято раньше [1], таким значением $R = L$, при котором $\delta = 2\pi$. Для оценки величины L можно подставить в формулу (16) явное выражение для $v^*(f)$, даваемое формулой (1), или еще более простое приближенное выражение по формуле (2). В последнем случае

$$2\pi \approx -\frac{2\pi L}{c} \left[\sum k_i f_i - \frac{b}{2} \sum \left(\frac{k_i}{f_i} \right) \right], \quad (18)$$

а так как в соответствии с (3) и, следовательно с (5)–(14), первое слагаемое в скобках $\sum k_i f_i = 0$,

$$\frac{1}{L} \approx \frac{b}{2c} \sum \left(\frac{k_i}{f_i} \right). \quad (19)$$

При f_i , выраженных в килогерцах, и скорости света в 10^6 км/с фор-

мула (18) дает значения L в тысячах километров. Полагая $b = 1,4$ по данным работы [4] и беря $c \approx 0,3$, получим

$$L \approx \frac{0,43}{\sum \left(\frac{k_i}{f_i} \right)}. \quad (20)$$

Например, для варианта, определяемого условием (12), формула (19) дает

$$L \approx \frac{0,43}{\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_3} + \frac{1}{f_4}}. \quad (21)$$

При дополнительном условии $f_2 - f_3 = f_1 - f_2$ этот вариант позволяет комбинировать наблюдения по трехчастотным и четырехчастотным методам в случае измерения параллельно с параметром $\delta_1 = \varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_3 + \varphi_4$ [вариант (12)] также параметров $\delta_2 = \varphi_2 - 2\varphi_3 + \varphi_4$ [вариант (7) с другим обозначением индексов] и $\delta_3 = \varphi_1 - 3\varphi_2 + 3\varphi_3 - \varphi_4$ [вариант (15) с другим обозначением индексов]. Легко заметить, что параметры $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ связаны между собой соотношением $\delta_1 - \delta_3 = 2\delta_2$, которое может быть использовано для контроля ошибок измерений и отбраковки искаженных отсчетов. В результате более строгого отбора наиболее надежных данных измерений может быть уточнена зависимость фазовых параметров атмосфериков от расстояния, в среднем в пределах имеющихся пока погрешностей, описываемая выведенными выше рабочими формулами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иньков Б. К. Фазовые методы определения расстояния до очагов атмосфериков. — Л.: Гидрометеониздат, 1973. — 135 с. (Труды ГГО. Вып. 319).
2. Иньков Б. К., Махоткин Л. Г. Границы применимости амплитудного метода оценки расстояния до грозových очагов. — Труды ГГО, 1968, вып. 225, с. 68—71.
3. Махоткин Л. Г., Иньков Б. К. Однопунктные методы наблюдений за грозowymi очагами. — Труды ГГО, 1969, вып. 242, с. 32—36.
4. Махоткин Л. Г., Иньков Б. К. Сравнение и анализ расчетных данных о фазовых скоростях электромагнитных волн в волноводе Земля—ионосфера. — Труды ГГО, 1970, вып. 253, с. 136—152.
5. Махоткин Л. Г., Лыдзар П. С. Ориентировочная оценка удаленности гроз по амплитудам атмосфериков. — Труды ГГО, 1963, вып. 146, с. 58—64.
6. Heydt G. Peilanlagen zur Messung von spektralen Amplitudenverteilungen, Amplitudenverhältnissen und Gruppenlaufzeitdifferenzen von Atmospheric. — H.—Hertz-Institut für Schwingungsforschung, Technischer Bericht N 90, Berlin, 1967, 73 S.

В. С. Снегуров

ФАЗОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ РАЗЛИЧНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ МОЛНИЙ В ДИПОЛЬНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Особенности распространения атмосфериков в ближней зоне, т. е. на расстояниях меньше длины волны (λ), могут быть использованы для определения удаленности близких грозовых очагов [3]. И. И. Кононов в своей заявке [4] перечисляет несколько модификаций методики, основанной на использовании этих особенностей — амплитудную, фазовую и импульсную, но в течение ряда лет разрабатывался только импульсный (широкополосный) вариант [1]. Экспериментальные исследования фазового (узкополосного) варианта начались только в 1975 г., когда на Центральной полевой базе ГГО в Воейкове Б. К. Иньковым и Л. Г. Махоткиным были проведены дискретные наблюдения за разностью фаз электрической (E) и магнитной (H) компонент атмосфериков, замененные в 1976—1977 гг. непрерывной регистрацией разностей фаз EH и EE -компонент, и в это же время автором статьи была сделана в Молдавии серия фазовых наблюдений EH -компонент. Ранее делались только опыты с аппаратурой, подготовленной еще к сезону 1971 г. [2] для наблюдений пеленгов и разности фаз EE -компонент, зависящей на расстояниях $R > \lambda$ от другого эффекта распространения.

Дипольная модель позволяет теоретически рассчитать как обычно без учета ионосферы, Земли и ее сферичности зависимость разности фаз компонент E , H от расстояния R , причем удобно пользоваться пропорциональной R величиной $a = (2\pi R/\lambda) \approx \approx (Rf/48)$, где R выражено в км, а частота — в кГц. Обозначая фазы электрической и магнитной компонент атмосфериков на некоторой частоте f через f_E и f_H , а на частоте $2f$ через f_{E_2} и f_{H_2} можно вывести формулы для различных комбинаций разности фаз, начиная с $\delta\varphi_{EH} = \varphi_E - \varphi_H$, далее для $\delta\varphi_{E_2E} = \varphi_{E_2} - 2\varphi_E$, $\delta\varphi_{H_2H} = \varphi_{H_2} - 2\varphi_H$ и, наконец, для $\delta\varphi_{H_2E} = \varphi_{H_2} - \varphi_E$. Последняя величина, определяемая в дипольном приближении формулой

$$\delta\varphi_{H_2E} = \arctg\left[\frac{1 + a^2 - 3a^4}{2a(a^4 - 2a^2)}\right], \quad (1)$$

теоретически интересна с точки зрения использования ее для оценки расстояния до близких грозových очагов, так как по этой формуле в пределах ее действия, т. е. в ближней зоне $\delta\varphi_{H_2E}$, изменяясь на 270° и пробегая, таким образом, $3/4$ максимально допустимого интервала, однозначно связано с R . Для сравнения можно указать, что $\delta\varphi_{E_2E}$ на рабочем участке изменяется в пределах 180° , а $\delta\varphi_{EH}$ — на 90° . Однако практически нужно учитывать, что магнитные антенны имеют некруговую диаграмму направленности и малую эффективную высоту, а при выборе кратных частот $f, 2f$ параметр $\delta\varphi$ продолжает изменяться за пределами ближней зоны уже за счет других закономерностей распространения, поэтому при большой чувствительности аппаратуры отдельные атмосферники, прошедшие расстояние, превышающее радиус ближней зоны, могут быть приняты за близкие атмосферники.

Формулы, используемые обычно для оценки $\delta\varphi$ в ближней зоне, в том числе и данная здесь формула (1), выводятся теоретически для вертикального диполя. При другой ориентировке диполя в исходные выражения вводится параметр ξ , который можно назвать коэффициентом поляризации:

$$\xi = \frac{\sin^2 \theta \sin \alpha + \sin \theta \cos \theta \cos \alpha_0 \cos(\varphi_0 + \alpha)}{(1 - 2 \operatorname{ctg}^2 \theta) \sin^2 \theta \sin \alpha + 3 \sin \theta \cos \theta \cos \alpha_0 \cos(\varphi_0 + \alpha)}, \quad (2)$$

где $\theta, \alpha, \varphi_0$ — углы, характеризующие ориентацию диполя. В результате проведенных расчетов были получены следующие формулы для $\delta\varphi$ с учетом параметра ξ :

$$\delta\varphi_{EH} = \operatorname{arctg} \left[\frac{(\xi - 1)a^2 - 1}{\xi a^3} \right], \quad (3)$$

$$\delta\varphi_{E_2E} = \operatorname{arctg} \left(2a^3 \frac{2\xi - 3\xi^2 a^2}{4\xi^3 a^6 - 9\xi^2 a^4 + 6\xi a^2 - 3a^2 - 1} \right), \quad (4)$$

$$\delta\varphi_{H_2E} = \operatorname{arctg} \left[\frac{\xi^2 a^4 - 4\xi a^4 - 2\xi a^2 + 3a^2 + 1}{2a(\xi^2 a^4 - \xi a^2 - a^2)} \right], \quad (5)$$

$$\delta\varphi_{H_2H} = \operatorname{arctg} \left(\frac{3a^3 + 1}{2a^3} \right). \quad (6)$$

При $\xi = 1$ формулы (3)–(5) переходят в формулы для вертикального диполя. Фазы магнитных компонент не зависят от наклона диполя, поэтому в формулу (6) для φ_{H_2H} коэффициент поляризации ξ не входит.

Для экспериментальной проверки теоретических выводов о зависимости $\delta\varphi$ от величины ξ были проведены синхронные наблюдения с помощью двух макетов фазовой аппаратуры, работавших на частотах 2 и 3 кГц (для варианта EH), 1,5...3 и 2...4 кГц (для вариантов E_2E и H_2E). При синхронных наблюдениях на двух частотах можно сопоставить парные значения $\delta\varphi$, полученные экспериментально, с соответствующими теоретическими кривыми, не пользуясь данными о расстояниях до источников близких

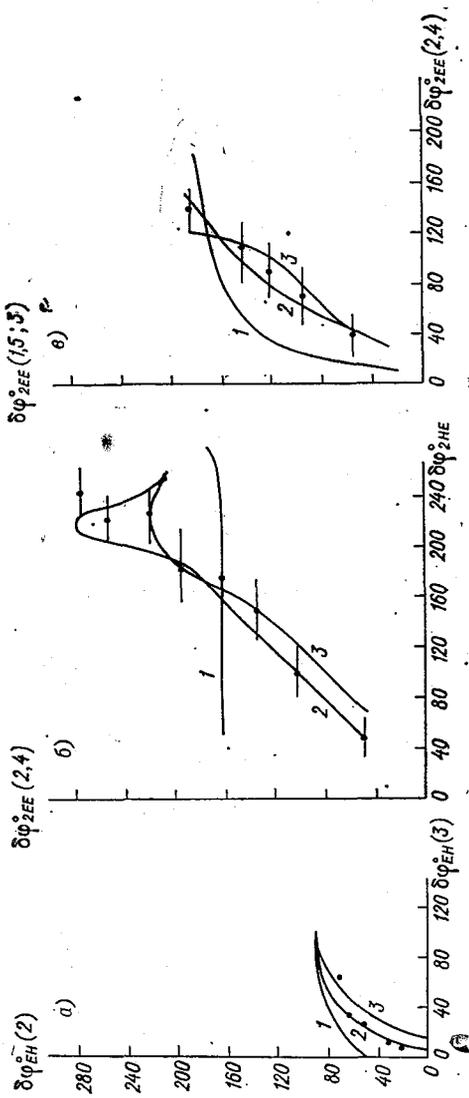


Рис. 1. Связь между расчетными и измеренными значениями на разных частотах.

a — $\delta\varphi_{EH}$ при $f=3$ кГц (абсциссы) и $f=2$ кГц (ординаты); *б* — $\delta\varphi_{H_2E}$ при

$f=2$ кГц (абсциссы) и $\delta\varphi_{E_2E}$ при $f=2$ кГц (ординаты); *в* — $\delta\varphi_{E_3E}$ при

$f=2$ кГц (абсциссы) и $\delta\varphi_{E_2E}$ при $f=1.5$ кГц (ординаты).

атмосфериков (молний), которые носят обычно для отдельных моментов времени лишь грубо ориентировочный характер при существующих на метеосети методах наблюдений. Наиболее простая теоретическая формула для $\delta\varphi_{EH}$ при $\xi=1$ позволяет получить элементарное аналитическое выражение, представляющее зависимость $\delta\varphi_{EH}^{(1)}$ на частоте f_i от $\delta\varphi_{EH}^{(2)}$ на частоте f_2 :

$$\delta\varphi_{EH}^{(1)} = \text{arctg}\left[\left(\frac{f_2}{f_1}\right)^3 \text{tg}(\delta\varphi_{EH}^{(2)})\right], \quad (7)$$

а в остальных случаях теоретические кривые строились по точкам, вычисленным для соответствующих значений a и ξ . Результаты проведенных расчетов и измерений представлены на рис. 1, где теоретические кривые 1 относятся к значению параметра $\xi=0,2$, кривые 2 — для $\xi=1$ (т. е. для вертикального диполя), кривые 3 — для $\xi=1,8$. Экспериментальные данные обозначены точками и горизонтальными отрезками, характеризующими вероятную погрешность измерений. Из рис. 1 видно, что в пределах допустимых погрешностей экспериментальные данные, как правило, согласуются с теоретическими кривыми для вертикального диполя ($\xi=1$). По этим данным при анализе результатов наблюдений за фазовыми параметрами близких атмосфериков можно пользоваться теоретическими формулами, выведенными без учета коэффициента поляризации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бару Н. В., Кононов И. И., Соломоник М. Е. Радиопеленгаторы — дальнометры ближних гроз. — Л.: Гидрометеиздат, 1976. — 143 с.
2. Иньков Б. К., Махоткин Л. Г. Опыт применения пеленгатора Ерухимовича для наблюдений за атмосфериками. — Труды ГГО, 1975, вып. 358, с. 40—47.
3. Кононов И. И. Импульсный электромагнитный метод определения удаленности грозовых очагов. — Труды ГГО, 1970, вып. 253, с. 46—54.
4. А. с. 316048 (СССР). Устройство для определения удаленности грозовых очагов/И. И. Кононов. — Заявл. 12.08.69, № 1355136/26—9. — Бюл. ГК СМ СССР по делам изобретений и открытий, 1971, № 29.

В. С. Снегуров

ОПЫТ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ГРОЗАМИ ФАЗОВЫМ ПЕЛЕНГАТОРОМ-ДАЛЬНОМЕРОМ

Наблюдения проведены в грозовой сезон 1978 г. в Ленинградской области на Центральной полевой базе в Воейкове.

Измерения координат грозовых очагов и разрядов осуществлялись фазометром на кратных частотах 1,5; 3 кГц (по электрической составляющей — вариант 2ЕЕ) и фазовым пеленгатором.

Слабая сеть метеостанций и постов существенно ограничила возможность привязки данных наблюдений с помощью пеленгатора-дальномера к фактической обстановке, определяемой визуально-слуховым методом.

Опираясь на данные оценки погрешности определения дальности, сделана попытка определить положение грозовых очагов на фоне нескольких мощных конвективных облаков или выделить в них участки, где наблюдаются грозовые разряды.

Как фоновые привлекались данные регистрации числа грозовых разрядов на площади с некоторым радиусом (радиус действия прибора), полученные с помощью пороговых грозорегистраторов (аналог ПРГ). По предварительным оценкам их радиусы действия составили 5 (1-й прибор), 25 (2-й), 50 (3-й), 100 (4-й) и 150 км (5-й). Отметки грозы на каждом счетчике с учетом вероятностных характеристик приема разрядов позволяют судить о зоне, где наблюдается грозовой процесс. Условно зоны ограничиваются расстояниями 0...5 км (1-я); 6...25 (2-я); 26...50 км и т. д. На рис. 1 они нанесены пунктирной линией. В верхней части каждого рисунка даны номера зон, в которых наблюдались молнии (первая цифра), и количество разрядов, зарегистрированных счетчиком (цифра в скобках).

Задача дальномерно-угломерного устройства сводится к выделению на общем фоне зон грозовой активности. Возможность оперативного получения рельефных изображений зон грозы на фоне большого числа конвективных облаков качественно определяет эффективность применяемого метода.

На рис. 1 приведены шесть последовательных циклов измерений радиолокационных параметров облаков с помощью МРЛ и их электрическое состояние по данным измерения координат

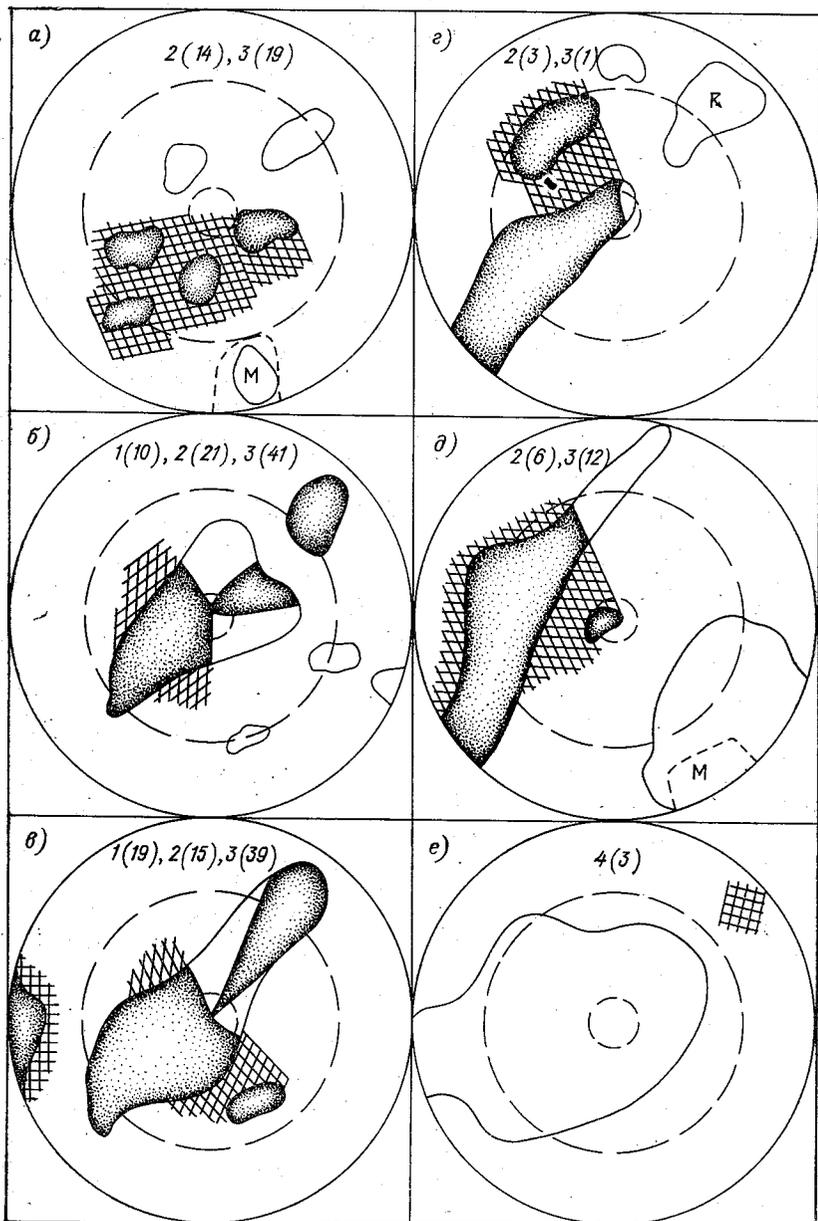


Рис. 1. Результаты совместных наблюдений МРЛ, метеостанций, грозо-регистраторов и фазового пеленгатора-дальномера.

грозовых разрядов пеленгатором-дальномером и визуальных наблюдений метеостанций. Опыты проведены 11 июля 1978 г. В этот день грозовая обстановка наиболее полно была освещена данными штормовых предупреждений.

Учитывая зону неоднозначных отсчетов, характерную для варианта дальномеров 2ЕЕ, на удалениях до 15...18 км при появлении грозовых разрядов на планшете штриховался весь сектор в данном азимуте от 0 до 18 км. На больших удалениях штриховка грозовых очагов осуществлялась с учетом погрешности измерения дальности. При наличии трех признаков при обработке

Таблица 1

Таблица сочетаний признаков

Вариант сочетаний	Признаки			Обозначение на планшете
	I	II	III	
1	+	+	+	Закрашивается черным цветом
2	—	+	+	Штриховка двумя линиями
3	—	—	+	Штриховка одной линией
4	+	+	—	В контуре яркой части ставится знак \llcorner
5	+	—	+	В контуре яркой части ставится знак М и пунктиром указывается зона грозы
6	+	—	—	Наносится пунктир яркой части
7	—	+	—	Ставится знак \llcorner
8	—	—	—	

экспериментальных данных возможны восемь вариантов их сочетаний. Данные РЛС условно принимаются за первый признак (I РЛС), штормовые предупреждения — за второй признак (II \llcorner) и данные фазовых измерений — за третий признак (III М); в табл. 1 даются их сочетания. При отсутствии любого из них ставится знак минус, в остальных — плюс.

В соответствии с принятыми обозначениями были обработаны данные за каждый получасовой сеанс наблюдений.

Из рис. 1 следует, что МРЛ обнаружил 23 яркие части. В 17 случаях они были грозовыми по измерениям пеленга и дальности. В 15 случаях это подтвердили штормовые предупреждения. В двух случаях (а, д) штормовые предупреждения отсутствовали: в одном случае они совпадали с яркой частью и однажды совпадали данные II и III признаков при отсутствии ярких частей (е).

Из данных регистрации количества грозовых разрядов счетчиками ПРГ следует, что в первом случае (а) грозы наблюдались во второй, третьей, четвертой и пятой зонах. На рисунке

они обозначены соответственно 2(14) и 3(19). Это значит, что в зоне 6...25 км и 26...50 км зарегистрировано 14 и 19 разрядов. Далее грозовые очаги приблизились к пункту наблюдений и в зоне 0...5 км зарегистрировано 10 грозовых разрядов (б): во второй 21 и в третьей 41 разряд. Через час (з) первый регистратор прекратил запись грозовых разрядов, а работали все остальные. Грозовые зоны сместились к западу от пункта. Еще через час на территории в радиусе 50 км (е) счетчиками не было отмечено ни одного разряда. В этот период работал четвертый счетчик в зоне 50...100 км. По данным метеостанций и дальномеру один грозовой очаг находился к северо-востоку от Воейково на расстоянии 30...38 км. Пропуски разрядов счетчиками с амплитудным ограничением естественны, особенно, если грозовые разряды наблюдаются на расстояниях, близких к предельному радиусу действия грозорегистратора.

Слабо развитая сеть метеостанций в Ленинградской области потребовала расширения радиуса действия визуально-слухового метода до 10 км (на противогрозных полигонах он принимался равным 5 км).

Анализируя результаты наблюдений этим методом можно заметить одну общую для многих пунктов наблюдений ошибку, которая сводится к неправильному определению момента завершения грозового процесса. Правильно отметив начало грозы над пунктом (хорошо прослушивается акустический сигнал), наблюдатель не может определить ее завершения. В итоге грозовой процесс растягивается на несколько часов, что естественно вносит неконтролируемую при обработке ошибку и может значительно изменить реальную оценку продолжительности грозовой активности.

Практически грозы, наблюдаемые на пунктах (метеостанциях), не разделяются по времени прохождения очагов, хотя за весь период над пунктом их проходит несколько со значительным интервалом. Эти недостатки выражаются в трудностях детального анализа обстановки над метеостанцией и могут привести к затруднениям при интерпретации результатов сравнения различных методов. Целесообразно заменить или дополнить традиционный визуально-слуховой метод инструментальным.

В качестве грозорегистратора можно использовать обычный амплитудный грозорегистратор ПРГ с малым радиусом действия (5...10 км). Обладая высокой помехоустойчивостью, особенно на малых радиусах действия, простотой конструкции и обслуживания, они могут найти широкое применение на сети метеостанций. При решении специальных задач целесообразно применять фазовые дальномеры, точностные характеристики приема которых выше.

Дальномерные устройства с амплитудно-фазовым ограничением дальности, совмещенные с пеленгатором, позволяют локализовать грозовые очаги на фоне нескольких конвективных ячеек или выделить в них зоны грозовой деятельности.

И. А. Петренко, И. И. Кононов, С. М. Демькин

РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ

Наряду с традиционной задачей определения координат грозового очага, радиотехническими средствами решается задача определения координат положения молниевых разряда (МР) внутри грозового облака. Методом, обеспечивающим приемлемую точность, является активная локализация в метровом и дециметровом диапазонах.

Однако представляет интерес и более детальный анализ пространственного расположения отдельных составляющих МР. В частности, определение координат канала сильноточного разряда, места удара грозового разряда типа облако — земля.

Решение подобных задач методами активной локализации наталкивается на определенные трудности, обусловленные большим объемом области, ионизируемой разрядным процессом.

В настоящей работе рассматривается разностно-дальномерный (РД) метод, который может быть применен в геофизических исследованиях, предполагающих достаточно точное знание координат отдельных составляющих МР, а также использован для проверки точности других систем местоопределения.

Как известно, РД метод определения координат основан на определении с требуемой точностью разностей времен прихода сигнала от излучателя в базовые измерительные пункты и широко применяется в радионавигации. Известны и опыты применения РД метода в исследовании грозовых разрядов [5, 4].

Для определения координат отдельных частей МР может быть использовано радиоизлучение в различных диапазонах частот. В работах [5, 4] использовалось УКВ излучение. Однако при этом возникают трудности, связанные с выделением сильноточных главных ударов, так как соответствующее им УКВ излучение очень трудно обнаружить на фоне излучения, соответствующего другим стадиям разряда. С целью селекции главных разрядов можно использовать СДВ излучение. Осуществляя временную привязку по переднему фронту СДВ сигнала, можно решить за-

дачу определения местоположения основания (начала) разряда и использовать эти данные, например, при проверке пеленгаторов и однопунктных дальномеров. Поскольку в большинстве этих устройств используются особенности СДВ излучения МР, такая методика привязки обеспечивает высокий процент совпадений их срабатываний с запусками РД системы.

Для исследования других частей разряда можно использовать импульсы УКВ излучения, регистрируемые синхронно с СДВ излучением.

Общие принципы построения и оценки точности РД систем рассмотрены в целом ряде работ [1—3]. Поэтому в данной статье отмечены лишь некоторые особенности, связанные с конкретным

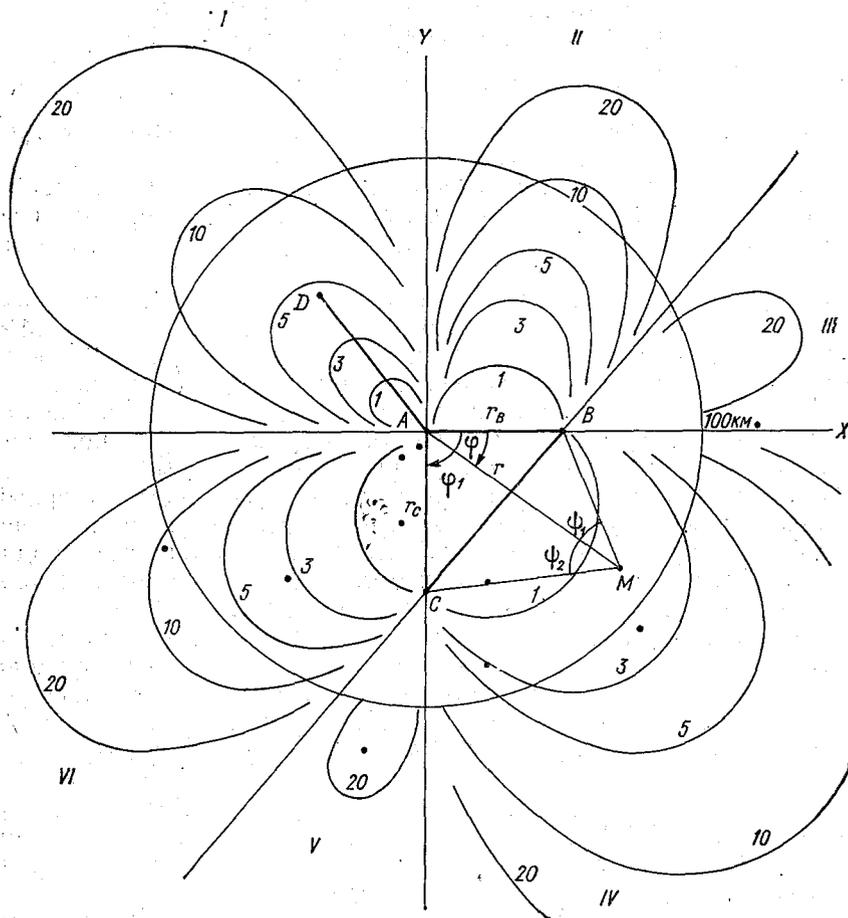


Рис. 1. Кривые равной точности для трех базовых пунктов А, В, С.
 r_A, r_C — расстояния между базовыми пунктами, ϕ_1 — угол между базовыми линиями,
 ϕ_1, ϕ_2 — углы, под которыми видны базовые линии.

размещением пунктов регистрации и способом технической реализации системы.

В сезон 1978 г. авторами была развернута РД система в четырех пунктах Ленинградской области (Петергоф, Воейково, Сиверская, Старорусская). Схема размещения пунктов, обозначаемых в последующем A, B, C, D , а также другие используемые обозначения приведены на рис. 1.

Пространственные координаты (X, Y, Z) источника излучения M могут быть найдены из решения системы трех уравнений, которые при совмещении начала координат с точкой A , а оси X — с направлением AB имеют вид:

$$\begin{aligned} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - \sqrt{(x - x_B)^2 + y^2 + z^2} &= c \tau_1, \\ \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - \sqrt{(x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + z^2} &= c \tau_2, \\ \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - \sqrt{(x - x_D)^2 + (y - y_D)^2 + z^2} &= c \tau_3. \end{aligned} \quad (1)$$

Вводя обозначения

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{R_B^2 - c^2 \tau_1^2}{2x_B}; & \alpha_2 &= \frac{R_C^2 - c^2 \tau_2^2}{2y_C}; \\ \alpha_3 &= \left[R_D^2 - c^2 \tau_3^2 - \frac{x_D(R_B^2 - c^2 \tau_1^2)}{x_B} \right] \frac{1}{2y_D}; \\ \beta_1 &= \frac{c \tau_1}{x_B}; & \beta_2 &= \frac{c \tau_2}{y_C} - \frac{x_C c \tau_1}{x_B y_C}; \\ \beta_3 &= \frac{c \tau_3}{y_D} - \frac{x_D c \tau_1}{x_B y_D}; & R &= \frac{\alpha_3 - \alpha_2}{\beta_2 - \beta_3}; \\ R_k &= \sqrt{x_k^2 + y_k^2} \end{aligned}$$

(здесь $x_k, y_k, (k=B, C, D)$ — координаты пунктов B, C, D , $\tau_{1,2,3}$ — разности времен прихода сигналов в базовые пункты), систему (1) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned} x &= \alpha_1 + \beta_1 R, \\ y &= \alpha_2 + \beta_2 R, \\ z &= \alpha_3 + \beta_3 R. \end{aligned} \quad (2)$$

В принципе можно учесть и различное высотное расположение пунктов. Однако для Ленинградской области пренебрежение этим фактором сказывается на точности местоопределения незначительно.

Погрешности оценок пространственных координат излучателя можно найти из системы уравнений:

$$c \Delta \tau_i = \Delta x \left(\frac{x}{R} + \frac{x - x_k}{R_k} \right) + \Delta y \left(\frac{y}{R} + \frac{y - y_k}{R_k} \right) +$$

$$+ \Delta z \left(\frac{z}{R} + \frac{z - z_k}{R_k} \right) \quad (3)$$

$$i = 1, 2, 3; \quad k = B, C, D.$$

Конкретные численные оценки показывают, что при величинах $z = 3 \dots 5$ км, которые могут иметь место для МР, оценка этой координаты с приемлемой точностью может осуществляться лишь в тех случаях, когда сама величина z , расстояние от излучателя до пунктов регистрации (а следовательно, и величины баз) одного порядка.

Для реализованной авторами схемы размещения пунктов (рис. 1) оценка величины z практически во всех случаях сопровождается погрешностями свыше 100% и вряд ли целесообразна. В то же время неучет z мало сказывается на погрешностях определения координат x, y .

В пренебрежении влиянием величины z координаты источника в проекции на горизонтальную плоскость проще всего находить в полярной системе координат (r, φ), связанной с точкой А. В этом случае справедливы уравнения

$$\begin{aligned} c \tau_1 &= r - \sqrt{r^2 + r_B^2 - 2rr_B \cos \varphi}, \\ c \tau_2 &= r - \sqrt{r^2 + r_C^2 - 2rr_C \cos(\varphi_1 - \varphi)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где обозначения соответствуют обозначениям на рис. 1.

Решая эту систему относительно r и φ , можно получить значения:

$$\begin{aligned} \varphi &= \arctg \frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 - \delta^2}}{\delta} - \arctg \frac{\beta}{\alpha}; \\ r &= \frac{a}{2(r_B \cos \varphi - c \tau_1)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{r_B}{a} - \frac{r_C}{b} \cos \varphi_1; \quad \beta = \frac{r_C}{b} \sin \varphi_1; \quad \delta = \frac{c \tau_1}{a} - \frac{c \tau_2}{b}; \\ a &\equiv r_B^2 - c^2 \tau_1^2; \quad b \equiv r_C^2 - c^2 \tau_2^2. \end{aligned}$$

Переход от r, φ к декартовым координатам не составляет труда.

Оценку погрешностей определения координат в рассматриваемом случае можно проводить, используя простые выражения [3]:

а) для детерминированных ошибок, обусловленных систематическими ошибками определения разностей времен прихода $\Delta \tau_1$ и $\Delta \tau_2$

$$\Delta M_{\text{дет}} = \frac{c}{2 \sin \gamma} \sqrt{\frac{\Delta \tau_1^2}{\sin^2 \frac{\varphi_1}{2}} + \frac{\Delta \tau_2^2}{\sin^2 \frac{\varphi_2}{2}} + \frac{2 \Delta \tau_1 \Delta \tau_2}{\sin \frac{\varphi_1}{2} \sin \frac{\varphi_2}{2}}, \quad (6)$$

б) для случайных ошибок

$$\Delta M_{\sigma} = \frac{c}{2 \sin \gamma} \sqrt{\frac{\sigma_{\tau_1}^2}{\sin^2 \frac{\psi_1}{2}} + \frac{\sigma_{\tau_2}^2}{\sin^2 \frac{\psi_2}{2}} + \frac{2 \rho \sigma_{\tau_1} \sigma_{\tau_2} \cos \gamma}{\sin \frac{\psi_1}{2} \sin \frac{\psi_2}{2}}}. \quad (7)$$

Здесь ρ — коэффициент корреляции между ошибками определения разностей времен прихода τ_1 и τ_2 , $\gamma = \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}$ (рис. 1).

Кривые равной точности (в км), соответствующие $\Delta M_{\text{дет}}$, рассчитанные по формуле (6) для трех пунктов *A*, *B*, *C* в предположении, что $\Delta \tau_1 = \Delta \tau_2 = 1$ мкс, изображены на рис. 1 тонкими сплошными линиями. Как видно из этого рисунка, величина $\Delta M_{\text{дет}}$ резко увеличивается по мере удаления от «центра» системы *A* и имеет максимальные значения вдоль продолжений базовых линий. Наибольшая точность обеспечивается при работе в зоне *III*, наименьшая — в зонах *II* и *IV*. В пределах внутренней части треугольника величина $\Delta M_{\text{дет}}$ составляет 0,3...0,5 км.

На этом же рисунке приведены в виде точек координаты МР, зарегистрированных 4 августа 1978 г. с 14 ч до 14 ч 30 мин мск. Всего за этот интервал времени было идентифицировано и определено местоположение 26 разрядов, что составило около 30 % общего числа зарегистрированных на пунктах атмосфериков. Из идентифицированных разрядов большинство группируются в очаг, расположенный к юго-западу от пункта *A*.

Поскольку грозовое облако было вне зоны максимальной точности системы, определить смещение координат отдельных источников УКВ излучения не удалось.

Рассмотрим некоторые технические особенности развернутой РД системы. В качестве сигнала, синхронизирующего работу системы, используется кадровый синхроимпульс телевидения. В каждом пункте измеряется интервал времени между принятым импульсом излучения молнии и ближайшим по времени кадровым синхроимпульсом. По значениям этих интервалов для всех пунктов и известным расстояниям до телецентра и определяется разность времен прихода. При этом погрешность выделения кадрового импульса не превышает 0,3 мкс. Такой способ синхронизации позволяет не предъявлять высоких требований к регистрирующей аппаратуре, поскольку измеряемый интервал не превышает периода кадровых синхроимпульсов — 20 мс, а стабильность не хуже 1 мкс на этом интервале обеспечивает любой серийный частотомер.

Для идентификации измерений в различных пунктах необходимо в дополнение к описанной выше синхронизации определять время прихода излучения с точностью 10 мс, что соответствует временной стабильности 10^{-6} за 1 час и также обеспечивается серийным частотомером. В качестве регистратора форм излучения используется осциллограф с фотопроставкой.

Излучение молнии поступает на УКВ приемник (частота настройки 110 мГц, полоса 200 кГц, чувствительность 0,5 мкВ)

и на фильтр 0,3...60 кГц, выделяющий импульс СДВ диапазона. СДВ сигнал воздействует на пороговое устройство, которое формирует импульс, запускающий регистрирующую аппаратуру, и измеритель интервалов времени, на другой вход которого поступает импульс, выделенный из телевизионного сигнала и соответствующий во времени первой врезке кадрового синхроимпульса.

Регистратор грубого времени, необходимый для идентификации, запускается ТВ синхроимпульсом, первым приходящим после сигнала времени радиостанции «Маяк». Этот выбор осуществляется схемой часового импульса. В процессе измерения фиксируется время, соответствующее началу развертки осциллографа. Окончательное уточнение времени прихода импульса излучения можно провести по осциллограмме. Суммарная аппаратурная ошибка данной системы не превышает 1 мкс.

Таким образом, оценки точности РД системы, а также пробные сеансы работы в реальных условиях показывают возможность ее использования для решения ряда геофизических задач, а также для проверки точностных характеристик однопунктных систем местоопределения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астафьев Г. П., Шебшаевич В. С., Юрков Ю. А. Радионавигационные устройства и системы. — М.: Советское радио, 1958. — 863 с.
2. Быков В. И., Никитенко Ю. И. Судовые радионавигационные устройства. — М.: Транспорт, 1976. — 399 с.
3. Сайбель А. Г. Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения. — М., 1958. — 55 с.
4. Kidder R. E. The locating of lightning flashes at ranges less than 100 km. — J. Atm. Terr. Phys., 1973, vol. 35.
5. Proctor D. E. A hyperbolic system for obtaining radio pictures of lightning. — J. Geophys. Res., 1971, vol. 76, N 6, p. 1478.

Н. И. Крохин, Б. В. Семагин, В. С. Снегуров, Н. А. Файзулин

К ОЦЕНКЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ

В работах, посвященных исследованиям электромагнитного излучения грозных разрядов обычно считается, что они являются вертикальными [2, 7]. Очевидно, более правильным является представление молнии в виде произвольно-ориентированного в пространстве электрического диполя. В настоящее время отсутствуют какие-либо количественные оценки пространственной ориентации такого излучателя.

Для поля произвольно ориентированного электрического диполя можно написать уравнения, связывающие вертикальную $E_z(t)$ и горизонтальную компоненты магнитного поля $H_{\varphi\rho}(t)$ с дипольным моментом источника $P(t)$ следующим образом

$$E_z(t) = E_z^b(t) + E_z^r(t), \quad (1)$$

$$H_{\varphi\rho}(t) = \sqrt{H_{\varphi}^2(t) + H_{\rho}^2(t)}. \quad (2)$$

Не останавливаясь на простых вычислениях, найдем значения $E_z(t)$ и $H_{\varphi\rho}(t)$:

$$E_z(t) = a[P''(t) + (1 + \lambda)\alpha P'(t) + (1 + \lambda)\alpha^2 P(t)], \quad (3)$$

$$H_{\varphi\rho}(t) = b[P''(t) + \alpha P'(t)], \quad (4)$$

где $\alpha = c/R$, c — скорость света, R — расстояние;

$$a = \frac{M}{2\pi R} [\cos\theta \cos^2\psi + \sin\theta \cos\psi \sin\psi \cos\varphi];$$

$$b = \frac{M}{2\pi Rc} \sqrt{\cos^2\theta \cos^2\psi + \sin^2\theta \sin^2\psi \cos^2\varphi};$$

$$\lambda = 2 \frac{\sin\theta \cos\psi \sin\psi \cos\varphi - \cos\theta \sin^2\varphi}{\cos\theta \cos^2\psi + \sin\theta \cos\psi \sin\psi \cos\varphi};$$

ψ — угол места; θ — угол наклона излучателя; φ — угол, характеризующий ориентацию горизонтальной составляющей излучателя; λ — определяет пространственную ориентацию излучателя.

Импульсный измеритель дальности [2, 4, 5] построен в предположении, что молния представляет собой вертикальный электрический диполь ($\lambda=0$). При $\lambda \neq 0$ появляется поляризационная погрешность. Автором работы [6] проведено экспериментальное исследование (с помощью имитатора) поляризационных погрешностей и показано, что в диапазоне $-1 < \lambda \leq 1$ оценка дальности \bar{R} связана с действительной величиной R и параметром λ соотношением

$$\bar{R} = \frac{R}{1 + \lambda}. \quad (5)$$

Погрешность соотношения (5) зависит от вида дипольного момента $P(t)$ источника и расстояния R . Однако на удаленностях до 60 км ошибка не превышает 20 % в широком диапазоне вариаций формы $P(t)$.

Из выражения (5) следует, что для определения λ достаточно измерить расстояние до разряда с помощью дальномера и некоторого эталонного устройства. В качестве эталона может использоваться радиолокационная станция метрового диапазона [1, 3]. Разрешающая способность станции достаточно велика ($\pm 1,5$ км). Однако, как показывают экспериментальные данные, в зоне до 70 км реальные засветки от молний на экране индикатора в среднем составляют до 10 км [1] и 5 км [3]. Следовательно, погрешность определения расстояния в среднем ± 5 км.

В период грозового сезона 1974/75 г. в Ленинградской области была проведена синхронная регистрация атмосфериков с помощью импульсного электромагнитного дальномера и РЛС метрового диапазона. Гроздальномер работал с антеннами, действующая высота которых составляла 5 см в полосе частот от 200 до 10 000 Гц. Порог запуска дальномера составлял 2 В/м. За период наблюдений было зарегистрировано 120 атмосфериков на удалении до 80 км. Для оценки значений параметра λ были отобраны атмосферики, зарегистрированные РЛС на удаленностях 25 ± 5 ; 40 ± 5 и 60 ± 5 км и дальномером. Из соотношения (5) определялись величины λ , затем вычислялось среднее значение λ и среднее квадратичное отклонение σ_λ . Результаты обработки представлены ниже:

R км	25	40	60
λ	-0,2	-0,1	-0,04
σ_λ	0,5	0,4	0,3

Таким образом, в зоне до 50...60 км необходимо учитывать ошибки, внесенные ориентацией канала молний в пространстве. На больших удаленностях $\lambda \rightarrow 0$ и практически не влияет на оценку дальности.

Если допустить, что погрешности определения расстояния вызваны только различной ориентацией каналов молний в пространстве, то влияние этого фактора представляется заметным на расстояниях до 50...60 км.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гальперин С. М., Степаненко В. Д., Осетров А. С. Радиолокационное обнаружение молний. — Труды ГГО, 1974, вып. 301, с. 81—87.
2. Кононов И. И. Импульсный электромагнитный метод определения удаленности грозовых очагов. — Труды ГГО, 1971, вып. 263, с. 46—54.
3. Качурин Л. Г. и др. Радиолокационные характеристики грозовых облаков в сантиметровом и метровом диапазоне радиоволн. Атмосферное электричество. — Тр. I Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству, 1976, с. 185—190.
4. А. с. 467307 (СССР). Устройство для определения дальности до грозовых очагов/Н. А. Файзулин, Н. И. Крохин, В. Д. Плотников, И. И. Кононов. — Зявл. — 30.11.73, № 1974683/26—9. — Бюл. ГК СМ СССР по делам изобретения и открытий, 1975, № 14.
5. Файзулин Н. А., Кононов И. И., Плотников В. Д. Импульсный электромагнитный грозодальномер ближней зоны. — Труды ГГО, 1975, вып. 358, с. 116—123.
6. Файзулин Н. А., Плотников В. Д., Александров А. И. Анализ точностных характеристик импульсного электромагнитного грозодальномера. — Б кн.: Теория и техника радиолокации, радионавигации и радиосвязи в гражданской авиации. М., 1976, вып. 2, с. 90—93.
7. Штейников Ю. В. Экспериментальное исследование дипольных и токовых моментов грозовых разрядов. — Проблемы дифракции и распространения волн, 1968, вып. 7, с. 198—208.

К ВОПРОСУ О ПОИСКАХ БИОЛОГИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРИКОВ

Физически вполне закономерная и понятная тенденция к снижению биологического действия электромагнитных излучений малой мощности при увеличении длины волны, наглядно проявляющаяся при переходе от гамма-лучей к рентгеновскому излучению, ультрафиолетовой радиации и т. д., дает все основания считать, что атмосферерики, относящиеся к самому длинноволновому концу шкалы электромагнитных колебаний и имеющие всегда незначительную мощность, должны быть биологически неэффективны. В пользу этого вывода говорит также отсутствие каких-либо заметных биологических эффектов, вызванных развитием электротехники и радиотехники на рубеже нашего века. Промышленное и бытовое применение переменного тока, а также развитие радиосвязи и радиовещания вызвало появление электромагнитных полей, в среднем значительно превышающих уровень поля, создаваемого в этом диапазоне естественными источниками (грозами). Например, радиовещательные станции, работавшие на средних и длинных волнах в некоторых европейских странах, США и Японии имели еще в 1956 г. общую мощность около 17 000 кВт [5]. Теперь мощность одних передатчиков зарубежных метеослужб превышает в сумме 1500 кВт [10]. Следует также учесть, что осуществление радиосвязи непосредственно связано с возможностью получения сигналов, превышающих уровень естественных помех в области рабочей частоты. Значительный выигрыш в этом направлении, особенно существенный для дальней радиосвязи, дает уменьшение полосы пропускания приемников. Тем не менее даже при существующем фоне, создаваемом радиопередатчиками и техническими помехами, атмосферерики вполне уверенно принимаются в низкочастотном диапазоне и используются для наблюдений за грозовой деятельностью.

Результаты тщательного исследования атмосферериков, проводившегося в течение десятков лет в связи с решением отдельных конкретных задач, ничего не дают для подтверждения правильности предположения, встречающегося даже в научной литературе [14, 18, 19], о биологическом действии низких частот, отно-

сящихся к области резонансов полости Земля — ионосфера, изучение которых особенно затруднено техническими помехами.

Случайное наличие каких-либо биологически активных низких частот, например, близких к альфа-ритмам мозга или частотам клеток [3] и воспринимаемых на уровне атмосфериков, вообще трудно было бы понять с эволюционной точки зрения. Попытки исследования геохронологии грозовой деятельности пока не дают результатов [15], но, несмотря на большие изменения климата [16], грозы безусловно имелись на Земле в течение периода эволюционного порядка, достаточного, например, для приспособления глаза к солнечному свету [4]. Приспособление не исключает целиком зависимость от природных явлений и погодных условий, имевших жизненно важное значение даже в историческое время. Возможно, что гадание по молниям в древнем Риме [1] первоначально имело какое-то реальное основание, так как грозы, идущие с юго-запада, могли указывать на приближение циклона и, следовательно, непогоды, а грозы на юго-востоке, вероятно, теплового характера, рассматривались в качестве благоприятного признака. В древности зависимость исхода различных мероприятий от погоды была особенно сильной, вызвав, в частности, на другом конце света появление легенды о «комикадзе», т. е. «божественном ветре», причем буря, по крайней мере, один раз действительно спасла Японию от монгольского вторжения [2]. Можно предполагать, что и в самом далеком доисторическом прошлом грозы имели значение для живых организмов в основном не из-за опасности поражения молнией, а вследствие сопровождающих их обычно бурь и резкого изменения погодных условий, которые вызываются иногда общей перестройкой макропроцессов атмосферной циркуляции [16].

В процессе эволюции определенные преимущества могли бы иметь те представители животного мира, которые успевали приготовиться к наступающей непогоде или укрыться от нее, почувствовав изменение фона атмосфериков. Эволюционное развитие могло бы способствовать выработке рефлекса на изменение фона низкочастотных электромагнитных колебаний, хотя физические возможности приобретения его остаются сейчас совершенно неясными. Замеченная уже невозпроизводимость опытов по воздействию электромагнитных полей [11] может быть тогда объяснена чувствительностью только к изменениям поля, а не его абсолютной величине, значительной инерцией эффекта и постепенным стиранием его как вследствие выработки других способов приспособления к изменению окружающей обстановки, так и благодаря наличию теперь значительных искусственных полей. Поиски влияния средних суточных и годовых колебаний уровня атмосфериков, имеющих относительно большую величину, нельзя считать оправданными из-за отсутствия каких-либо видимых причин для появления такого эффекта, незаметного на фоне регулярных периодических колебаний всего комплекса метеорологических элементов, оказывающих явное и прямое влияние на организм.

Еще более долгопериодные колебания среднего уровня атмосфериков рассматривались в связи с работами, касающимися вопроса о влиянии солнечной активности на грозовую деятельность. Однозначная связь между изменениями солнечной активности и грозовой деятельности отсутствует, в разных районах наблюдаются как синфазные, так и противофазные колебания в пределах 11-летнего цикла [7, 8]. Замеченный уже давно эффект внезапного усиления атмосфериков при солнечных вспышках вследствие своей кратковременности (порядка 1 часа) не оказывает заметного влияния на средний уровень атмосфериков в течение более длительных периодов [13]. Солнечные вспышки безусловно воздействуют на ионосферу и вследствие изменения условий распространения сверхдлинных радиоволн сопровождаются усилением атмосфериков на частотах f выше 15 кГц и ниже 1 кГц и ослаблением при $1 < f < 15$ кГц [9, 17], но воздействие вспышек на тропосферу и метеорологические процессы так явно не обнаруживается. Изменения уровня атмосфериков при солнечных вспышках обычно значительно меньше изменений, встречающихся в разное время и обусловленных метеорологическими факторами, поэтому указание на возможность биологического действия эффекта усиления атмосфериков [11, 12] нельзя считать достаточно обоснованным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авгурь. — Энциклопедический словарь, т. 1. СПб., изд. Бракгауз и Ефрон, 1890, с. 62.
2. Аракава Х. Погода и большие исторические события в Японии. — В кн.: Х. Аракава. Изменения климата. Избранные статьи. Л.: Гидрометеоздат, 1975, с. 57—60.
3. Бреслер С. Е. Проблемы биофизики. — Успехи физических наук, 1969, т. 98, в. 4, с. 653—708.
4. Вавилов С. И. Глаз и Солнце. — 5-е изд. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950. — 123 с.
5. Гусятинский И. А., Пирогов А. А. Радиосвязь и радиовещание. — Советское радио, 1974. — 176 с.
6. Камышанова В. А. Грозовая активность на территории СССР и ее связь с формами атмосферной циркуляции северного полушария. — Труды ГГО, 1973, вып. 277, с. 18—26.
7. Клейменова З. П. Об изменении грозовой активности в солнечном цикле. — Метеорология и гидрология, 1967, № 8, с. 64—68.
8. Лихтер Я. И., Колоколов В. П., Клейменова З. П. Солнечная активность и грозовая деятельность. — Труды ГГО, 1969, вып. 242, с. 104—112.
9. Мурзаева Н. Н. Регулярный шумовой фон ОНЧ излучения во время солнечных вспышек. — В кн.: Связь ОНЧ излучений верхней атмосферы с другими геофизическими явлениями. Якутск, изд. Якутского филиала СО АН СССР, 1977, с. 21—34.
10. Расписание радиопередач метеорологических сведений зарубежных центров. — Л.: Гидрометеоздат, 1974. — 348 с.
11. Холодов Ю. А. Реакции нервной системы на электромагнитные поля. — М.: Наука, 1975. — 207 с.
12. Холодов Ю. А. Шестой незримый океан. — М.: Знание, 1978. — 112 с.
13. Эллисон М. А. Солнце и его влияние на Землю. — М.: Физматгиз, 1959. — 216 с.

14. Dettwiller J. La guerre météorologique — mythe ou réalité de demain?— *La Météorologie*, 1975, N 2, p. 135—145.
15. Fleischer R. Search for neutron generation by lightning.— *J. Geophys. Res.*, 1975, vol. 80, N 36, p. 5005—5009.
16. Hänsel C. Klimaänderungen — Erscheinungsformen und Ursachen.— Leipzig: Teubner Verlagsges., 1975.—98 S.
17. König L. Unsichtbare Umwelt.— München: Heinz Moos Verlag, 1975.— 176 S.
18. Ludwig W., Persinger M. A., Ossenkopp K.— P. Physiological effects of electromagnetic fields in the ELF region.— *Archiv für Meteorol., Geophys. und Bioklimatol.*, Ser. B, 1973, Bd 21, S. 99—116.
19. Reiter R. Grundgedanken zum Problem Luftelektrizität und Raumklima.— *Klima+Kaltzeitung*, 1974, Bd 2, N 3, S. 109—112.

В. П. Гордюк

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

В пятидесятых годах в отделе атмосферного электричества Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова были разработаны типовые структурные схемы приборов для измерения напряженности электрического поля атмосферы — схемы ротационных электростатических флюксметров, содержащих электростатические генераторы с плоскими многолопастными пластинами. На их основе были созданы конструкции приборов для измерений в приземном слое, свободной атмосфере и верхних слоях атмосферы [1, 2, 3]. Эти приборы обладали рядом свойств, определяемых, в частности, элементной базой того времени. Можно было предположить, что использование в аппаратуре, появившейся в начале 70-х годов, новой элементной базы, и прежде всего операционных усилителей в интегральном исполнении, позволит существенно улучшить некоторые свойства аппаратуры. Эти возможности были использованы, и на базе их реализации была создана новая структурная схема приборов для измерения напряженности электрического поля, что действительно позволило относительно простыми средствами улучшить свойства приборов. Эту структурную схему, вероятно, можно будет использовать как основу при разработке различных вариантов приборов в ближайшем будущем.

Проводимые в настоящее время измерения напряженности электрического поля преследуют широкий круг задач. Автор ограничился исследованиями путей построения аппаратуры для измерений в приземном слое атмосферы, которые включают в себя режимные измерения на специализированных сетях Госкомгидромета, на полигонах активных воздействий, режимные специализированные измерения при вулканологических, биологических и прочих исследованиях, лабораторные измерения. Измерительная аппаратура должна удовлетворять определенному диапазону требований, обусловленному как целями измерений, так и теми усло-

виями, в которых она работает, — рабочими условиями применения и особенностями эксплуатации. При атмосферно-электрических измерениях первичные преобразователи приборов работают в условиях открытой атмосферы, в осадках, в условиях метели, поземки, вторичные преобразователи — в помещении, а в экспедиционных условиях — в палатках или различного рода укрытиях, в довольно жестких условиях. Линии передачи сигнала от первичных к вторичным преобразователям работают, как правило, при наличии помех со стороны сети как от внутренних источников (электродвигатель и кабель его питания), так

Таблица 1

Основные требования к характеристикам прибора для измерения напряженности электрического поля атмосферы

Наименование характеристики	Значение характеристики
Диапазон измерений, В/м	
1 поддиапазон	$\pm(0 \dots 600)$
2 поддиапазон	$\pm(0 \dots 6000)$
Предел допускаемой погрешности измерений, В/м	
1 диапазон	$\pm(10 \dots 0,05E)$
2 диапазон	$\pm(100 \dots 0,05E)$
Входной импеданс усилителя, кОм	≤ 10
Выходной импеданс, Ом	≤ 100
Время установления показаний на уровне 67 %, с	0,01; 1; 100
Межоперочный интервал, дни	≥ 10
Нелинейность динамической характеристики, %	
1 поддиапазон	$\leq 0,5$
1 поддиапазон	$\leq 1,5$

и от других линий и приборов. Режим работы приборов длительный, непрерывный. Возможна работа в автоматизированных информационно-измерительных системах при минимальном обслуживании и длительных межоперочных интервалах, в стационарных и экспедиционных условиях, при обслуживании персоналом, не имеющим специальной технической подготовки. На основе анализа условий работы приборов и требований со стороны пользователей разработаны требования к средствам измерения напряженности электрического поля атмосферы в виде метрологических и других характеристик, которые приведены в табл. 1.

Выдвинутые требования реализуются в приборе с условным названием «Поле-2», структурная схема которого приведена на рис. 1. Штрихпунктирной линией здесь объединены элементы первичного преобразователя, остальные элементы вместе с блоком

питания, не показанным на схеме, образуют вторичный преобразователь. В первичном преобразователе с электродвигателем ЭД находится электростатический генератор (ЭСГ) Г1, вырабатывающий переменный ток, пропорциональный величине измеряемой напряженности электрического поля.

Конструкция генератора обычно для электростатических флюксометров системы ГГО [2, 3]. При напряженности электрического поля 500 В/м амплитуда тока составляет примерно 10^{-8} А. Генератор нагружен на предварительный усилитель тока ПУ, расположенный в корпусе первичного преобразователя. Во вторичном преобразователе содержатся резонансный усилитель ($>$), фазочувствительные синхронные детекторы ДМ1

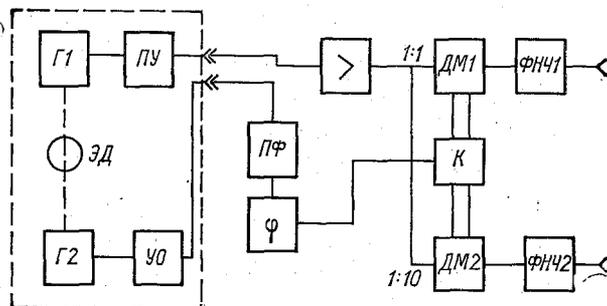


Рис. 1. Структурная схема основной части прибора для измерения напряженности электрического поля атмосферы.

и ДМ2 первого и второго измерительных каналов, соответствующих первому и второму диапазонам измерения, фильтры низкой частоты ФНЧ1 и ФНЧ2, формирующие частотную характеристику прибора. Кроме того, во вторичном преобразователе находится узел формирования управляющего напряжения, состоящий из полосового фильтра ПФ, фазовращающего каскада и формирователя прямоугольных импульсов Ф, управляющих работой синхронных детекторов через компоктор К. Генератор управляющего напряжения Г2 вместе со своим усилителем-ограничителем УО расположен в корпусе первичного преобразователя и конструктивно объединен с валом модулятора ЭСГ для достижения синхронизма. Как видно, в целом схема прибора построена по принципу МДМ-усилителей постоянного тока, где в качестве модулятора медленно меняющейся величины выступает ЭСГ. Отличие состоит в том, что при модуляции в данном случае одна физическая величина преобразуется в другую, т. е. напряженность электрического поля в ток. При создании приборов для измерения напряженности электрического поля атмосферы возникает

ряд задач, связанных как со спецификой построения МДМ-усилителей, так и с особенностями применения таких приборов.

Рассмотрим, каким образом на основе применения интегральных микросхем операционных усилителей (ОУ) удастся улучшить характеристики приборов. Прежде всего, это решается применением ОУ с глубокими отрицательными обратными связями (ООС), вынесением предварительного усилителя ПУ в блок первичного преобразователя, применением активных фильтров на основе ОУ, построением демодуляторов по ключевой схеме с применением МОП-транзисторов, применением оптоэлектронных приборов для генерации опорного напряжения.

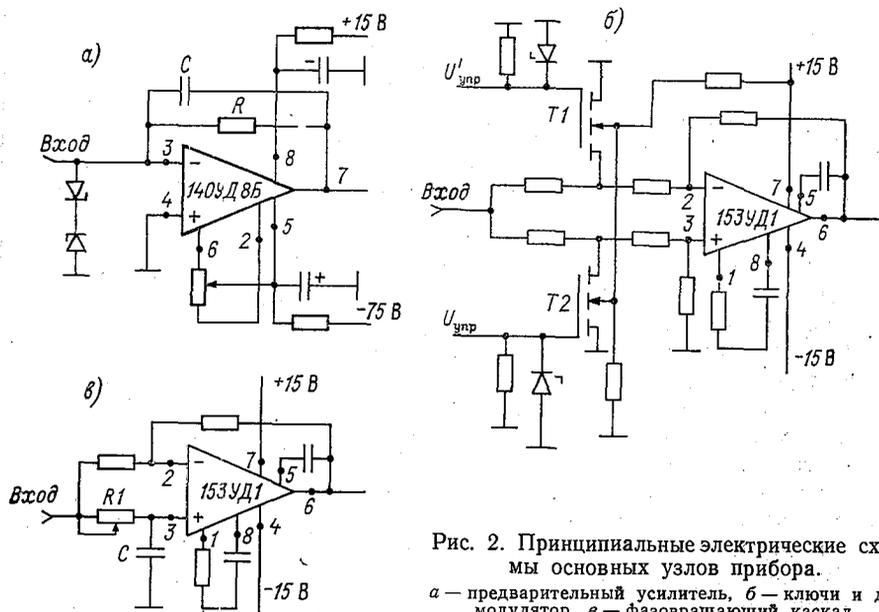


Рис. 2. Принципиальные электрические схемы основных узлов прибора.
 а — предварительный усилитель, б — ключи и демодулятор, в — фазовращающий каскад.

Предварительный усилитель ПУ (рис. 2а) представляет собой операционный усилитель, охваченный глубокой параллельной по входу и выходу ООС. Глубина обратной связи

$$F = 1 - K_0 \beta,$$

где K_0 — коэффициент усиления ОУ без ОС; β — глубина ОС (составляет величину порядка $10^4 \dots 10^5$). При такой большой глубине обратной связи значительно снижается влияние изменения коэффициента усиления ОУ на коэффициент передачи сигнала усилителем

$$\delta K = \frac{\delta K_0}{1 - K_0 \beta} = \frac{\delta K_0}{F},$$

где δK_0 , δK — относительные изменения коэффициентов усиле-

ния. При этом стабильность коэффициента передачи усилителя $K = -Z_{oc} = \frac{R_0}{\sqrt{1 + (\omega R_0 C)^2}}$ практически полностью определяется стабильностью пассивных элементов. Входной импеданс усилителя $Z_{вх} = Z_0/F$ представляет собой весьма малую величину, которая может исчисляться сотнями ом. Поэтому усилитель хорошо согласуется с ЭСГ, являющимся по своей природе источником тока. Выходной импеданс составляет величину порядка долей ома. Большая глубина ООС, следствием которой является высокая стабильность ПУ, позволила разместить его в корпусе первичного преобразователя, хотя, как упоминалось, он работает в открытой атмосфере. В результате такого конструктивного решения значительно снижены наводки в цепи входа усилителя, наиболее уязвимой для помех, повышена помехоустойчивость линии передачи сигнала от первичного ко вторичному преобразователю благодаря весьма низкому значению выходного импеданса предварительного усилителя. Таким образом, появилась возможность расширить динамический диапазон как усилителя, так и в целом прибора за счет уменьшения нижней границы измеряемой напряженности электрического поля.

Напомним, что в варианте измерителя напряженности поля, известного под условным наименованием «Поле-1» [3], используется двухканальный усилитель, в то время как в приборе «Поле-2» разделение на измерительные каналы осуществляется после усилителя. Практика измерений с использованием прежних приборов напряженности поля показала, что плохая помехоустойчивость входных цепей усилителя является весьма серьезным препятствием в работе, иногда вообще не дающая возможности производить измерения.

С использованием предложенной схемы разрешается противоречие, существовавшее в приборах, где выделялось напряжение на измерительном сопротивлении, включенном на выходе ЭСГ, заключавшееся, с одной стороны, в стремлении увеличить входное сопротивление для получения достаточно большого напряжения на выходе генератора, а с другой — уменьшить его для получения приемлемого низкого значения входного импеданса усилителя. Как упоминалось, входной импеданс усилителя в F , т. е. в $10^4 \dots 10^5$, раз меньше измерительного сопротивления R , включаемого в цепь ООС, т. е. большая величина F позволяет выбирать достаточно большие значения измерительного сопротивления при весьма малом входном импедансе, что допускает работу прибора в более жестких условиях при возможности ухудшения изоляции в ЭСГ. Для сравнения отметим, что входной импеданс прежних приборов составляет величину в несколько сот килоом.

Применение полосовых активных фильтров позволяет значительно повысить помехоустойчивость приборов. В приборе применен двухкаскадный полосовой фильтр с шириной полосы пропускания на уровне $-0,5$ дБ примерно 20 Гц. Каждый из каскадов реализован на основе ОУ с многопетлевой обратной связью. Та-

кой тип реализации активных фильтров характеризуется низкими чувствительностями параметров фильтра и изменением элементов, не превышающим единицу [4]. Ввиду большого коэффициента усиления ОУ (десятки и сотни тысяч) исключается влияние неустойчивости K_0 ОУ, и стабильность целиком определяется чувствительностями параметров фильтра и стабильностью пассивных элементов.

Простота реализации активных фильтров позволила ввести переключаемые фильтры низкой частоты второго порядка, включенные на выходе прибора. Фильтры реализованы на основе зависимых источников типа ИНУН, построенных на ОУ [4]. Фильтры имеют время установления показаний 0,01, 1 и 100 с. Напряжение шумов на выходе прибора при времени установления 0,01 с не превышает единиц милливольт, что составляет доли процента ($\sim 0,2\%$) от конечного значения шкалы. С большими временами установления шумы (в основном не полностью подавленная несущая) еще меньше. Это значительно расширяет динамический диапазон прибора за счет уменьшения нижней измеряемой границы. На уровне отношения сигнал/шум, равном 3, нижняя граница составляет примерно 3 В/м, что подтверждено экспериментально. Демодулятор, осуществляющий двухполупериодное выпрямление, выполнен по ключевой схеме (рис. 2б). В качестве ключей применены серийные аналоговые коммутаторы серии 190 на полевых МОП-транзисторах $T1$ и $T2$. Ключи управляются прямоугольными импульсами, формируемыми компаратором K с фазоинвертором. Применение такой схемы демодуляции дает ряд преимуществ по сравнению с другими фазочувствительными выпрямителями. Здесь осуществляется хорошая развязка цепей сигнала и управления без применения трансформаторов. Ввиду малой проходной емкости управляющее напряжение не проникает в цепи сигнала. Сигнал любой полярности передается с высокой точностью, так как переключатели на полевых транзисторах не имеют нулевого остаточного напряжения. Выбирая элементы синхронного детектора таким образом, чтобы $R_{откр} \ll R \ll R_{закр}$, можно свести к минимуму влияние неустойчивости сопротивлений каналов транзисторов в открытом $R_{откр}$ и закрытом $R_{закр}$ состояниях. Поскольку отношение $R_{закр}/R_{откр}$ представляет собой весьма большую величину (порядка $10^4 \dots 10^5$), выполнение этого условия не представляет трудности.

В данном приборе автор отказался от применения электромагнитного генератора, являющегося дополнительной нагрузкой на электродвигатель ЭД и вызывающего технологические сложности при изготовлении. Для генерирования управляющего напряжения применен оптоэлектронный генератор на паре светодиод—фотодиод с прерыванием потока лучистой энергии (в инфракрасном диапазоне) непрозрачным диском с прорезями. Генератор практически не потребляет энергии от электродвигателя.

Необходимо отметить еще способ согласования фаз. Для согласования применен специальный фазовращающий каскад, также

построенный на ОУ. Изменением сопротивления резистора $R1$ (рис. 2 в) можно менять фазу синусоидального сигнала на величину

$$G = \operatorname{arctg} \frac{2 \omega RC}{1 - (\omega RC)^2}.$$

При этом коэффициент передачи каскада остается постоянным. В отличие от ранее применявшегося способа, заключавшегося во вращении статора электромагнитного генератора и согласовании фаз по усредненному значению выходного сигнала, имеется возможность настройки по одному полупериоду сигнала, снимаемого с детектора, что позволяет весьма точно согласовать фазы сигнала и управляющего напряжения. Это обстоятельство может иметь значение при работе в условиях, когда на измерительные пластины натекают значительные токи, не связанные с измеряемым полем. В этом случае сигнал помехи сдвинут на 90° относительно измеряемого сигнала [1]. Выходное напряжение, обусловленное измеряемым полем, пропорционально $\cos \varphi$, а помехой такого рода является $\sin \varphi$, где φ — угол сдвига фазы относительно управляющего напряжения. Таким образом, при точной настройке фазы помеха полностью подавляется.

В результате опытной эксплуатации прибора и лабораторных исследований, продолжавшихся несколько месяцев, подтверждена разумность принятых технических решений, получены технические характеристики прибора не хуже представленных в табл. 1, и можно надеяться, что разработанная структурная, а также электрическая схема прибора напряженности электрического поля послужит основой для создания ряда электростатических флюксметров различных назначений.

В заключение выражаю благодарность Я. М. Шварцу за постановку задачи и советы при выполнении работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гдалевич Г. Л., Имянитов И. М., Шварц Я. М. Электростатический флюксметр, предназначенный для измерений в высоких слоях атмосферы. — Космические исследования, 1965, 3, вып. 1, с. 102—110.
2. Имянитов И. М. Приборы и методы для изучения электричества атмосферы. — М.: Гостехиздат, 1957. — 483 с.
3. Михайловская В. В., Назаренко О. М. Прибор для измерения напряженности электрического поля. — Труды ГГО, 1977, вып. 350, с. 142—146.
4. Хьюлсман Л. П. Теория и расчет активных РС-цепей. — М.: Связь, 1973.

*Я. М. Шварц, Г. П. Ваюшина, Л. В. Огурева,
Л. Г. Соколенко, Ю. А. Якимайнен*

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА АТМОСФЕРНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСТВОМ

1. Введение

В работах [1, 5] излагались некоторые принципы проведения автоматизированных наблюдений за атмосферным электричеством. В работе [1] кратко описаны основные элементы установки для проведения таких наблюдений, которая в то время еще разрабатывалась, а в работе [5] приведены результаты некоторых методических исследований возможности перехода от непрерывных измерений величин атмосферного электричества к дискретным измерениям. К настоящему времени закончена разработка экспериментального образца автоматической станции для измерения основных величин атмосферного электричества (АСАЭИ) и выполнен ряд работ, включающих измерения с обработкой данных на ЭВМ.

Переход от наблюдений за атмосферным электричеством с помощью средств измерений с визуализированной системой регистрации и ручной обработкой данных к наблюдениям с помощью автоматизированных систем с обработкой данных на ЭВМ, в результате которой на печать выводятся конечные результаты измерений, требует преодоления психологического барьера. Этому способствуют методические исследования ячейки автоматизированной системы, раскрывающие особенности технологии процесса получения информации. К изложению их результатов мы и переходим.

2. Описание аппаратуры

Экспериментальный образец АСАЭИ состоит из датчиков градиента потенциала V' электрического поля атмосферы, электропроводности λ воздуха, числа N грозových разрядов, тридцатиканального аналого-цифрового преобразователя с перфоратором и специализированным измерительным блоком (УИП-1), устройства сопряжения датчиков с измерительным блоком [2]. Для обработки данных использовалась ЭВМ М-6000. Условные на-

именования датчиков «Поле-1», «Электропроводность», «Гроза» соответственно.

В данной работе использовано десять измерительных каналов: семь для измерений величин атмосферного электричества (табл. 1), три для контроля работы УИП-1. Частота опроса измерительных каналов, принятая в соответствии с рекомендациями, содержащимися в [5], равна одному опросу в пять минут.

В качестве измерителя градиента потенциала электрического поля атмосферы использован электростатический флюксометр ротационного типа с плоскими пластинами. Он почти полностью описан в [9]. Датчик «Электропроводность» состоит из трех блоков: первичного преобразователя, вторичного преобразователя, блока управления и питания. В первичном преобразователе содержатся аспирационный конденсатор и турбонасос. Особенности конструкции конденсатора являются размещение собирающей внутренней обкладки конденсатора в его передней части и установка перед внутренней обкладкой обтекателя, защищающего носовую часть обкладки от попадания частиц аэрозолей на нее [3, 4].

Воздушный канал аспирационного конденсатора имеет относительно высокое аэродинамическое сопротивление.

Вторичный преобразователь представляет собой электрометрический усилитель тока У5-7, в электрическую схему которого внесены небольшие, не имеющие принципиального характера изменения.

В автономном режиме датчик осуществляет последовательное автоматическое измерение электропроводности воздуха обеих полярностей. Из-за того, что схема автоматического управления датчика не была согласована со схемой автоматического управления работой станции было использовано два датчика, каждый из которых работал в режиме непрерывного измерения полярной электропроводности воздуха. Датчик числа грозовых разрядов состоит из антенны, блока первичных преобразователей и вторичного преобразователя. В принципиальном отношении первичный преобразователь представляет собой счетчик импульсов напряжения, наводимых на антенне грозовыми разрядами, с заданным порогом срабатывания. Счетчик имеет низкоомный выход. Электрическая схема счетчиков с эффективным радиусом действия 10 и 25 км примерно соответствует схеме счетчика ПРГ-15, описание которого содержится в [8]. Электрическая схема счетчика с эффективным радиусом действия 100 км несколько иная. В отличие от первых двух счетчиков, работающих на резонансной частоте $60 \text{ кГц} \pm 10 \%$ при полосе пропускания $5 \text{ кГц} \pm 20 \%$, третий счетчик работает в полосе частот $1,5 \pm 0,7 \text{ кГц} \dots 20 \text{ кГц} \pm 10 \%$. Вторичный преобразователь — это преобразователь числа импульсов в сопротивление.

Оперативное обслуживание комплекса осуществлялось одним наблюдателем с квалификацией инженер-электрик.

Технические характеристики АСАЭИ

Условный номер канала	Наименование величины	Диапазон	Предел допускаемой погрешности	Установленные показатели средств измерений до 95 %
1	Градиент потенциала электрического поля атмосферы V_1	± 500 В/м	$(\pm 20 \pm 0,05 V_1)$ В/м	10 с
2	Градиент потенциала электрического поля атмосферы V_2	± 5000 В/м	$(\pm 200 \pm 0,05 V_2)$ В/м	10 с
3	Положительная электропроводность воздуха λ_+	$0 \dots 30 \cdot 10^{-15}$ См/м	$(\pm 1,5 \cdot 10^{-15} \pm 0,05 \lambda_+)$ См/м	40 с
4	Отрицательная электропроводность воздуха λ_-	$0 \dots 30 \cdot 10^{-15}$ См/м	$(\pm 1,5 \cdot 10^{-15} \pm 0,05 \lambda_-)$ См/м	40 с
5	Число грозových разрядов N_1	10 км	25 % по радиусу, $\pm 1 \pm 0,1 N_1$	
6	Число грозových разрядов N_2	25 км	25 % по радиусу, $\pm 1 \pm 0,1 N_2$	
7	Число грозových разрядов N_3	200 км	25 % по радиусу, $\pm 1 \pm 0,1 N_3$	

3. Установка аппаратуры

Первичные преобразователи датчиков были размещены на наблюдательной площадке пункта измерений величин атмосферного электричества в Воейкове, а вторичные преобразователи и устройство сопряжения — в помещении пункта, кроме вторичного преобразователя датчика «Гроза», который был помещен в помещении метеостанции на расстоянии ≈ 300 м от пункта измерений вместе с УИП-1. Соединение датчиков с УИП-1 кабельное.

Первичный преобразователь датчика «Поле-1» был установлен в центре сооружения, представляющего собой металлическую сетку с ячейками 9×9 см² площадью 3×3 м², натянутую на высоте 1 м на столбах параллельно поверхности земли. В качестве сетки использована металлическая сетка ограды метеостанций. Первичный преобразователь был установлен таким образом, чтобы плоскость его охранного кольца находилась примерно на одном уровне с плоскостью сетки. Расстояние от центра сооружения до стены помещения 10 м. Цель такой установки — уменьшить влияние снежного покрова и снежных заносов на измерения.

Первичные преобразователи датчиков «Электропроводность» установлены на металлической подставке у западной стены помещения, высота входного отверстия аспирационного конденсатора от поверхности земли 1,5 м, расстояние от входного отверстия до стены 60 см.

Антенна датчика «Гроза» расположена на расстоянии 12 м от стены помещения, высота антенны 6 м. Помещение измерительного пункта — одноэтажный кирпичный дом с шиферной крышей, площадь дома 200 м², высота конька крыши 7 м.

4. Обработка данных

Выходная информация АСАЭИ записана на перфоленте в виде последовательности телеграмм, печатаемых один раз в пять минут. Каждая из телеграмм содержит назначную, основную и контрольную информации. Назначная часть состоит из признаков станции, времени, измерительных каналов, начала и конца телеграммы. Основная информация представляет собой значения сигналов на выходе датчиков в милливольтгах, умноженной на коэффициент усиления масштабирующих усилителей измерительного блока. Контрольная информация представляет собой уровни эталонного напряжения, подаваемого на вход УИП для контроля исправности станции и соответствия точностных характеристик УИП-1 заданным. Были разработаны алгоритмы и программа обработки данных. Программа и организация обработки данных имела следующие особенности. Помимо перфоленты с основной информацией в ЭВМ вводилась лента, подготовленная оператором станции, с техническими замечаниями по работе АСАЭИ. Ввод ленты преследовал цели устранения неверной и сомнитель-

ной информации. Результаты обработки выводились на печать в виде таблиц. В распечатках этих таблиц встречаются значения, намного превышающие возможные результаты обработки данных. Каждое из них указывает причину, из-за которой обработка данных за этот час не производилась. Нахождение признака начала каждой телеграммы осуществлялось отдельной подпрограммой, написанной на мнемокоде, что делает ввод данных более застрахованным от случайных ошибок телетайпа, т. е. более надежным, и ускоряет их ввод. При вводе данных осуществляется контроль сроков наблюдений с целью учета отсутствующих телеграмм. С целью своевременной замены ленты используется сообщение о конце ленты, набиваемое оператором. Это сообщение временно прекращает ввод информации независимо от числа телеграмм на ленте. С целью экономии машинного времени предусмотрен запрет на информацию отдельных измерительных каналов, которая по тем или иным причинам не используется.

Эти особенности программы и организации работ следует учитывать при разработке программ обработки и их реализации на ЭВМ серии ЕС. Введен объективный контроль данных по электропроводности воздуха. Отбрасывались как недостоверные те средние часовые значения λ , для которых $2,0 \leq \lambda_+/\lambda_- \leq 0,5$. Введены ограничения по нижнему и верхнему пределам измерений. Эти ограничения приложены к средним часовым значениям, но их следует использовать уже на стадии подсчета средних часовых значений с целью исключения недостоверных отсчетов. Следует использовать для объективного контроля связь показаний первого и второго измерительных каналов (измерение V') и данные о величинах контрольных напряжений. Практика показала, что разработка объективных методов контроля информации является одной из важнейших задач при использовании автоматизированных систем измерений величин атмосферного электричества.

5. Исследовательские испытания АСАЭИ

В процессе исследовательских испытаний было произведено сопоставление средних часовых значений атмосферного электричества, определенных традиционным способом по записям регистраторов с помощью палетки, со средними часовыми значениями, рассчитанными по данным измерения станции путем суммирования дискретных отсчетов. Были использованы ограниченные случайные выборки данных. Вычислены отношения K средних часовых значений по данным регистраторов к соответственным значениям по данным станции. Результаты представлены в табл. 2. В ней \bar{K} — среднее значение отношений K , σK — среднее квадратическое отклонение совокупности K , N — число часов наблюдений.

Измерения V' были выполнены при следующих метеоусловиях: средние минимальная и максимальная температуры 1,2 и 9,5°C соответственно, относительная влажность 63...96 %, наблюдались

слабые дожди, ливневые дожди, ливневый снег. Используя классификацию [5], записи в этот период можно отнести в основном к спокойным и слабо возмущенным, имели место отдельные умеренно возмущенные записи, V' принимало как положительные, так и отрицательные значения.

Измерения λ были выполнены при следующих метеоусловиях: средние минимальные и максимальные температуры $-18,8$ и -12°C соответственно, относительная влажность $88..99\%$, весь период характеризовался обильным выпадением осадков (8 дней со снегом, изморозью, снежными зернами). По характеру полученные записи λ можно отнести к типичным.

Очевидно, разброс K обусловлен не только принципиальным различием методов получения средних часовых значений, но и в какой-то мере погрешностями традиционных способов получения средних значений. Оценка погрешности для спокойных записей величин составляет $5..10\%$ среднего значения величины.

Таблица 2

Значения K

Величина	N	K										\bar{K}	σK	
		0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4			1,5
V'	190	1	—	7	24	37	69	29	15	5	1	—	0,99	0,24
λ_+	210	—	—	7	39	9	113	19	16	6	1	—	0,99	0,13
λ_-	168	—	—	5	19	5	122	4	10	3	—	—	0,99	0,10

Опуская в данном рассмотрении это обстоятельство, а также возможные аппаратные погрешности, отнесем весь разброс к погрешностям, возникающим при переходе от интегрирования к суммированию по дискретным отсчетам. Как показано в [6], разброс K может быть существенно уменьшен путем введения на выходе датчиков инерционных фильтров с постоянной времени ≈ 200 с. Но и представленный разброс K не приведет к существенному повышению погрешности определения средних суточных или средних часовых за месяц величин атмосферного электричества из-за естественной изменчивости величин, которая, как правило, больше для внечасовых интервалов измерений, чем для внутрис часовых. По результатам измерений V' на сети станций СССР были выполнены оценки отношений $\sigma V'_A / \bar{V}'_A$ для совокупностей V'_A , полученных в течение любых случайно выбранных трех часов измерений в течение месяца. Эти отношения, как правило, больше 1,0, но не бывают меньше 0,5 (V'_A — среднее часовое значение V'). Случаи появления умеренно и сильно возмущенных записей V' , для которых $\sigma V'_A / \bar{V}'_A \gg \sigma V'_A / \bar{V}'_A$ довольно редки ($\sigma V'$ — определено для внутрис часового интервала). Аналогичные оценки для $\sigma \lambda_A / \bar{\lambda}_A$ дает диапазон изменения отношения $0,2..0,7$.

Если станция ориентирована только на получение средних значений за длительные интервалы (сутки, месяцы) в течение всего периода своей работы или в какой-то части периода, то, по-видимому, представляется даже возможным уменьшить количество дискретных отсчетов в час без существенной потери в точности конечной информации. Этот вопрос предполагается рассмотреть в будущем.

При определении редуциционного множителя для V все же целесообразно производить непрерывную запись величин.

Переход от непрерывных записей к дискретным измерениям величин атмосферного электричества с последующей машинной обработкой данных, с одной стороны, прогрессивно меняет технологию получения конечной информации, а с другой — заведомо сужает исходную и конечную информацию. Поэтому в случае применения автоматизированной системы измерения, макет ячейки которой в какой-то мере исследовался авторами, вопросам назначения и использования конечной информации в каждом конкретном случае должно быть придано первостепенное значение.

В процессе исследовательских испытаний решался вопрос о метрологическом обслуживании станции. Опыт показал целесообразность сквозного контроля каналов станции, несмотря на то, что погрешности измерения входных величин УИП-1 значительно меньше погрешности измерения датчиков, т. е. в качестве исходных данных для определения коэффициентов чувствительности необходимо использование данных имитаторов сигналов и выходных данных, фиксируемых на рулонной ленте телетайпа. При использовании другой системы регистрации возможность визуального просмотра данных контроля непосредственно на пункте наблюдений должна быть предусмотрена.

6. Сравнение результатов измерений

В качестве датчиков величин атмосферного электричества использовались датчики, отличающиеся от применяемых на сети. В связи с тем, что в разрабатываемой автоматизированной системе предполагается использовать датчики подобного типа, представляет интерес сопоставить результаты измерений величин атмосферного электричества, полученные с помощью этих датчиков, с результатами измерений, полученными сетевой аппаратурой. Напомним, что в качестве измерителя V' в Воейкове используется коллекторная установка, а в качестве измерителя электропроводности воздуха — прибор Аллика [7].

Некоторые представляющие интерес результаты получены по определению редуциционного множителя. Применение установки датчика «Поле-1», описанной в разделе 2, вызывает необходимость введения редуциционного множителя даже в том случае, когда установка находится вдалеке от строений на равнине. Редуциционный множитель определялся для такого случая двумя способами: экспериментально в Южно-Сахалинске и оценивался расчет-

ным путем А. Н. Селезневой. Градиент потенциала на равнине V'_p определялся одним из принятых на сети станций СССР способом. Датчиком потенциала служил радиоактивный коллектор, подвешенный на изолированной проволоке, протянутой между столбами. В качестве измерителя потенциала использовался механический электрометр. По результатам измерений, проведенных в течение нескольких часов в осеннее время и, естественно, в ясную погоду, среднее отношение V'/V'_p составило 1,25. Такова же и расчетная оценка.

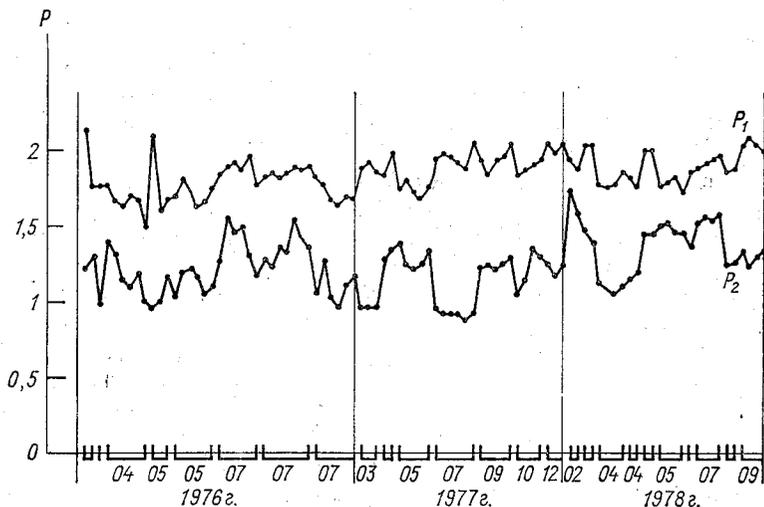


Рис. 1. Результаты измерений редукционного множителя P в течение нескольких лет.

На горизонтальной оси дано обозначение группы результатов измерений P с указанием месяца, когда измерение производилось. Точками обозначены средние часовые значения P .

Можно ожидать примерно линейного изменения отношения V'/V'_p в пределах 1,25...1,0 при увеличении высоты снежного покрова от 0 до 1 м.

В Воейкове под руководством К. А. Семенова проводились длительные измерения редукционного множителя. Для измерения V'_p использована установка, разработанная К. А. Семеновым [8]. Результаты сопоставления представлены на рис. 1. На этом рисунке P_1 — отношение V'_p/V , где V — потенциал, измеренный с помощью коллекторной установки; P_2 — отношение V'_p/V_1 , где V' измерено датчиком «Поле-1». Видны большие колебания P_2 по сравнению с P_1 . Расчеты, выполненные по данным 1978 г., дают $\bar{P}_1 = 1,9 \pm 0,07$ с вероятностью 95% при $\sigma_{P_1} = 0,10$, $\bar{P}_2 = 1,4 \pm 0,1$ с той же вероятностью при $\sigma_{P_2} = 0,17$. О причинах такого рас-

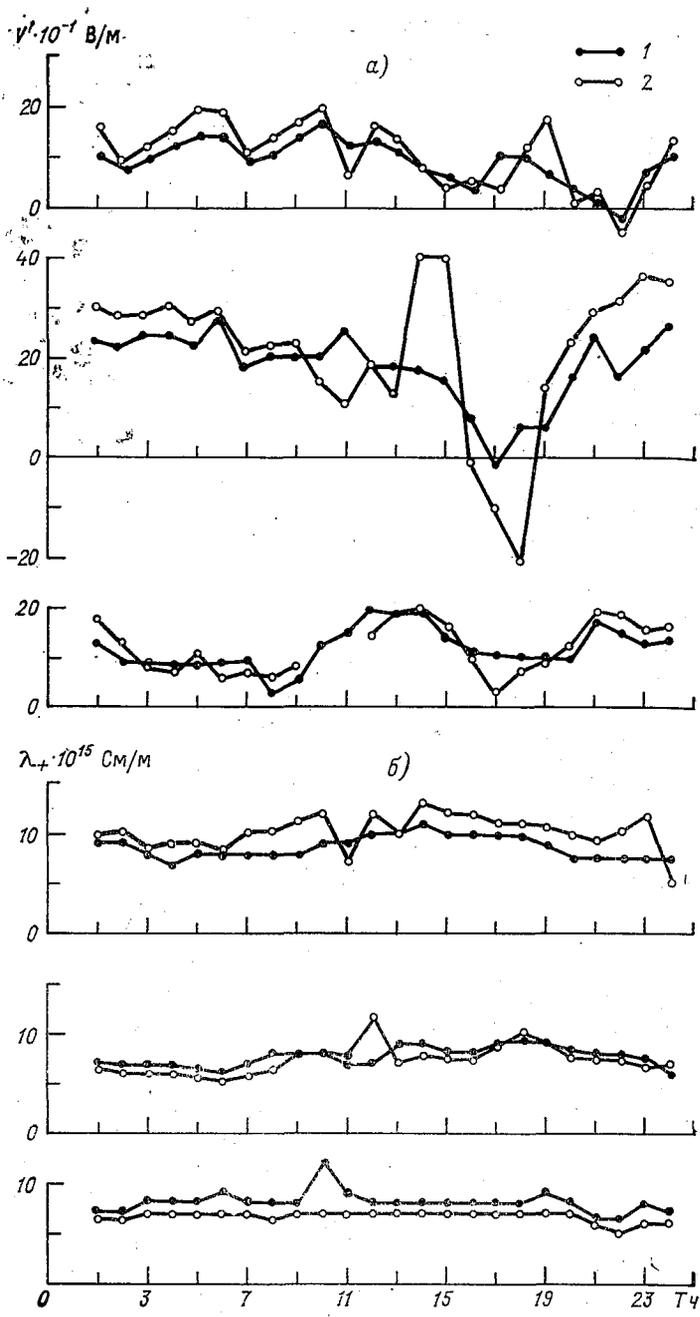


Рис. 2. Сопоставление данных градиента потенциала (а) и электропроводности (б).
 1 — данные пункта, 2 — данные АСАЭИ.

хождение изменчивости P_1 и P_2 можно лишь догадываться, но ясно, что это расхождение не обусловлено погрешностями средств измерений и погрешностями обработки. Добавим, что наблюдались расхождения между средними часовыми значениями V' , определенными с помощью коллекторной установки и электростатического флюксметра, которые также нельзя приписать погрешностям средств измерений. Вероятной причиной такого расхождения является сложное распределение объемных зарядов в слое, прилежащем к поверхности земли, обнаруженное в ряде работ

Таблица 3

Значения \bar{m}

Величина	N	\bar{m}	$\sigma \bar{m}$	Метеоусловия	Метод получения конечной информации
λ_+	163	1,1	0,2	Любые	АСАЭИ, ЭВМ
	174	1,0	0,1		
	51	1,1	0,2		
	165	1,0	0,1		
	215	1,0	0,1		
V'	180	1,0	0,3	Любые	АСАЭИ, ЭВМ
	138	1,0	0,3		
	50	1,0	0,2		
λ_+	188	1,0	0,1	Без осадков	Регистратор, ручная обработка
	454	1,0	0,1	Твердые осадки	
	231	1,0	0,2	Жидкие осадки	
	770	0,8	0,2	Любые	
λ_-	250	1,0	0,2	Без осадков	То же
	272	0,8	0,1	Жидкие осадки	
	528	0,9	0,2	Любые	
V'	533	1,0	Не менее 0,3	Любые	Регистратор

(см., например, [10]). Большая сходимость результатов измерений с помощью двух коллекторных установок, разнесенных на расстояние около 200 м, заставляет предполагать горизонтальную однородность распределения зарядов. Как будет показано ниже, при достаточном осреднении результаты измерений с помощью коллекторной установки и электростатического флюксметра сходятся. Причины расхождения данных измерений в отдельные интервалы времени, выводы из которых, как нам кажется, будут иметь значение для методики измерения V' , предполагается исследовать в будущем.

Результаты измерений V' и λ с помощью станции и сетевой аппаратуры сопоставлены. Для нескольких случайно выбранных примерно десятидневных интервалов они представлены на рис. 2. Более высокой сходимости результатов измерений не ожидается.

В табл. 3 представлены оценки средних значений отношений \bar{m} величин атмосферного электричества, измеренных с помощью стационарных датчиков и обычной сетевой аппаратуры, а также оценки разброса этих отношений. Обозначения те же, что в табл. 2. Интервалы измерений подобраны случайно с позиции решаемой задачи. Среднее отношение \bar{m} для V' равно 1, хотя по величине $\delta\bar{m}$ видно, что между средними часовыми значениями V' , определенными разными способами, существует расхождение, которое, как уже упоминалось выше, нельзя приписать ни погрешностям средств измерений, ни погрешностям обработки (ср. также σ в табл. 2 и 3). При сопоставлении данных по λ обращают на себя внимание систематические различия \bar{m} для разных групп измерений, которые, как кажется, нельзя приписать погрешностям средств измерений и обработки. Возможно, что здесь сказывается различие в установке аппаратуры для измерения электропроводности воздуха. Отметим, что входные отверстия аспирационных конденсаторов находятся на высоте 1,5 и 2,7 м, оси конденсаторов перпендикулярны, а расстояние между ними около 5 м. В достаточной степени вопросы причин расхождения средних часовых значений V' и средних значений λ не исследовался, хотя эти исследования представляют интерес для методики измерений V' и λ (выбор и установка аппаратуры для измерений).

Не удалось выполнить сравнительный анализ результатов измерений с помощью датчика «Гроза». Допущенные ограничения по нижнему порогу в алгоритме обработки данных привели к занижению общего числа разрядов, определяемых с помощью АСАЭИ, по сравнению с числом разрядов, фиксируемых электро-механическими счетчиками датчика.

Выводы

Первый опыт работ с макетом ячейки автоматизированной системы измерений величин атмосферного электричества показал принципиальную возможность и целесообразность ее использования в подсистеме наблюдений за электрическими свойствами атмосферы для получения режимных данных. Вместе с тем при производстве наблюдений за короткопериодными вариациями величин необходимо использование либо информационно-измерительной системы (ИИС), в которой предусмотрена возможность быстрого действия, либо регистраторов, подключаемых на время к описываемой ИИС. Выбор определяется экономическими соображениями. Очевидно, многие вопросы остались невыясненными или нерешенными. Предстоит работа по выяснению причин расхожде-

ния средних часовых значений V' , измеренных коллекторным методом и методом электростатического флюксметра, по исследованию распределения величин атмосферного электричества в приземном слое при разных метеоусловиях. Требуется разработка методов объективного контроля данных с привлечением метеоинформации и статистического анализа. Необходима разработка программ совместной обработки данных об электрических величинах и метеоинформации на ЭВМ серии ЕС.

Авторы выражают благодарность всем участвовавшим в подготовке и проведении экспериментов — Н. П. Ваюшиной, А. М. Гудыме, К. А. Кожину, И. Р. Сафоновой, К. А. Семенову.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированная система получения атмосферно-электрической информации/Л. П. Афиногенов, В. П. Колоколов, Я. М. Шварц и др.— В кн.: Труды I Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. Л., 1976, с. 57—59.
2. Автоматические станции для геофизических (теплобалансовых, актинометрических и атмосферно-электрических) измерений в приземном слое атмосферы—АСГИ/Л. П. Афиногенов, Н. Н. Ерошкевич, А. И. Мехович, С. М. Стерзат.—Труды ГГО, 1977, вып. 377, с. 19—25.
3. А. с. 464881 (СССР). Устройство для измерения электропроводности воздуха/Х. Ф. Таммет, Я. М. Шварц.—Заявл. 9.10.73, № 1964070/18—10.—Бюл. изобр., 1975, № 11.
4. А. с. 508811 (СССР). Измерительный конденсатор/Х. Ф. Таммет, Я. М. Шварц.—Заявл. 10.06.74, № 2038668/26—21.—Бюл. изобр., 1976, № 12.
5. Брагинская Л. Л., Шварц Я. М. Исследование временной структуры напряженности электрического поля у поверхности земли в приложении к задаче определения средних значений.— В кн.: Труды I Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству, Л., 1976, с. 71—75.
6. Грушин С. И., Персин С. М. К вопросу о погрешности измерений средних значений инерционными приборами.—Труды ГГО, 1971, вып. 259, с. 3—13.
7. Имянитов И. М. Приборы и методы для изучения электричества атмосферы.—Л., 1957.—483 с.
8. Колоколов В. П., Шварц Я. М. Методы наблюдений элементов атмосферного электричества.—Обнинск, Информационный центр, 1976.—64 с.
9. Михайловская В. В., Назаренко О. М. Прибор для измерения напряженности электрического поля.—Труды ГГО, 1977, вып. 350, с. 142—146.
10. Khera M. K., Raina V. N. Electrode Effect at a Mountain Station.—J. Atm. Terr. Phys., 1978, vol. 40, N 12, p. 1297—1302.

В. В. Михайловская, В. А. Пачин

ВЛИЯНИЕ ИНЕРЦИИ ПРИБОРА НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ СКАЧКА НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПОСЛЕ РАЗРЯДА МОЛНИИ

Развивающиеся в последнее время измерения по определению величины и координат заряда облака, вовлеченного в грозовой разряд, по скачкам напряженности электрического поля, измеренным сетью приборов одновременно в нескольких точках земной поверхности [3, 5], предъявляют особо строгие требования к одинаковости времен инерции применяемой измерительной аппаратуры. Дело в том, что скачок напряженности электрического поля, вызванный разрядом молнии, имеет крутой передний фронт длительностью менее 0,01 с [4], в течение которого происходит аннулирование заряда облака, и относительно пологий задний фронт длительностью 1...10 с, в течение которого напряженность электрического поля восстанавливается [1, 7].

В настоящей работе рассматривается влияние инерции прибора на точность измерения величины скачка напряженности электрического поля.

1. Расчет влияния инерции прибора на точность измерения

Предположим следующее:

1) изменение напряженности электрического поля E , вызванное разрядом молнии — скачок поля, имеет линейную зависимость от времени t на переднем фронте, переходящую в экспоненциальную зависимость от времени на стадии восстановления поля, т. е.

$$E = E_0 \frac{t}{t_\phi} \quad \text{для } 0 \leq t \leq t_\phi \quad (1)$$

и

$$E = E_0 e^{-\frac{t-t_\phi}{\tau_{об}}} \quad \text{для } t \geq t_\phi, \quad (2)$$

где E_0 — истинная величина скачка напряженности поля в точке

измерения; t_{ϕ} — время, в течение которого происходит аннулирование заряда облака, т. е. длительность переднего фронта скачка поля; $\tau_{об}$ — постоянная времени восстановления напряженности поля;

2) напряжение на входе измерительного прибора типа электростатического флюксметра [3] связано линейной зависимостью с напряженностью электрического поля, поэтому изменение напряжения на входе прибора $U_{вх}$ от времени может быть выражено аналогичной зависимостью

$$U_{вх_1} = U_0 \frac{t}{t_{\phi}} \quad \text{для } 0 \leq t \leq t_{\phi} \quad (3)$$

и

$$U_{вх_2} = U_0 e^{-\frac{t-t_{\phi}}{\tau_{об}}} \quad \text{для } t \geq t_{\phi}, \quad (4)$$

где U_0 — амплитуда изменения или скачок напряжения на входе прибора;

3) влияние инерции измерительного прибора эквивалентно действию интегрирующей цепочки с постоянной времени, равной постоянной времени измерительного прибора $\tau_{пр}$.

Напряжение на выходе измерительного прибора $U_{вых}$ может быть найдено из уравнения

$$\tau_{пр} \frac{dU_{вых}}{dt} + U_{вых} = U_{вх}. \quad (5)$$

Решение его имеет вид

$$U_1 = U_0 \left[\frac{t}{t_{\phi}} - \frac{\tau_{пр}}{t_{\phi}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{пр}}} \right) \right] \quad \text{для } 0 \leq t \leq t_{\phi} \quad (6)$$

и

$$U_2 = \frac{U_0}{\frac{\tau_{об}}{\tau_{пр}} - 1} \left\{ \frac{\tau_{об}}{\tau_{пр}} e^{-\frac{t-t_{\phi}}{\tau_{об}}} - \left[1 + \left(\frac{\tau_{об}}{\tau_{пр}} - 1 \right) \frac{1 - e^{-\frac{t-t_{\phi}}{\tau_{пр}}}}{\frac{t_{\phi}}{\tau_{пр}}} \right] e^{-\frac{t-t_{\phi}}{\tau_{пр}}} \right\} \quad \text{для } t \geq t_{\phi}, \quad (7)$$

где U_1 и U_2 — напряжение на выходе измерительного прибора для момента времени $0 \leq t \leq t_{\phi}$ и $t \geq t_{\phi}$. Момент наступления амплитуды напряжения на выходе t_{max} можно определить из максимума для U_2 (функция U_1 не имеет максимума)

$$t_{max} - t_{\phi} = \frac{\ln \left[\frac{t_{\phi} + \tau_{об} - \tau_{пр}}{t_{\phi}} \left(1 - e^{-\frac{t_{\phi}}{\tau_{пр}}} \right) \right]}{\frac{1}{\tau_{пр}} - \frac{1}{\tau_{об}}} = \frac{A}{\frac{1}{\tau_{пр}} - \frac{1}{\tau_{об}}}, \quad (8)$$

где

$$A = \ln \left[\frac{t_{\Phi} + \tau_{об} - \tau_{пр}}{t_{\Phi}} \left(1 - e^{-\frac{t_{\Phi}}{\tau_{пр}}} \right) \right]. \quad (9)$$

Нетрудно заметить, что $t_{\max} - t_{\Phi} > 0$, т. е. прибор отличает скачок напряжения позднее момента появления его на входе прибора.

Величина измеренного скачка напряжения $U_{2 \max}$ может быть определена по формуле (7) для момента времени $t = t_{\max}$, найденного из формулы (8),

$$U_{2 \max} = U_0 e^{-\frac{A}{\frac{\tau_{об}}{\tau_{пр}} - 1}}. \quad (10)$$

Поскольку измеряемая напряженность поля определяется по величине сигнала, возникающего на выходе прибора, U_2 [2], то, очевидно, для измеренной величины скачка напряженности поля $E_{оп}$ справедливо выражение

$$E_{оп} = E_0 e^{-\frac{A}{\frac{\tau_{об}}{\tau_{пр}} - 1}}. \quad (11)$$

2. Обсуждение результатов

На рис. 1 представлена зависимость измеренного скачка напряженности поля $E_{оп}$ от величины постоянной времени прибора $\tau_{пр}$, полученная из расчета по формулам (11) и (9) для облаков, восстанавливающих свое электрическое состояние за различное время $\tau_{об}$. Влияние длительности разряда молнии — длительности аннулирования заряда облака — показано на рис. 1 шириной полосы, верхний край которой соответствует $t_{\Phi} = 0,1$ с, а нижний $t_{\Phi} = 10^{-6}$ с [6].

Полученная зависимость показывает, что:

— влияние длительности разряда молнии t_{Φ} невелико и оно уменьшается по мере увеличения $\tau_{об}$;

— зависимость величины измеренного скачка напряженности поля от величины постоянной времени прибора $\tau_{пр}$ тем сильнее, чем меньше $\tau_{об}$, т. е. чем быстрее облако восстанавливает свое электрическое состояние;

— приборы, имеющие неодинаковые постоянные времени, измеряют разные доли от истинной величины скачка поля E_0 , что приводит к появлению дополнительной погрешности при определении величины и координат заряда, вовлекаемого в грозовой разряд, сетью приборов для измерения напряженности поля. Уменьшить эту ошибку можно путем приведения измеренного каждым прибором значения скачка поля $E_{оп}$ к истинному значению E_0 , пользуясь формулой (11).

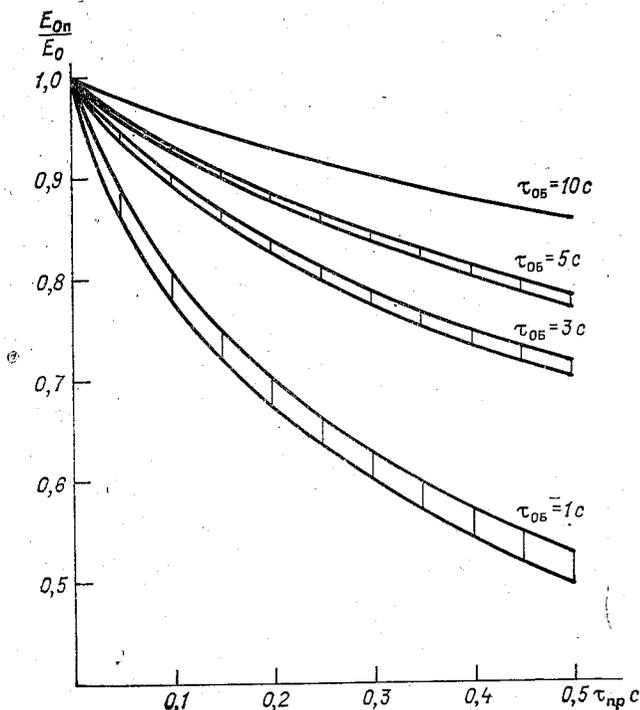


Рис. 1. Зависимость отношения измеренной амплитуды к истинной амплитуде от постоянной времени прибора для различных $\tau_{пр}$.

Возможно, что различие в величинах зарядов, полученных разными авторами [1, 5, 8], частично может быть связано с использованием аппаратуры, имеющей различные времена инерции, которые не всегда указываются.

Заключение

Для уменьшения ошибки определения координат заряда облака, вовлеченного в грозовой разряд, по скачкам напряженности поля, измеряемым в нескольких точках земной поверхности, следует использовать приборы с максимально близкими постоянными времени или вводить поправки по формуле (11), а для нахождения величины заряда пересчитывать измеренные величины скачков поля в истинные по той же формуле (11).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Имянитов И. М., Камалдина И. И. К вопросу о природе восстановления электрического поля после удара молнии. — Труды ГГО, 1974, вып. 323, 3—10.

2. Михайловская В. В., Назаренко О. М. Прибор для измерения напряженности электрического поля.—Труды ГГО, 1977, вып. 350, 142—146.

3. Михайловская В. В., Пачин В. А. Метод локализации заряда, вовлеченного в грозовой разряд.—См. наст. сборник.

4. Berger K. Novel Observation on Lightning Discharges: Results of Research on Mount San-Salvatore.—Franklin Institute, 1967, vol. 283, p. 478—525.

5. Jacobson E. A., Krider E. P. Electrostatic Field Charges Produced by Florida Lightnings.—J. Atm. Sci., 1976, vol. 33, p. 103—117.

6. Hatakeyama H. The Distribution of the Sudden Change of Electric Field on the Earth's Surface Due to Lightning Discharge. Recent Advances in Atmospheric Electricity Pergamon Press, 1958, p. 289—298.

7. Michnowski. Electric Field Variations Following Lightnings Discharges.—Acta Geophysica Polonica, 1969, vol. 17, N 3, p. 241—252.

8. Tamura J. An Analysis of Electric Field after Lightning Discharges.—J. Geomagn. Geoelectr., 1954, vol. 6, N 1, p. 34—46.

В. В. Михайловская, В. А. Пачин

МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ ЗАРЯДА, ВОВЛЕЧЕННОГО В ГРОЗОВОЙ РАЗРЯД

Заряд, который аннулируется во время грозового разряда, является одной из важных характеристик грозы. Однако определение величины этого заряда связано с известными трудностями, вызванными как кратковременностью процесса, так и трудностью непосредственных измерений.

Одним из методов, которому в последнее время уделяется все большее внимание, является метод определения величины и координат центра заряда, вовлеченного в грозовой разряд, по кратковременным изменениям напряженности поля (скачкам поля), измеренным одновременно в нескольких точках земной поверхности. Измерение скачков поля обычно производится электростатическими флюксометрами — приборами для измерения напряженности электростатического поля. Достаточно подробный обзор этих работ приведен в работах [3, 4].

Определение величины грозового заряда по скачку напряженности электростатического поля, измеренному в одной точке земной поверхности, и по расстоянию до молнии, оцененному из разницы времен прихода светового и звукового сигналов [1, 3, 5 и др.], может быть очень приближенным, так как расстояние находится очень неточно из-за того, что звуковой сигнал возникает в неопределенной точке канала молнии. Кроме того, высота местоположения заряда, с которой связана его величина, также неизвестна.

Более подробную информацию о грозовом разряде, такую, например, как количество отдельных заряженных областей, вовлеченных в грозовой разряд, величины зарядов этих областей, координаты центров зарядов и др., можно получить из синхронных измерений скачков напряженности электростатического поля в нескольких точках земной поверхности [5—7 и др.].

Одной из самых интересных работ этого направления является работа [4], проведенная в США в 1974 г. сетью, образованной 21 станцией совместно с радиолокационными и визуальными наблюдениями. Размещение сети на отnivelированной равнине, тщательный контроль за приборами, большое количество пунктов

наблюдения, применение оригинального метода обработки данных на ЭВМ, основывающейся на функциональной зависимости скачков напряженности поля от заряда, вовлеченного в разряд, обеспечили точность измерения $\pm 10\%$.

В настоящей статье рассматривается аналитическое решение для случая разряда на землю одной заряженной области. В работе [4] только упоминается о решении этой задачи Крейбилом (Krehbiel), но само решение не приведено.

1. Основные уравнения, на которых базируется метод

В основу расчета по этому методу положены предположения, что заряженная область, из которой заряд вовлекается в грозовой разряд, мала по сравнению с расстоянием до нее и ее действие эквивалентно действию точечного заряда, и что поверхность земли является идеальной проводящей плоскостью.

Определение величины заряда Q , вовлеченного в грозовой разряд, и его координат x , y , z требует наличия четырех независимых уравнений. Эти уравнения могут быть получены исходя из зависимости скачков напряженности поля E_1 , E_2 , E_3 , E_4 в четырех точках земной поверхности — $A_1(m_1, l_1)$, $A_2(m_2, l_2)$, $A_3(m_3, l_3)$, $A_4(m_4, l_4)$ — от того заряда облака который вовлечен в грозовой разряд.

Действительно, учитывая сделанные выше предположения, можно написать

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{2Qz}{r_1^3}, \\ E_2 &= \frac{2Qz}{r_2^3}, \\ E_3 &= \frac{2Qz}{r_3^3}, \\ E_4 &= \frac{2Qz}{r_4^3}, \end{aligned} \quad (1)$$

где r_1, r_2, r_3, r_4 — расстояния от соответствующего пункта наблюдения до центра грозового заряда Q , равные

$$\begin{aligned} r_1^2 &= (x - m_1)^2 + (y - l_1)^2 + z^2, \\ r_2^2 &= (x - m_2)^2 + (y - l_2)^2 + z^2, \\ r_3^2 &= (x - m_3)^2 + (y - l_3)^2 + z^2, \\ r_4^2 &= (x - m_4)^2 + (y - l_4)^2 + z^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Если обозначить

$$b_2 = \frac{E_1}{E_2} = \frac{r_2^3}{r_1^3},$$

$$b_3 = \frac{E_1}{E_3} = \frac{r_3^3}{r_1^3},$$

$$b_4 = \frac{E_1}{E_4} = \frac{r_4^3}{r_1^3} \quad (3)$$

и выразить r_2, r_3, r_4 через r_1 , а затем подставить их значения в систему уравнений (2), то получим

$$\begin{aligned} r_1^2 b_2^{2/3} &= r_0^2 + m_2^2 + l_2^2 - 2m_2x - 2l_2y, \\ r_1^2 b_3^{2/3} &= r_0^2 + m_3^2 + l_3^2 - 2m_3x - 2l_3y, \\ r_1^2 b_4^{2/3} &= r_0^2 + m_4^2 + l_4^2 - 2m_4x - 2l_4y, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$r_0^2 = x^2 + y^2 + z^2.$$

Решение системы уравнений (4) имеет вид:

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{2} \frac{L_1 + L_2 b_2^{2/3} + L_3 b_3^{2/3} + L_4 b_4^{2/3}}{D_1 + D_2 b_2^{2/3} + D_3 b_3^{2/3} + D_4 b_4^{2/3}}, \\ y &= \frac{1}{2} \frac{M_1 + M_2 b_2^{2/3} + M_3 b_3^{2/3} + M_4 b_4^{2/3}}{D_1 + D_2 b_2^{2/3} + D_3 b_3^{2/3} + D_4 b_4^{2/3}}, \\ z^2 &= \frac{C_1 + C_2 b_2^{2/3} + C_3 b_3^{2/3} + C_4 b_4^{2/3}}{D_1 + D_2 b_2^{2/3} + D_3 b_3^{2/3} + D_4 b_4^{2/3}} - x^2 - y^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Заряд Q может быть найден из одного из уравнений системы уравнений (1), например, первого:

$$Q = \frac{1}{2} \frac{E_1 r_1^3}{z}. \quad (6)$$

Величины $L_1, L_2, L_3, L_4, M_1, M_2, M_3, M_4, C_1, C_2, C_3, C_4, D_1, D_2, D_3, D_4, \rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$ являются постоянными, зависящими только от координат пунктов наблюдения:

$$\begin{aligned} L_1 &= L_2(\rho_4^2 - \rho_3^2) + L_3(\rho_2^2 - \rho_4^2) + L_4(\rho_3^2 - \rho_2^2), \\ L_2 &= L_1(\rho_3^2 - \rho_4^2) + L_4(\rho_4^2 - \rho_1^2) + L_3(\rho_1^2 - \rho_3^2), \\ L_3 &= L_1(\rho_4^2 - \rho_2^2) + L_2(\rho_1^2 - \rho_4^2) + L_4(\rho_2^2 - \rho_1^2), \\ L_4 &= L_1(\rho_2^2 - \rho_3^2) + L_3(\rho_3^2 - \rho_1^2) + L_2(\rho_1^2 - \rho_2^2), \\ M_1 &= m_2(\rho_3^2 - \rho_4^2) + m_3(\rho_4^2 - \rho_2^2) + m_4(\rho_2^2 - \rho_3^2), \\ M_2 &= m_1(\rho_4^2 - \rho_3^2) + m_3(\rho_1^2 - \rho_4^2) + m_4(\rho_3^2 - \rho_1^2), \\ M_3 &= m_1(\rho_4^2 - \rho_2^2) + m_2(\rho_4^2 - \rho_1^2) + m_4(\rho_1^2 - \rho_2^2), \\ M_4 &= m_1(\rho_3^2 - \rho_2^2) + m_2(\rho_1^2 - \rho_3^2) + m_3(\rho_3^2 - \rho_1^2), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_1 &= \rho_2^2(l_3 m_1 - l_1 m_3) + \rho_3^2(l_4 m_2 - l_2 m_4) + \rho_4^2(l_2 m_3 - l_3 m_2), \\
C_2 &= \rho_1^2(l_4 m_3 - l_3 m_4) + \rho_3^2(l_1 m_4 - l_4 m_1) + \rho_4^2(l_3 m_1 - l_1 m_3), \\
C_3 &= \rho_1^2(l_2 m_4 - l_4 m_2) + \rho_2^2(l_4 m_1 - l_1 m_4) + \rho_4^2(l_1 m_2 - l_2 m_1), \\
C_4 &= \rho_1^2(l_3 m_2 - l_2 m_3) + \rho_2^2(l_1 m_3 - l_3 m_1) + \rho_3^2(l_2 m_1 - l_1 m_2), \\
D_1 &= l_2(m_4 - m_3) + l_3(m_2 - m_4) + l_4(m_3 - m_2), \\
D_2 &= l_1(m_3 - m_4) + l_3(m_4 - m_1) + l_4(m_1 - m_3), \\
D_3 &= l_1(m_4 - m_2) + l_2(m_1 - m_4) + l_4(m_2 - m_1), \\
D_4 &= l_1(m_2 - m_3) + l_2(m_3 - m_1) + l_3(m_1 - m_2), \\
\rho_1^2 &= m_1^2 + l_1^2 \\
\rho_2^2 &= m_2^2 + l_2^2, \\
\rho_3^2 &= m_3^2 + l_3^2, \\
\rho_4^2 &= m_4^2 + l_4^2.
\end{aligned} \tag{7}$$

В случае, когда разряд молнии охватывает несколько заряженных областей, число неизвестных возрастает. Следовательно, для определения величины этих зарядов и координат требуется соответствующее увеличение числа уравнений, входящих в систему уравнений (1), а значит, и числа пунктов наблюдения. Решение значительно усложняется.

2. Выбор расположения пунктов наблюдения

Анализ полученного решения (5) позволил сделать неожиданный вывод, важный в методическом плане: для измерения координат заряда и его величины пригодно не всякое расположение пунктов наблюдения.

Действительно, определитель системы уравнений (5) Det , равный

$$\begin{aligned}
\text{Det} &= D_1 + D_2 b_2^{2/3} + D_3 b_3^{2/3} + D_4 b_4^{2/3} = \\
&= \left(\frac{E_1}{2Qz} \right)^{2/3} (D_1 r_1^2 + D_2 r_2^2 + D_3 r_3^2 + D_4 r_4^2) = \\
&= \left(\frac{E_1}{2Qz} \right)^{2/3} (D_1 \rho_1^2 + D_2 \rho_2^2 + D_3 \rho_3^2 + D_4 \rho_4^2),
\end{aligned} \tag{8}$$

является функцией координат пунктов наблюдения с точностью до множителя $\left(\frac{E_1}{2Qz} \right)^{2/3}$.

Равенство определителя системы уравнений (4) нулю является признаком вырождения системы и в данном случае означает, что при таком расположении пунктов наблюдения показания одного из приборов функционально связаны с остальными. Таким образом, при расположении пунктов наблюдения, при котором

выполняется условие $\text{Det}=0$, невозможно определение параметров разряда молнии x, y, z, Q . Уравнение $\text{Det}=0$ является условием того, что все точки наблюдения (m_i, l_i) лежат на одной окружности, которая может вырождаться в прямую. Следовательно, невозможно определить параметры заряда, вовлеченного в грозовой разряд, если пункты наблюдения расположены по окружности и, в частности, по углам прямоугольника и по прямой линии.

Однако расположение пунктов наблюдения по окружности можно использовать для контроля, так как позволяет выделить из грозовых разрядов на землю те, которые вовлекли в процесс грозового разряда только одну заряженную область облака.

Действительно, согласно только что изложенному, для комбинации из четырех пунктов, находящихся на окружности, правая часть уравнения (8) обращается в нуль, поскольку $D_1\rho_1^2 + D_2\rho_2^2 + D_3\rho_3^2 + D_4\rho_4^2 = 0$. Левая часть $D_1 + D_2b_2^{2/3} + D_3b_3^{2/3} + D_4b_4^{2/3}$ обращается в нуль в случае разряда на землю одной заряженной области. Исключением является очень редкий случай, когда заряды располагаются вертикально над центром окружности. Значит, признаком однозарядности грозового разряда на землю является условие

$$D_1 + D_2b_2^{2/3} + D_3b_3^{2/3} + D_4b_4^{2/3} = 0$$

для контрольной группы приборов.

3. Наблюдения на пересеченной местности

Полученное решение пригодно для наблюдений на равнине, как это выполнено в работе [4]. Однако размещение сети на равнине практически не всегда возможно, а наблюдения на пересеченной местности требуют приведения получаемых данных к равнине. Приведение к равнине осуществляется с помощью так называемых редуционных коэффициентов, которые обычно определяются путем осреднения отношений средних часовых величин напряженности поля в точках наблюдения к напряженности поля на равнине, полученных одновременно. Найденные таким образом редуционные коэффициенты, очевидно, пригодны для приведения к равнине медленно меняющихся полей.

Наблюдения по изложенной выше методике требуют измерения скачков напряженности поля, происходящих в течение долей секунды (продолжительности разряда молнии). За такой короткий промежуток времени локальные объемные заряды практически не изменяют своего положения и, по-видимому, не оказывают влияния на величину скачка напряженности поля. Следовательно, методика определения редуционных множителей может быть уточнена.

Нахождение редуционных коэффициентов по скачкам напряженности поля, вызванным изменением заряда известной величины, находящегося на известном расстоянии (например, искусствен-

ное заряджение летящего самолета), могло бы дать положительные результаты.

Возможно, что определение редуционных коэффициентов по макету местности, помещенному в электролитическую ванну или на одну из пластин плоского конденсатора, окажется пригодным.

4. Оценка ошибки измерения

Точность метода, оцененная для нескольких случаев с учетом точности определения отдельных величин уравнений (5), оказалась невысокой.

Наибольший вклад в величину погрешности вносит погрешность определения редуционных коэффициентов, рассмотренная выше, и погрешность определения скачков напряженности поля, связанная не только с погрешностью съема и обработки данных, но и со временем инерции используемых приборов, поскольку формирование скачка напряженности поля происходит в течение менее 0,01 с, за ним идет восстановление поля, а постоянная времени приборов, используемых для измерения скачков поля, составляет около 0,1 с. Очевидно, что в этом случае каждый прибор может отметить только некоторую долю от истинного значения скачка напряженности поля, тем большую, чем меньше его инерция.

Теоретическое приближенное рассмотрение зависимости измеренного скачка напряженности поля от инерции прибора для различной длительности переднего фронта импульса и различного времени восстановления поля [2] показало, что она определяется главным образом временем восстановления поля. Продолжительность переднего фронта импульса оказывает незначительное влияние на эту зависимость.

Так, прибор с постоянной времени 0,1 с отмечает скачок напряженности поля, равный 0,77 часть, а прибор с постоянной времени 0,5 с — 0,5 часть от истинного значения скачка напряженности поля, если восстановление поля происходит за время, равное 1 с.

Отличие измеренного скачка поля от истинного тем значительнее, чем быстрее восстанавливается поле: прибор с постоянной времени 0,1 с измеряет 0,77 часть, если постоянная времени восстановления поля равна 1 с, и 0,95 часть, если постоянная времени восстановления поля равна 10 с.

Принимая во внимание формулы, заметим, что если для определения заряда облака, вовлеченного в грозовой разряд, необходимы истинные значения скачков напряженности поля, то для определения координат центра заряда достаточно привести данные к измерениям с одной и той же инерцией, поскольку в расчетных формулах используются относительные величины. Следовательно, для уменьшения погрешности изложенного метода необходимо:

— организовать сеть из большего количества пунктов, чем минимально необходимо, с тем чтобы иметь возможность составить несколько комбинаций расчетов, используя данные от разных пунктов, и полученные данные осреднить. Увеличение числа пунктов позволит выбрать для каждой комбинации только те, скачки напряженности поля на которых хорошо измеряются;

— разместить сеть пунктов наблюдения по возможности на равнинной местности;

— выбрать наиболее точный метод определения редуционных коэффициентов;

— использовать электростатические флюксометры большей точности с максимально близкими временами инерции;

— учитывать влияние инерции измерительного прибора.

5. Заключение

Анализ решения по определению величины заряда, вовлеченного в грозовой разряд, и координат его центра, полученного для случая грозового разряда на землю одной заряженной области облака, позволил сделать следующие выводы.

1. Сеть приборов для измерения скачков напряженности электрического поля следует составлять из значительно большего числа пунктов, чем число неизвестных параметров.

2. Размещение пунктов наблюдения должно быть таким, чтобы ни одна комбинация из четырех пунктов не располагалась по окружности и, в частности, по углам прямоугольника и прямой, т. е. чтобы для любой комбинации из четырех пунктов, кроме контрольных, выполнялось условие

$$D_1 \rho_1^2 + D_2 \rho_2^2 + D_3 \rho_3^2 + D_4 \rho_4^2 \neq 0.$$

3. Критерием разряда одной заряженной области облака при грозовом разряде на землю может служить условие

$$D_1 + D_2 b_2^{2/3} + D_3 b_3^{2/3} + D_4 b_4^{2/3} = 0$$

для контрольной группы пунктов, расположенных по окружности, выполняемое в пределах погрешности измерения.

4. Наблюдения на пересеченной местности требуют уточнения или разработки новой методики определения редуционных коэффициентов.

5. Времена инерции приборов, используемых для наблюдения, должны быть одинаковыми, в противном случае необходимо вводить поправки в измеренные величины скачков напряженности поля.

Авторы выражают глубокую благодарность профессору И. М. Имянитову, под руководством которого выполнялась эта работа, и Л. С. Мордовиной за помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Махоткин Л. Г. Изменение скачков напряженности электрического поля в зависимости от расстояния до грозового разряда. — Физика атмосферы океана, 1965, т. 1, № 2, с. 230—232.
2. Михайловская В. В., Пачин В. А. Влияние инерции прибора на точность измерения величины скачка напряженности электрического поля после разряда молнии. — См. наст. сборник.
3. Мучник В. М. Физика грозы. — Л.: Гидрометеониздат, 1974. — 351 с.
4. Jacobson E. A., Kridor E. P. Electrostatic Field Charges Produced by Florida Lightnings. — J. Atm. Sci., 1976, vol. 33, pp. 103—117.
5. Hatakeyama H. The Distribution of the Sudden Change of Electric Field on the Earth's Surface Due to Lightning Discharge. Recent Advances in Atmospheric Electricity. Pergamon Press, 1958, p. 289—298.
6. Reynolds S. E., Neill H. W. The Distribution and Discharge of Thunderstorm Charge Centers. — J. Met., 1955, vol. 12, N 1, p. 1—12.
7. Tamura J. An Analysis of Electric Field after Lightning Discharges. — J. Geomagn. Geoelectr., 1954, vol. 6, N 1, p. 34—46.

А. П. Чертилова

АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО В ПЕРИОД ПРИЗЕМНЫХ ИНВЕРСИЙ В ИРКУТСКЕ

В Иркутске на территории ГМО в течение ряда лет производятся измерения электрических величин атмосферы в приземном слое. Градиент потенциала V' электрического поля атмосферы измеряется с помощью коллекторной установки, полярные электропроводности воздуха — с помощью аспирационного измерителя системы ГГО. Атмосферно-электрические величины наиболее чувствительные из всех метеорологических величин к загрязнению воздуха [1, 2].

Иркутск расположен в широкой долине трех рек, где формируются частые инверсии в зимний период. Туманы, низкие температуры воздуха — все это создает предпосылки к скоплению в атмосфере над городом значительной концентрации примесей. От мощности и длительности инверсий зависит степень загрязненности воздуха. При наличии инверсий концентрация частиц загрязнений в приземном слое резко возрастает. С ростом загрязнения воздуха в приземном слое скапливаются объемные заряды.

Эти обстоятельства оказывают воздействие на электрические величины атмосферы, что иллюстрируется графиками, представленными на рис. 1. Так, например, средняя мощность N инверсий тесно связана со значением градиента потенциала V' электрического поля атмосферы в период инверсий. Максимумы V' и N , приходящиеся на декабрь — январь, совпадают. В условиях инверсий уменьшается электропроводность λ воздуха. Во все сезоны года высокая повторяемость концентрации загрязняющих воздух частиц наблюдается преимущественно в утренние и вечерние часы суток. К этому же времени относится и минимум значений.

Годовой ход повторяемости мощности приземных инверсий согласуется с годовым ходом максимальной высоты перемешивания в Иркутске (рис. 1): устойчивые и мощные инверсии зимой обуславливают малую высоту перемешивания. Но уже в марте высота перемешивания (средняя 0,97 км) поднимается выше средней мощности инверсий, в результате чего создаются благоприятные условия для разрушения инверсий (особенно в дневные часы),

а с декабря средняя мощность инверсий снова превышает высоту перемешивания. Годовой ход средней высоты H перемешивания и средних месячных значений электропроводности λ воздуха в общем согласуются, а максимумы H и λ хорошо согласуются.

В Иркутске средние значения электропроводности воздуха в течение года низкие. Низкие значения λ указывают на значительное загрязнение воздуха. Наименьшие значения λ наблюдаются в холодный период, когда увеличивается количество неорганизованных выбросов в атмосферу при сжигании топлива, что при частых инверсиях и небольших скоростях ветра способствует на-

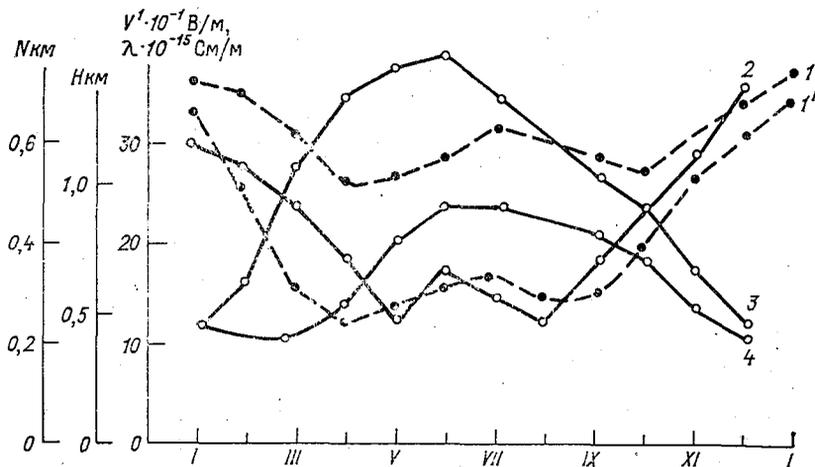


Рис. 1. Годовой ход средних значений мощности N приземных инверсий в 8 и 20 ч (1 и 1'), потенциала V' электрического поля атмосферы в период инверсий (2), высоты H перемешивания (3), суммарной электропроводности λ воздуха (4) за период 1959—1968 гг. по данным наблюдений в Иркутске.

коплению аэрозольных частиц вблизи поверхности земли. Годовые изменения градиента потенциала находятся в прямой зависимости от годовых изменений аэрозольной компоненты атмосферы.

Представляет интерес сопоставление вековых ходов мощности инверсий и величин атмосферного электричества (рис. 2).

Наибольшая мощность приземных инверсий наблюдалась в 1959—1961 г. В эти же годы заметно и повышение средних значений градиента потенциала. В последующие три года наблюдается уменьшение средних значений градиента потенциала, и в эти же годы — резкое уменьшение мощности приземных инверсий. Связь между V' и N безусловно осложнена воздействием длиннопериодных изменений λ , не связанных с изменением метеословий, а глобальным изменением интенсивности ионообразования

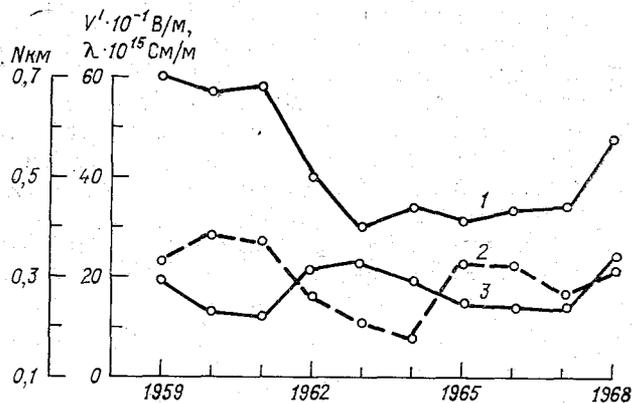


Рис. 2. Вековой ход средних годовых значений мощности N инверсии (1), градиента потенциала V' электрического поля атмосферы (2), суммарной электропроводности λ воздуха (3) за 1959—1968 гг.

в годы массовых ядерных испытаний и последующие за этим годы [1]. Следует отметить, что не все наблюдающиеся инверсии способствуют накоплению промышленных выбросов в приземном слое. Если высота слоя инверсии ниже высоты, на которой производятся выбросы источников загрязнения (высота выбросов не превышает 55...80 м), то инверсии в этом случае препятствуют скоплению примесей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов К. А. Связь элементов атмосферного электричества с загрязнением воздуха. — В кн.: Труды I Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. Л.: Гидрометеоздат, 1976, с. 75—79.
2. Семенов К. А. Влияние локальных условий на элементы атмосферного электричества. — Труды ГГО, 1974, вып. 323, с. 109—118.

А. Х. Филиппов, А. А. Кречетов, В. К. Татарников

ВЛИЯНИЕ ВЫБРОСОВ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ АТМОСФЕРЫ

В период с 20 февраля по 8 мая 1978 г. проводилась непрерывная регистрация градиента потенциала электрического поля атмосферы вблизи Байкальского целлюлозно-бумажного комбината, расположенного на юго-восточном берегу оз. Байкал. Регистрация осуществлялась методом радиоактивного коллектора с использованием электрометрического усилителя на полевых транзисторах. Коллектор подвешивался на горизонтальной изолированной штанге на уровне второго этажа двухэтажного здания Байкальской ГМО. В связи с тем что вокруг здания обсерватории находятся деревья, столбы, небольшие постройки и т. п., определить редуцированный множитель было невозможно. Поэтому авторы использовали значения потенциала коллектора в вольтах. Линейный участок шкалы электрического усилителя имел пределы ± 500 В, что позволяло регистрировать электрическое поле атмосферы наиболее часто на одном диапазоне. Одновременно Байкальской ГМО проводились измерения химического состава примесей воздуха.

В табл. 1 приведен суточный ход градиента потенциала при различных метеорологических условиях. Главной особенностью электрического поля атмосферы в районе целлюлозно-бумажного комбината является частое возникновение отрицательных значений градиента потенциала. Повторяемость средних за час отрицательных значений градиента потенциала за 76 дней регистрации составляет 45 %.

Состояние погоды (облачность, осадки, туманы) изменяют соотношение повторяемостей электрических полей разных знаков, однако отрицательное значение градиента потенциала наблюдается при любой погоде. При осадках усиливается способность атмосферы к самоочищению и отрицательные электрические поля ослабевают. Суточные вариации электрического поля в Байкальске и Иркутске (табл. 1) различны. Если в Иркутске в течение

Суточный ход градиента потенциала (В/м) электрического поля атмосферы в Байкальске и Иркутске

Метеоусловия	Время (местное), ч					
	0—1	2—3	4—5	6—7	8—9	10—11
Байкальск						
Нормальные дни	—320	—50	—40	10	—50	—110
Дни с облачностью	—240	—150	—80	—1	—140	—130
Дни с осадками и туманом	—120	—10	150	70	70	20
март	—200	—92	88	82	16	—13
апрель	—200	—83	—36	27	—32	—49
февраль — май	—194	—84	43	37	—32	—58
Иркутск						
март — апрель	220	220	210	300	380	330

Метеоусловия	Время (местное), ч					
	12—13	14—15	16—17	18—19	20—21	22—23
Байкальск						
Нормальные дни	0	30	—60	320	280	—150
Дни с облачностью	—150	—70	190	230	50	—110
Дни с осадками и туманом	20	170	150	220	170	—100
март	8	130	180	90	60	—130
апрель	—83	8	224	388	99	—170
февраль — май	—54	51	155	225	112	—162
Иркутск						
март — апрель	360	280	310	340	340	260

суток наблюдается два максимума напряженности электрического поля (в 9 и в 19...21 ч), то в Байкальске суточный ход напряженности электрического поля характеризуется одним резким вечерним максимумом в (17...19 ч) и значительными отрицательными величинами ночью.

Таким образом, продукты целлюлозного производства, выбрасываемые в атмосферу, создают устойчивый отрицательный объемный заряд, превышающий по своей величине обычный положительный заряд атмосферы.

Коэффициенты линейной корреляции между средними суточными значениями градиента потенциала и концентрацией отдельных компонент малы, различны по знаку и близки по порядку к средней ошибке (0,15) определения этих величин, составляя для пыли—0,27, сернистого газа—0,28, двуокиси азота—0,20, фенола—0,19, сероводорода—0,28, двуокиси хлора—0,12. Объемный заряд промышленных выбросов формируется, по-видимому, не отдельными компонентами, а их суммарным эффектом.

СОДЕРЖАНИЕ

Г. П. Павлова, Ю. Ф. Пономарев, Е. В. Чубарина. Исследование метеорологических и электрических параметров конвективного облака	3
И. И. Камалдина, Г. Г. Корниенко. Частота разрядов из грозовых облаков при различных метеорологических условиях	12
✓ В. П. Колоколов, Л. В. Столярчук, Г. П. Павлова. О возможности установления связи между интенсивностью грозовой деятельности и аэрологическими параметрами методом дискриминантного анализа	21
✓ В. П. Колоколов, Г. П. Павлова, К. Б. Шевченко. Особенности грозовой деятельности в Ленинградской области в 1978 г.	27
В. К. Иньков, Л. Г. Махоткин. Широкие особенности грозовой деятельности	34
Т. В. Лободин. Продолжительность гроз на земном шаре	39
Т. В. Лободин. Распределение суммарного числа разрядов на земном шаре	44
Г. П. Лещенко, Б. К. Иньков. Оперативное обнаружение гроз панорамными регистраторами, установленными в двух пунктах	47
Л. Г. Махоткин, Б. К. Иньков, В. И. Синегубов. Сопоставление данных панорамных регистраторов близких гроз при частично перекрывающихся рабочих зонах	53
В. К. Иньков, Л. Г. Махоткин. Опыт регистрации среднего уровня атмосфериков при близких грозах в тропическом пункте	58
Л. Г. Махоткин, Б. К. Иньков. Оценка изменения амплитуд атмосфериков в ближней зоне	62
В. С. Жупахин, К. С. Жупахин. К оптимизации пороговых устройств с усилением запускающих сигналов	66
Л. Г. Махоткин, Б. К. Иньков. Зависимость фазовых параметров атмосфериков от расстояния	71
В. С. Снегуров. Фазовые соотношения между различными компонентами излучения молний в дипольном приближении	75
В. С. Снегуров. Опыт наблюдения за грозами фазовым пеленгатором-дальномером	79
И. А. Петренко, И. И. Кононов, С. М. Демькин. Разностно-дальномерная система для определения координат молниевых разрядов	83
Н. И. Крохин, Б. В. Семагин, В. С. Снегуров, Н. А. Файзулин. К оценке пространственной ориентации молниевых разрядов	89
Л. Г. Махоткин. К вопросу о поисках биологического влияния атмосфериков	92
В. П. Гордюк. Исследование принципов построения приборов для измерения напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы	96
Я. М. Шварц, Г. П. Ваюшина, Л. В. Огуряева, Л. Г. Соко-	

денкко, Ю. А. Якимайнен. Автоматизированные наблюдения за атмосферным электричеством	103
В. В. Михайловская, В. А. Пачин. Влияние инерции прибора на точность измерения величины скачка напряженности электрического поля после разряда молнии	115
В. В. Михайловская, В. А. Пачин: Метод локализации заряда, вовлеченного в грозовой разряд	120
А. П. Чертилова. Атмосферное электричество в период приземных инверсий в Иркутске	128
А. Х. Филиппов, А. А. Кречетов, В. К. Татарников. Влияние выбросов целлюлозно-бумажного производства на электрическое поле атмосферы	131

Труды ГГО, вып. 442

АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Редактор Л. В. Ковель. Технический редактор Н. Ф. Грачева. Корректор Т. В. Прокофьева

Н/К

Сдано в набор 26.01.81. Подписано в печать 04.06.81. М-21509. Формат 60×90^{1/16}. Бумага тип. № 1. Лит. гарн. Печать высокая. Печ. л. 9,0. Кр.-отт. 9,25. Уч.-изд. л. 8,9. Тираж 620 экз. Индекс МЛ-127. Заказ № 127. Цена 60 коп. Гидрометеиздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, д. 23.

Сортавальская книжная типография Управления по делам издательств, полиграфии и книжной торговли Совета Министров Карельской АССР. Сортавала, Карельская, 42.