

06  
Т 78

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ  
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

# ТРУДЫ ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

имени А. И. Воейкова

ВЫПУСК 120

ВОПРОСЫ РАДИОМЕТЕОРОЛОГИИ И ФИЗИКИ  
ОБЛАКОВ

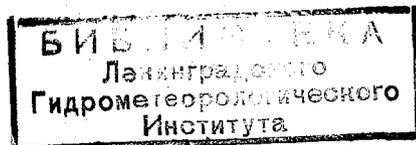
Под редакцией

д-ра физ.-мат. наук

Н. С. ШИШКИНА,

канд. физ.-мат. наук

Н. Ф. КОТОВА



ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

ЛЕНИНГРАД • 1961

### *АННОТАЦИЯ*

Сборник содержит статьи, в которых рассматриваются вопросы улучшения методики наблюдений радиолокационных станций штормоповещения и вертикального зондирования облачности и обработки полученных результатов наблюдений, вопросы радиолокационного исследования облаков и некоторых других диэлектрических неоднородностей атмосферы. Несколько статей посвящено физике облаков.

Сборник рассчитан на научных и оперативных работников, связанных в своей деятельности с метеорологическим использованием радиолокационных станций, а также на аспирантов и студентов старших курсов вузов.

## НОВЫЙ КОД ДЛЯ СЕТИ СТАНЦИЙ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ШТОРМООПОВЕЩЕНИЯ

В статье излагается новый код для составления телеграмм на станциях радиолокационного штормооповещения и вертикального зондирования облачности, составленный с учетом недостатков, выявленных в многолетней практической работе ст. Воейково, результатов научно-исследовательской работы по изучению ливней и гроз и перспектив дальнейшего развития службы радиолокационного штормооповещения.

### Введение

В 1957 г. научными сотрудниками ГГО им. А. И. Воейкова Н. Ф. Котовым и Е. М. Сальманом были составлены Методические указания для работников сети станций радиолокационного штормооповещения. Методическая комиссия ЦАО одобрила их к изданию и внедрению на сети после испытания на пунктах радиолокационного штормооповещения Сухуми, Ростов-на-Дону, Казань и Ленинград и доработки их в соответствии с замечаниями, которые поступят с пунктов.

Основные положения Методических указаний опубликованы в статьях [1] и [2], где приведено и их научное обоснование. Доработка их производилась с учетом критических замечаний, полученных с пунктов радиолокационного штормооповещения: Ростов-на-Дону, Казань и Ленинград. Кроме того, для радиолокационного разделения ливней и гроз были использованы дополнительные материалы и выводы, опубликованные нами в [3].

Наибольшей проверке Методические указания подверглись со стороны работников Северо-Западного УГМС. Заместителем начальника Бюро погоды С. П. Казновым было организовано несколько совещаний синоптиков с научными сотрудниками Радиометеорологической лаборатории ГГО, на которых критически обсуждались Методические указания и код. Эти совещания оказались полезными для обеих сторон, так как удалось выяснить и согласовать специфику работы синоптиков и операторов станций. В результате совещаний были выработаны основные требования, которые учтены при разработке кода.

1. Станция должна давать сведения: а) о характере распределения очагов осадков, б) о характере движения очагов осадков, в) о грозовом характере очагов осадков.

2. Данные о характере распределения очагов осадков должны отражать фактическую картину, наблюдающуюся на экране ИКО, и охватывать все разнообразие радиолокационных отражений.

3. Координаты очагов осадков должны передаваться в таком виде, чтобы синоптик легко мог нанести их на карту.

4. Код должен обеспечивать краткость телеграмм и удобство при кодировании и раскодировании их.

Нанесение на карту радиолокационных данных производится с помощью специального планшета.

Для изготовления планшета нами была использована доска от круга Молчанова, на которую под матированный целлулоид подкладывалась карта местности в масштабе 1:1 000 000. Карта расположена так, что в центре находится местоположение станции, данные которой наносятся на карту. Круг с радиусом действия станции (200 км) делится на 100 делений начиная с линии севера по часовой стрелке (цена деления 3,6°). Такая же, как и на круге Молчанова, подвижная линейка тоже разделена на 100 делений начиная от центра (1 деление — 2 км).

Координаты любой точки определяются четырехзначным числом — два знака для азимута и два знака для расстояния — и легко наносятся на целлулоиде карандашом. Было изготовлено четыре одинаковых планшета с центром в пос. Воейково, Всеволожского района, Ленинградской области, где находилась станция. Эти планшеты были предоставлены в распоряжение синоптиков. Станция Воейково проводила наблюдения ежедневно и круглосуточно, передавая радиолокационные данные в эти пункты в течение 1958 и 1959 гг. по нижеприведенному коду.

#### КОД ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

Текст телеграммы состоит из двух или более пятизначных групп. Первые две группы телеграммы:

NNddm TTttp.

NN — порядковый номер телеграммы (возобновляется ежесуточно).

dd — дата.

m — месяц (октябрь — 0, ноябрь — 1).

TT — время в часах.

tt — время в минутах.

r — характеристика отражения (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9).

r — 0 — наблюдения в синоптический срок не производились по техническим причинам.

r — 1 — отражений в радиусе действия радиолокатора нет. Такая телеграмма подается только в том случае, когда наблюдавшиеся до этого отражения исчезли.

Если в последующие сроки отражения отсутствуют, то телеграмма не подается.

r — 2 — наблюдения обложных осадков.

В этом случае дается третья группа, которая начинается всегда с нуля.

Oaavv

aa — азимут направления движения очагов в десятках градусов (указывается та точка горизонта, куда движутся очаги).

vv — скорость движения очагов в км/час.

r — 3 — наблюдаются отдельные разбросанные очаги ливневых осадков. В этом случае даются группы

Oaavv MAARR

Эти группы в зависимости от количества очагов и характера их движения могут быть приведены несколько раз.

М — характеристика грозового состояния по трехбалльной системе:

1 — ливни, 2 — грозы, 3 — сильные грозы.

АА — азимут очага в делениях по кругу на планшете (цена деления  $3,6^\circ$ ).

RR — расстояние до очага в делениях на подвижной линейке на планшете (цена деления 2 км).

Группа 0aavv, начинающаяся всегда с нуля, дает характер движения только тех очагов, координаты которых даны в последующих группах до следующей группы, начинающейся с нуля. Эта вторая группа указывает характер очагов, координаты которых даны в стоящих после нее группах. Это замечание не относится к первым двум группам, которые могут начинаться с нуля, но во всех телеграммах дают порядковый номер телеграмм, дату, время и характеристику отражения.

р — 4 — наблюдается вытянутая в линию полоса очагов ливневых осадков. В этом случае телеграмма состоит из пяти групп.

NNddm — TTtt4 — 0aavv — MA<sub>1</sub>A<sub>1</sub>R<sub>1</sub>R<sub>1</sub> — MA<sub>2</sub>A<sub>2</sub>R<sub>2</sub>R<sub>2</sub>,

где (A<sub>1</sub>A<sub>1</sub> — R<sub>1</sub>R<sub>1</sub>) и (A<sub>2</sub>A<sub>2</sub> — R<sub>2</sub>R<sub>2</sub>) — координаты концов полосы очагов. В третьей группе приводится характер движения очагов. Если направление их движения параллельно полосе очагов, то данная полоса очагов связана со стационарным или малоподвижным фронтом; если оно перпендикулярно полосе очагов, то данная полоса очагов связана с подвижным фронтом.

р — 5 — наблюдаются очаги ливневых осадков, равномерно распределенные и занимающие достаточно большой район. В этом случае телеграмма состоит из пяти или четырех групп.

I случай. NNddm — TTtt5 — 0aavv — MA<sub>1</sub>A<sub>1</sub>A<sub>2</sub>A<sub>2</sub> — MR<sub>1</sub>R<sub>1</sub>R<sub>2</sub>R<sub>2</sub>.

Здесь A<sub>1</sub>A<sub>1</sub> и A<sub>2</sub>A<sub>2</sub> — азимуты в делениях по кругу на планшете, причем очаги располагаются по часовой стрелке от первого азимута A<sub>1</sub>A<sub>1</sub> до второго A<sub>2</sub>A<sub>2</sub>. Пятая группа показывает, что очаги расположены с расстояния R<sub>1</sub>R<sub>1</sub> до R<sub>2</sub>R<sub>2</sub>, данных в делениях на подвижной линейке планшета.

II случай. NNddm — TTtt5 — 0aavv — MxxRR. Такая телеграмма составляется в том случае, когда очаги располагаются вокруг станции в радиусе RR, данном в делениях на подвижной линейке планшета. При этом в четвертой группе будут стоять два икса.

р — 6 — сообщаются неполные сведения. Даются только характер и координаты очагов ливней и гроз, появляющихся на трассах или в определенных пунктах. Телеграмма состоит из трех групп или более.

NNddm — TTtt6 — MA<sub>1</sub>A<sub>1</sub>R<sub>1</sub>R<sub>1</sub> — MA<sub>2</sub>A<sub>2</sub>R<sub>2</sub>R<sub>2</sub> и т. д.

Здесь, начиная с третьей группы, даются координаты гроз и ливней (A<sub>1</sub>A<sub>1</sub> — R<sub>1</sub>R<sub>1</sub>), (A<sub>2</sub>A<sub>2</sub> — R<sub>2</sub>R<sub>2</sub>) в делениях на планшете.

р — 7 — наблюдается полоса очагов ливневых осадков и разбросанные отдельные очаги ливневых осадков. В этом случае 3, 4, 5-я группы кодируются так же, как в случае р — 4, а в последующие — как в случае р — 3 (не считая первых двух групп).

р — 8 — наблюдаются очаги ливневых осадков, равномерно распределенные и занимающие достаточно большой район, и отдельные разбросанные очаги ливневых осадков. В этом случае группы (одна или две), стоящие после третьей группы, коди-

руются так же, как в случае  $p=5$ , а последующие — как в случае  $p=3$  (не считая первых двух групп).  
 $p=9$  — изменений по сравнению с данными в предыдущей телеграмме нет.

### Обсуждение кода

В 1958 г. на ст. Воейково проводились радиолокационные наблюдения ежечасно в течение 99 дней. За это время она провела 2192 наблюдения, что составляет 92,2%.

184 наблюдения не произведено по техническим причинам, в основном из-за отсутствия тока, который во время местной грозы автоматически выключается.

При введении кода предполагалось, что больше всего окажется случаев, когда отражения будут отсутствовать. Поэтому условились подавать телеграмму с  $p=1$  только в случае, когда наблюдавшиеся до того отражения исчезли. Если в последующие сроки отражения отсутствовали, то телеграмма не подавалась.

Это обстоятельство заставило ввести  $p=0$ , когда наблюдения не были произведены по техническим причинам. При этом условились, что повторных телеграмм и с  $p=0$  тоже не будет. Это мероприятие оказалось вполне разумным, так как из 1474 случаев, когда отражения отсутствовали, телеграмма с  $p=1$  посылалась только 92 раза. Телеграмм с  $p=0$  было послано 35. Очевидно, и в дальнейшем такой порядок нужно сохранять.

Если все наблюдения на ст. Воейково в летний сезон 1958 г. разделить по характеристике, то получим следующую таблицу:

| $p$ . . . . . | 1    | 2   | 3   | 4  | 5   | 6  | 7  | 8  |
|---------------|------|-----|-----|----|-----|----|----|----|
| Число случаев | 1474 | 143 | 106 | 65 | 304 | 18 | 20 | 62 |

Основные характеристики радиолокационных отражений  $p=2, 3, 4$  и  $5$ ;  $p=7$  — это комбинация из  $p=4$  и  $p=3$ , а  $p=8$  из  $p=5$  и  $p=3$ . Однако в 1958 г. наблюдались две полосы осадков, т. е. двойное  $p=4$  и два района осадков — двойные  $p=5$ , а также комбинация из  $p=5$  и  $p=4$ . В этих случаях посылали по две телеграммы. Так как эффективность радиолокатора на ст. Воейково была увеличена, то во время наблюдения отражений от обложных осадков имели место одновременно и далекие отражения от очагов ливней и гроз. В этих случаях наблюдались комбинации  $p=2$  и  $p=3$ ,  $p=2$  и  $p=5$  и  $p=2$  и  $p=8$ .

Это обстоятельство свидетельствует о недостаточной универсальности кода. Очевидно, необходимо внести изменения, которые бы обеспечивали подачу только одной телеграммы. Но здесь необходимо иметь в виду, что могут быть различные комбинации из основных четырех характеристик отражений. Вероятность этого особенно возрастает при использовании радиолокаторов с повышенной эффективностью.

При радиолокационных наблюдениях больше всего времени затрачивается на определение скорости и направления движения очагов. Иногда же определить ее с достаточной надежностью бывает весьма затруднительно. В этих случаях обычно дается группа 0xxxx. Однако если группы, дающие сведения о характере движения очагов, всегда начинаются с нуля, то, очевидно, наличие или отсутствие их в телеграмме не должно осложнять декодирования последней.

Введение телеграммы с  $p=9$  недостаточно оправдывается практикой, а с увеличением эффективности радиолокаторов будет оправдываться еще меньше по следующим причинам: во-первых, трудно предположить, чтобы за час не могло произойти существенных изменений в распределении очагов осадков и их характеристик; во-вторых, синоптик, получив такую телеграмму, должен восстанавливать в памяти картину, существовавшую час назад.

Для оператора это представляет даже некоторые затруднения, так как, кроме определения характеристики наблюдающихся отражений, необходимо сравнить их с предыдущими и решить существенность их различия при отсутствии каких-либо методических указаний по данному вопросу. Практически это выполнимо при наблюдении отражений от обложных осадков, когда в течение долгого времени имеет место однообразная картина радиолокационных отражений. Но в этом случае можно просто не посылать телеграммы, руководствуясь общепринятым правилом, что повторные телеграммы не подаются.

Наблюдения на ст. Воейково в летний сезон 1959 г. разделяются по характеристике отражений следующим образом:

| $p$ . . . . . | 1    | 2   | 3   | 4  | 5   | 6  | 7  | 8  |
|---------------|------|-----|-----|----|-----|----|----|----|
| Число случаев | 2798 | 228 | 129 | 40 | 278 | 90 | 27 | 77 |

Телеграмм с  $p=1$  было послано только 132; 2666 телеграмм как повторные не подавались; из 228 телеграмм с  $p=2$  подано только 90, а 138 как повторные не подавались.

Передача телеграмм с  $p=6$  вполне целесообразна и должна применяться как учащенная передача неполных, но наиболее важных сведений об очагах осадков, имеющих большое влияние на полеты авиации. В синоптические сроки практиковать подачу телеграмм с  $p=6$ , конечно, не следует, так как в эти сроки нужно дать полные сведения для уточнения карт-кольцовок.

Основным достоинством этого кода является простота передачи координат очагов и удобство нанесения синоптиком данных любой станции на карту-планшет. Однако с увеличением эффективности радиолокатора и увеличением его радиуса действия до 350—400 км способ планшета окажется непригодным вследствие кривизны параллелей и непараллельности меридиан на карте. В этом случае нанесение радиолокационных данных на карту можно произвести с помощью специальной сетки. Эта сетка наносится на карту следующим образом.

Отыскивается на карте точка, где установлена радиолокационная станция. Через эту точку проводят меридиан и параллель. Меридиан и параллель делят на равные части в соответствии с указанным масштабом. Длина этих отрезков должна равняться  $\frac{1}{10}$  максимального радиуса действия радиолокатора. При радиусе действия радиолокатора, равном 400 км, это будут точки, отстоящие от центра на расстояниях 40, 80, 120, 160, 200, 240, 280, 320, 360 и 400 км. Они соответственно обозначаются 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100. В каждом квадранте проводится дуга, соединяющая две соседние точки на меридиане и параллели. Это можно сделать с помощью циркуля, установив острие его не в центре, а на параллели по другую сторону меридиана. Все дуги каждого квадранта делятся на пять равных частей и через эти точки проводятся радиальные линии. После этого они обозначаются 0, 5, 10, 15 и т. д. до 95 по часовой стрелке, начиная с севера. Такая сетка наносится на карту тушью. На карту кладется матированный лист целлулоида, на котором с помощью данной сетки наносятся радиолокационные данные станции

Практика показала также, что передача первой группы NNddm, по существу, является излишней и не оправдывает себя. Порядковый номер телеграммы не нужен, так как наблюдения проводятся регулярно, ежечасно. Если в определенный час телеграмма не поступила, то это означает, что радиолокационные данные точно такие же, как в предыдущей телеграмме. Дата, а тем более месяц — тоже излишняя, ненужная деталь. Телеграмма обычно доходит до синоптика через 5—10 мин. Кроме того, эти данные отмечаются в отделениях связи на самой телеграмме.

В дальнейшем при передаче по радио сводки радиолокационных данных целой сети станций или отдельных групп этих станций, расположенных вдоль какой-либо авиатрассы, для отделения данных одной станции от другой необходима специальная группа, в которой будет указан номер и радиус действия станции, определяющей масштаб координатной сетки. В этом масштабе передаются радиолокационные данные станции.

Необходимо отметить, что применяемый нами способ передачи координат очень удобен. Он осуществляется четырехзначным числом, где первые две цифры (вторая и третья) указывают азимут в делениях по кругу (цена деления  $3,6^\circ$ ), а последние две цифры (четвертая и пятая) указывают расстояние в сотых долях максимальной дальности действия радиолокатора.

Такой способ передачи координат может применяться на сети станций радиолокационного штормооповещения, оборудованной радиолокаторами различной эффективности.

Максимальная дальность обнаружения ливней и гроз зависит не только от параметров радиолокатора, но и от структуры ливней и гроз, в основном от их вертикальной мощности. Следовательно, радиолокаторы одной и той же эффективности в различных физико-географических условиях и в различное время года могут обладать разной максимальной дальностью обнаружения ливней и гроз. Однако выбранный нами способ передачи координат обладает единообразием и удобством нанесения радиолокационных данных на карту со специальной координатной сеткой.

Большим недостатком применяемого нами кода является отсутствие данных о плотности заполнения очагами осадков полосы или района ливневых осадков тем более, что это осуществимо без особых осложнений.

Наконец, необходимо предусмотреть в коде возможность передачи дополнительных данных о границах облачности, зонах обледенения, зонах повышенной турбулентности и т. п.

Схема кода должна быть проста, универсальна и построена по тому же принципу, что и схемы кода для передачи метеорологических и аэрологических данных. Поскольку объем радиолокационных данных сильно меняется от наблюдения к наблюдению и его нельзя уложить в определенное число групп, то схему нашего кода лучше всего построить по принципу схемы кода для передачи шаропилотных наблюдений, т. е. передавать данные в виде одной или нескольких частей при их различном сочетании, но с необходимым удобством разделения и определения их в тексте телеграммы.

Предлагаемый нами новый код для составления телеграмм на станциях радиолокационного штормооповещения и вертикального зондирования облачности приводится ниже. Он составлен с учетом недостатков, выявленных в многолетней практической работе станции, результатов научно-исследовательской работы по исследованию

ливней и гроз и перспектив дальнейшего развития службы радиолокационного штормооповещения.

**КОД ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ ТЕЛЕГРАММ НА СТАНЦИЯХ  
РАДИОЛОКАЦИОННОГО ШТОРМООПОВЕЩЕНИЯ И ВЕРТИКАЛЬНОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ ОБЛАЧНОСТИ**

**Схема кода**

**РУПОР**

Часть I 1xxx1  
Часть II 2xxx2 (0aavv)  
Часть III 3xxx3 MA<sub>1</sub>A<sub>1</sub>R<sub>1</sub>R<sub>1</sub> (0a<sub>1</sub>a<sub>1</sub>v<sub>1</sub>v<sub>1</sub>) MA<sub>2</sub>A<sub>2</sub>R<sub>2</sub>R<sub>2</sub> (0a<sub>2</sub>a<sub>2</sub>v<sub>2</sub>v<sub>2</sub>)  
Часть IV 4xxx4 MA<sub>1</sub>A<sub>1</sub>R<sub>1</sub>R<sub>1</sub> PA<sub>2</sub>A<sub>2</sub>R<sub>2</sub>R<sub>2</sub>0aavv  
Часть V 5xxx5 MA<sub>1</sub>A<sub>1</sub>R<sub>1</sub>R<sub>1</sub> PA<sub>2</sub>A<sub>2</sub>R<sub>2</sub>R<sub>2</sub> (0aavv)  
Часть VI 6ttt6 MA<sub>1</sub>A<sub>1</sub>R<sub>1</sub>R<sub>1</sub> MA<sub>2</sub>A<sub>2</sub>R<sub>2</sub>R<sub>2</sub> MA<sub>3</sub>A<sub>3</sub>R<sub>3</sub>R<sub>3</sub>...  
Часть VII 7xxx7 CH<sub>1</sub>H<sub>1</sub>V<sub>1</sub>V<sub>1</sub> CH<sub>2</sub>H<sub>2</sub>V<sub>2</sub>V<sub>2</sub>...  
Часть VIII — — —  
Часть IX 9ttt9

**Значения отличительных групп и буквенных  
символов в схеме кода**

- 1xxx1 — отличительная группа, указывающая, что отражения от очагов осадков не наблюдаются.
- 2xxx2 — отличительная группа, указывающая, что наблюдаются отражения от обложных осадков.
- 3xxx3 — отличительная группа, указывающая, что наблюдаются отражения от отдельных разбросанных очагов ливневых осадков, координаты и характеристики которых даны в последующих группах.
- 4xxx4 — отличительная группа, указывающая, что наблюдается вытянутая в линию полоса очагов ливневых осадков, координаты концов которой и характеристики ливней даны в последующих группах.
- 5xxx5 — отличительная группа, указывающая, что наблюдаются очаги ливневых осадков, равномерно распределенные и занимающие большой район, протяженность которого по азимуту и расстоянию с характеристиками ливней даны в последующих группах.
- 6ttt6 — отличительная группа, указывающая, что сообщаются неполные сведения. Дается только грозовой характер и координаты очагов ливневых осадков, появляющихся на авиатрассах или в заранее определенных районах.
- 7xxx7 — отличительная группа, указывающая, что в последующих группах передаются данные вертикального зондирования облачности.
- 9ttt9 — отличительная группа, указывающая, что радиолокационные наблюдения не производились по техническим причинам.
- ttt — время наблюдения.
- aa — направление движения очагов осадков.
- vv — скорость движения очагов осадков.
- M — характеристика грозового состояния очагов ливневых осадков.
- AA — азимут наблюдаемого объекта.

- RR — радиус-вектор наблюдаемого объекта.  
 П — плотность заполнения данного пространства очагами ливневых осадков.  
 С — характеристика данного слоя облачности.  
 НН — высота нижней границы данного слоя облачности.  
 ВВ — высота верхней границы данного слоя облачности.

### ПОЯСНЕНИЕ К СХЕМЕ КОДА

В начале телеграммы ставится слово «Рупор».

Телеграмма может состоять из одной или нескольких частей. Так как некоторые части имеют неопределенное количество групп, то для отделения одной части от другой и для определения их служат отличительные группы с иксами, стоящие в начале каждой части. В отличительной группе, стоящей в начале телеграммы, вместо xxx ставится ttt — время наблюдения. Части VI и IX составляются отдельно, не в сочетании с какой-либо другой частью, поэтому их отличительные группы представлены без иксов.

Группы, стоящие в скобках, всегда начинаются с нуля. Эти нулевые группы содержат сведения о характере движения очагов осадков. Если характер движения очагов осадков почему-либо не определен, то такая группа в телеграмме опускается. Нулевая группа части IV не заключена в скобки, что указывает на ее необходимость в данной части.

Характер движения очагов осадков, приведенный в данной нулевой группе, относится только к тем очагам осадков, координаты которых даны в группах, стоящих перед данной нулевой группой и не относятся к тем очагам, данные о которых помещены в группах, стоящих после данной нулевой группы.

Радиолокационные наблюдения проводятся ежечасно, но повторные телеграммы не передаются. Это может быть в том случае, когда телеграмма состоит из одной части — I, II или IX.

### СОДЕРЖАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ЧАСТЕЙ И ГРУПП КОДА

#### Часть I

##### Группа Ixxx1

Ixxx1 — отличительная группа, указывающая, что отражения от очагов осадков в радиусе действия радиолокатора не наблюдаются.

#### Часть II

##### Группа 2xxx2

2xxx2 — отличительная группа, указывающая, что наблюдаются отражения от обложных осадков.

##### Группа 0aavv

0 — отличительная цифра, указывающая, что в данной группе даны сведения о характере движения очагов осадков.

aa — направление движения очагов осадков в десятках градусов по шкале 00—36; определяется той точкой горизонта, куда движутся очаги, и отсчитывается от севера по часовой стрелке

(через восток на юг). Округление направления движения до десятков градусов производится следующим образом: если число единиц градусов меньше 5, то они отбрасываются и в телеграмме на месте aa ставится число десятков; если же число единиц градусов 5 или больше, то к оставшемуся числу десятков градусов прибавляется единица. При отсутствии движения осадков на место aa ставится 00.

vv — скорость движения очагов осадков в км/час.

### Часть III

#### Г р у п п а 3xxx3

3xxx3 — отличительная группа, указывающая, что наблюдаются отражения от отдельных разбросанных очагов ливневых осадков, координаты и характеристики которых даны в последующих группах.

#### Г р у п п ы MA<sub>1</sub>A<sub>1</sub>R<sub>1</sub>R<sub>1</sub> MA<sub>2</sub>A<sub>2</sub>R<sub>2</sub>R<sub>2</sub>

M — характеристика грозового состояния очага ливневых осадков, координаты которого приведены в данной группе.

Кодируются по следующей таблице:

| Цифры<br>кода | Характеристика<br>грозового состояния | Вертикальная мощность<br>очага               |
|---------------|---------------------------------------|--|
| 1             | Ливень                                | Не превышает высоту изотермы $-22,4^{\circ}$ |
| 2             | Гроза                                 | Превышает высоту изотермы $-22,4^{\circ}$    |
| 3             | Сильная гроза                         | Достигает высоты тропопавузы                 |

AA — азимут очага ливневых осадков в сотых делениях круга (цена деления  $3,6^{\circ}$ ), отсчитываемый от севера по часовой стрелке (через восток и юг).

Основные румбы: север 00  
восток 25  
юг 50  
запад 75

RR — радиус-вектор очага ливневых осадков в сотых делениях радиуса действия радиолокатора.

Группы 0aavv содержат сведения о характере движения очагов ливневых осадков, координаты которых даны в группах, стоящих впереди, и кодируются так же, как нулевая группа в части II.

### Часть IV

#### Г р у п п а 4xxx4

4xxx4 — отличительная группа, указывающая, что наблюдается вытянутая в линию полоса очагов ливневых осадков, связанная с фронтальным разделом.

### Группы $MA_1A_1R_1R_1$ и $PA_2A_2R_2R_2$

**М** — характеристика грозового состояния ливней данной полосы, кодируемая по трехбалльной системе, как в части III. В группу ставится наибольшее значение, которое имеет хотя бы один очаг данной полосы.

**П** — плотность заполнения очагами осадков данной полосы. Кодируется по следующей таблице:

| Цифры<br>кода | Характер заполнения  |
|---------------|--|
| 4             | Малая плотность, когда размеры очагов меньше промежутков между ними          |
| 5             | Средняя плотность, когда размеры очагов и промежутков между ними равновелики |
| 6             | Большая плотность, когда размеры очагов больше промежутков между ними        |

$(A_1A_1, R_1R_1)$  и  $(A_2A_2, R_2R_2)$  — полярные координаты концов полосы ливневых осадков, которые кодируются так же, как в части III.

### Группа 0aavv

Эта группа содержит сведения о характере движения очагов ливневых осадков в данной полосе. Кодируется, как указано выше.

Если движение очагов направлено вдоль полосы ливневых осадков, то данная полоса связана со стационарным или малоподвижным фронтом. Если движение направлено перпендикулярно полосе ливневых осадков, то данная полоса связана с подвижным фронтом и движется вместе с ним.

### Часть V

#### Группа 5xxx5

5xxx5 — отличительная группа, указывающая, что наблюдаются очаги ливневых осадков, равномерно распределенные и занимающие большой район, протяженность которого по азимуту и расстоянию с характеристиками ливней даны в последующих группах.

### Группы $MA_1A_1R_1R_1$ и $PA_2A_2R_2R_2$

**М** — характеристика грозового состояния ливней данного района, кодируемая по трехбалльной системе, как в части III. В группу ставится наибольшее значение **М**, которое имеет хотя бы один очаг данного района.

**П** — плотность заполнения очагами осадков района. Кодируется, как в части IV.

$A_1A_1$  и  $A_2A_2$  — азимуты направлений (кодируемые так же, как в части III), между которыми расположены очаги ливневых осадков, причем район заполнения опреде-

ляется по часовой стрелке от  $A_1A_1$  до  $A_2A_2$ . Если очаги ливневых осадков расположены равномерно вокруг радиолокационной станции, то вместо  $A_1A_1$  ставится 00, а вместо  $A_2A_2$  ставится 99.

$R_1R_1$  и  $R_2R_2$  — радиусы-векторы (кодируемые так же, как в части III), между которыми расположены очаги ливневых осадков, причем  $R_1R_1$  меньше  $R_2R_2$ . Если очаги ливневых осадков расположены равномерно вокруг радиолокационной станции, то вместо  $R_1R_1$  ставится 00.

#### Г р у п п а 0aavv

Эта группа содержит сведения о характере движения очагов ливневых осадков в данном районе. Кодировается, как указано выше.

### Часть VI

#### Г р у п п а 6ttt6

6ttt6 — отличительная группа, указывающая, что сообщаются неполные сведения. Дается только грозовой характер и координаты очагов ливневых осадков, появляющихся на авиатрассах или в заранее определенных районах.

ttt — время наблюдения в часах и десятках минут (московское время).

#### Г р у п п ы MAARR.....

В этих группах указывается характеристика грозового состояния и координаты очагов ливней; кодируются, как в части III.

### Часть VII

#### Г р у п п а 7xxx7

7xxx7 — отличительная группа, указывающая, что в последующих группах передаются данные вертикального зондирования облачности.

#### Г р у п п ы СННВВ

С — характеристика данного слоя облачности. Кодировается по следующей таблице:

| Цифры<br>кода | Характеристика слоя облачности   |
|---------------|----------------------------------|
| 7             | Отражение от слоя не наблюдается |
| 8             | Слой с просветами                |
| 9             | Сплошной слой                    |

НН — высота нижней границы слоя в гектометрах над уровнем моря.

ВВ — высота верхней границы слоя в гектометрах над уровнем моря.

К измеренным значениям НН и ВВ необходимо прибавлять высоту антенны над уровнем моря в гектометрах.

Группы СННВВ ставятся в порядке возрастания значений НН и ВВ так, что  $H_1N_1 < V_1V_1 < H_2N_2 < V_2V_2 < H_3N_3 < V_3V_3$ .....

Если наблюдается слой облаков, нижняя граница которого будет выше 99 гектометров, а ниже слой облаков отсутствует, то необходимо на второе место данной части поставить группу 70099. Тогда от полученных значений  $H_2H_2$  и  $B_2B_2$  необходимо отнять по 100 гектометров и полученные разности поставить в группу.

### Часть VIII

Остается в резерве.

### Часть IX

#### Группа 9ttt9

9ttt9 — отличительная группа, указывающая, что радиолокационные наблюдения не производились по техническим причинам.

ttt — срок, в который радиолокационные наблюдения не производились.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Котов Н. Ф. Использование результатов радиолокационных исследований осадков для улучшения работы сети станций штормооповещения. Труды ЦАО, вып. 20, 1958.
2. Сальман Е. М. Некоторые вопросы улучшения службы радиолокационного штормооповещения. Труды ЦАО, вып. 20, 1958.
3. Котов Н. Ф. Радиолокационные характеристики ливней и гроз. Труды ГГО, вып. 102, 1960.

## ГРОВОЙ РЕЖИМ В РАЙОНЕ ЛЕНИНГРАДА ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ ст. ВОЕЙКОВО ЗА 1958—1959 гг.

В статье приведены данные обработки визуальных наблюдений на станции штормоповещения за 1958—1959 гг. и составлены карты относительной повторяемости ливней и гроз в районе Ленинграда за эти же годы.

### Введение

Определение грозовой режим данного района представляет большой практический интерес для многих отраслей народного хозяйства. Это объясняется прежде всего тем, что грозы нередко причиняют значительный материальный ущерб. Для авиации, например, грозы создают условия сложной метеорологической обстановки, полеты в которой представляют серьезную опасность. Необходимо и очень важно знать повторяемость гроз в районах аэропортов для обеспечения безопасности подхода и посадки самолетов.

Несмотря на большую важность этого явления, климатических карт гроз по территории СССР в целом не было до последних лет. Впервые такие карты были построены Е. П. Архиповой [1], [2]. Эти карты весьма важны, так как они дают представление о закономерностях годового хода и географического распределения гроз.

Однако такие карты не могут полностью удовлетворить отдельные запросы по метеорологическому обеспечению авиации и других отраслей народного хозяйства, если речь идет о вероятности гроз в районе пункта или в районе авиатрассы. Метод наблюдения ливней и гроз с помощью радиолокационной станции сантиметрового диапазона имеет весьма большие перспективы при изучении местных особенностей грозовой режимы и может наиболее эффективно использоваться при изучении режимных особенностей ливней и гроз и составлении карт грозовой деятельности в районе обзора радиолокационной станции.

### Метод обработки визуальных наблюдений на станциях штормоповещения

Описание метода обработки визуальных данных на станциях штормоповещения дано в статье А. А. Федоровой [3]. Сущность этой методики сводится к следующему.

В определенном масштабе изготавливается бланк радиальной сетки. Для этого берется круглый лист бумаги, через центр которого проводится сеть радиальных линий, отстоящих друг от друга на расстоянии  $10^\circ$ . Радиальная сетка разбивается на кольца концентрическими кругами, проведенными через каждые 10 км.

По данным штормовой телеграммы с помощью линейки и градусной сетки на бланк наносятся изображения отдельных очагов или группы близко расположенных очагов в виде овалов. Если очаг грозы или ливня размещается полностью внутри одного сектора или захватывает более одной трети другого сектора, или нескольких соседних, то в них отмечается случай наблюдения грозы или ливня. Если очаг захватывает менее одной трети площади сектора, то отметка ливня не производится.

Однако такая обработка не дает действительного представления о повторяемости ливней и гроз в определенном районе. Это может быть объяснено тем, что радиолокационные наблюдения носят избирательный характер. Дело в том, что вероятность радиолокационного обнаружения уменьшается с удалением от пункта наблюдения. Если на близких расстояниях радиолокатор обнаруживает и слабые зоны осадков, то на значительном удалении от станции обнаруживаются только ливни, занимающие большую площадь и имеющие значительную интенсивность.

С целью учета уменьшения вероятности радиолокационного обнаружения ливней и гроз с расстоянием были вычислены отношения числа наблюдаемых случаев отражений от ливней и гроз над каждым сектором радиальной сетки к среднему числу случаев для каждого сектора. Полученные таким путем относительные числа показывают, во сколько раз повторяемость грозы или ливня над данным участком местности больше или меньше средней повторяемости в том же кольце.

Данные относительной повторяемости ливней и гроз переписываются на новый бланк радиальной сетки, на котором и проводятся линии равной относительной повторяемости. Совмещение географической карты местности с картой относительной повторяемости дает представление о грозоопасности района наблюдений.

### **Орографические условия района радиолокационного обзора**

Прежде чем приступить к рассмотрению карт грозового режима в районе Ленинграда и области, необходимо составить некоторое представление о физико-географических особенностях района радиолокационного обзора.

Ленинградская область расположена в западной части Восточно-Европейской равнины. В пределах области находятся Финский залив Балтийского моря, Ладожское озеро, а также много рек, среди которых имеются и такие многоводные, как Нева, Свирь, Волхов и Луга; много мелких озер. В границах области располагаются обширные низины, равнинные пространства и холмистые возвышенности. Большая часть области относится к обширной Прибалтийской низменности, а восточные районы ее — к Валдайской возвышенности. Кроме того, в состав области входят Карельский перешеек (между Финским заливом и Ладожским озером) и южная часть Олонецкого перешейка.

Вся территория области почти полностью характеризуется небольшими абсолютными (над уровнем моря) и относительными высотами. Особенно низменны побережья Финского залива, Ладожского озера и Приневская впадина между ними. Эти низины слабо расчленены реками, но местами здесь встречаются небольшие холмы и гряды (Колтуши, холмы у пос. Всеволожский). Значительными абсолютными высотами отличается центральная часть Карельского перешейка (более 100 м, высшая точка 205 м) — Токсовские и Лемболовские высоты. К югу от Финского залива расположена Ижорская возвышенность. Абсолютные высоты возвышенности почти всюду более 100 м и местами превышают 150 м (высшая точка 175 м у пос. Можайского).

## Анализ полученного материала

Перейдем теперь к непосредственному анализу относительной повторяемости ливней и гроз по данным радиолокационной станции Воейково за 1958—1959 гг. Всего было обработано 1283 случая наблюдений ливневых осадков в радиусе 200 км от станции. Наблюдения велись круглые сутки; станция включалась ежечасно. Обработка производилась отдельно для дня и для ночи. К дневному времени относятся наблюдения, произошедшие в сроки 10—21 час местного времени, когда развита конвекция, обусловленная солнечным прогревом. К ночному времени относится остальное время суток, т. е. 22—09 час. следующего дня.

В результате проделанной вышеуказанным методом обработки получены таблицы истинного числа случаев ливней и гроз за 1958, 1959 гг. (см. табл. 1). Таблица 1 показывает, сколько раз над данным сектором наблюдалось радиоэхо от очагов ливней и гроз за весь сезон данного года. Сводная таблица за два года не приводится, так как ее легко можно получить, суммируя данные, помещенные в таблице за дневные и за ночные часы.

Но, как уже отмечалось выше, эти данные еще не дают полного представления о повторяемости ливней и гроз над тем или иным участком местности, так как наблюдения за очагами ливней и гроз с помощью радиолокационной станции носят избирательный характер. Поэтому вычислить абсолютные значения повторяемости ливней и гроз над отдельными участками не представляется возможным. Однако все же можно приблизительно выявить относительную повторяемость ливней и гроз. Относительная повторяемость вычислялась указанным выше методом.

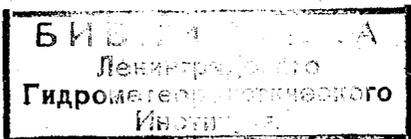
В результате получены карты относительной повторяемости ливней и гроз за 1958, 1959 гг. по данным станции штормоповещения Воейково.

Сначала проанализируем карты за дневные часы для 1958, 1959 гг. и сводную карту за два года (рис. 1—3).

На картах видно, что большая часть территории северо-западной и северо-восточной частей области находится в зоне пониженной грозовой деятельности. Это объясняется прежде всего тем, что этот район включает в себя Финский залив, Карельский перешеек и Ладожское озеро. На севере Карельский перешеек начинается Вуоксинской низиной. К югу Вуоксинская низина сменяется центральной частью Карельского перешейка. Еще южнее располагается сильно заболоченная Приневская низина. Вдоль побережья Выборгского залива простирается Выборгская равнина. И Вуоксинская низина и Выборгская равнина изобилуют озерами. Районы побережья Ладожского озера расположены в обширной озерной впадине и сильно заболочены.

Из всего сказанного следует, что почти весь район занят водной поверхностью и заболоченной низменностью. Воздух же над водной поверхностью днем несколько холоднее, чем над сушей. Это приводит к тому, что в дневные часы над водоемами конвекция и развитие ливней и гроз затруднены.

Обширный по площади максимум относительной повторяемости ливней и гроз занимает почти весь юго-восточный сектор, часть юго-западного сектора и незначительную часть северо-восточного сектора. На северо-востоке сюда входит преимущественно западный склон северной части Валдайской возвышенности. На южном участке располагаются Бокситогорская и Соминская равнины с высотами, не превышающими 150 м. Между Невской и Ладожской впадинами с запада на восток простирается Гатчинско-Мгинская равнина. В юго-запад области входят части Западно-Ленинградской возвышенной равнины: Лужская равнина,



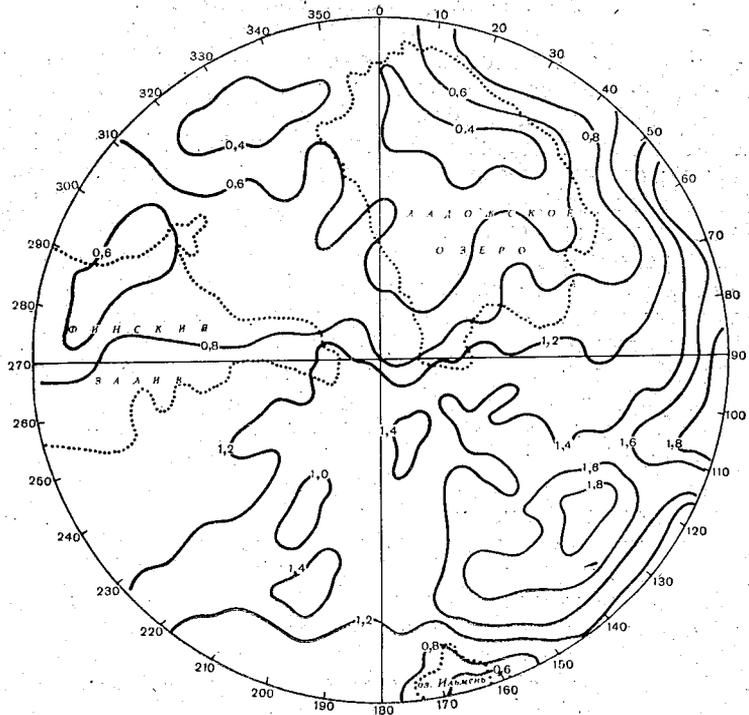


Рис. 1. Относительная повторяемость ливней и гроз в дневные часы 1958 г.

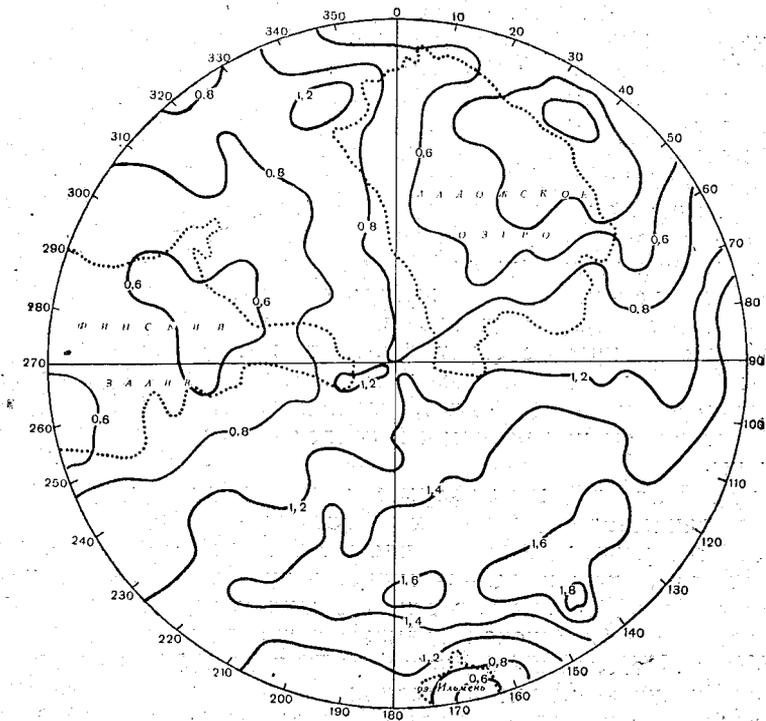


Рис. 2. Относительная повторяемость ливней и гроз в дневные часы 1959 г.

часть Плюсской равнины, а также Оредежско-Лужская равнина. Сюда же входит и Ижорская возвышенность.

Значительный по величине максимум грозовой деятельности (до 180% и более по сравнению со средней повторяемостью над другими районами того же кольца) наблюдается в районе Бокситогорска и Тихвинской гряды.

Существование всего максимума в целом может быть объяснено влиянием орографических условий. Уже сравнительно небольшие возвышенности отличаются повышенной грозовой деятельностью по сравнению

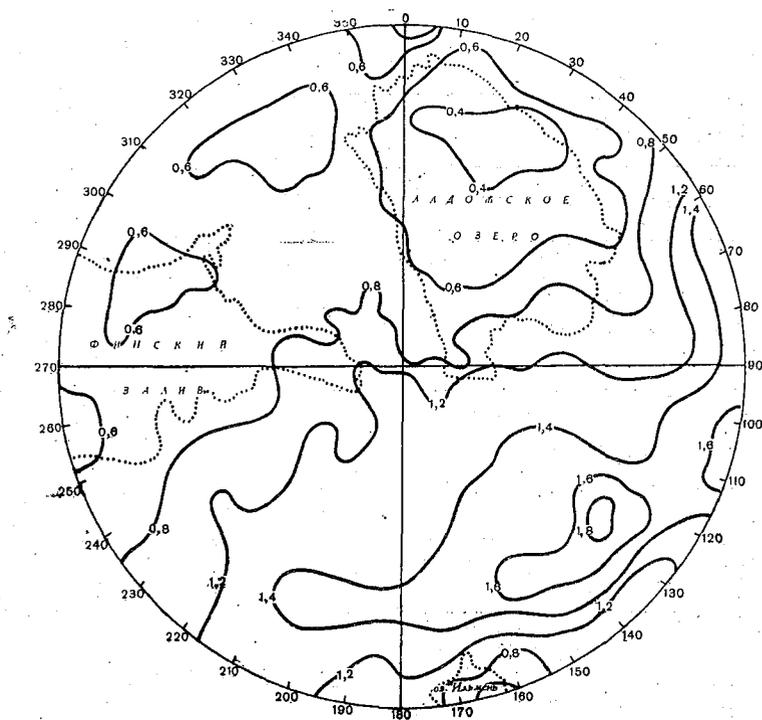


Рис. 3. Относительная повторяемость ливней и гроз в дневные часы 1958—1959 гг.

с равнинной местностью, что в основном обусловлено усилением динамической турбулентности, связанной с изрезанностью рельефа. Вынужденный подъем нагретого воздуха по склону даже небольшой возвышенности может происходить с весьма значительными скоростями и создавать дополнительный импульс к возникновению мощных конвективных движений, что приводит к образованию мощной кучево-дождевой облачности, дающей кратковременные ливневые дожди и грозы в этих районах.

На юге, в районе оз. Ильмень, наблюдается минимум грозовой деятельности. Это опять-таки можно объяснить меньшим прогревом воздуха над водной поверхностью и нисходящими движениями его над низменными берегами.

При сопоставлении карт относительной повторяемости ливней и гроз за дневные сроки друг с другом видно, что они все же различаются между собой. Это вполне понятно, ибо рельеф местности оказывает самое большое, но не единственное влияние на развитие грозовой деятельности. Орографические условия оказывают влияние главным образом

Истинное число случаев ограждений от очагов лихней и гроз

Таблица 1

| № сектора | № колыда |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |
|-----------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|           | 1        | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  |
| 1         | 40       | 41   | 48   | 61   | 56   | 50   | 46   | 46   | 51   | 45   | 42   | 32   | 19   | 16   | 11  | 7   | 7   | 4   | 3   | 1   |
| 2         | 35       | 37   | 49   | 58   | 53   | 47   | 44   | 44   | 49   | 43   | 36   | 32   | 21   | 16   | 11  | 9   | 9   | 7   | 3   | 2   |
| 3         | 35       | 37   | 46   | 54   | 49   | 44   | 43   | 43   | 43   | 43   | 37   | 29   | 17   | 15   | 11  | 8   | 8   | 4   | 3   | 5   |
| 4         | 37       | 37   | 46   | 51   | 51   | 50   | 43   | 45   | 46   | 45   | 41   | 34   | 18   | 18   | 12  | 7   | 9   | 4   | 4   | 5   |
| 5         | 38       | 38   | 47   | 52   | 54   | 54   | 53   | 50   | 52   | 50   | 44   | 44   | 22   | 21   | 17  | 11  | 12  | 6   | 4   | 2   |
| 6         | 38       | 37   | 47   | 53   | 65   | 63   | 62   | 61   | 60   | 62   | 55   | 44   | 31   | 25   | 25  | 15  | 14  | 9   | 4   | 2   |
| 7         | 41       | 45   | 53   | 65   | 72   | 77   | 70   | 72   | 68   | 76   | 63   | 44   | 29   | 26   | 21  | 15  | 15  | 10  | 5   | 2   |
| 8         | 39       | 47   | 59   | 71   | 85   | 84   | 81   | 77   | 79   | 76   | 63   | 53   | 35   | 34   | 27  | 16  | 15  | 12  | 4   | 2   |
| 9         | 39       | 46   | 65   | 74   | 88   | 92   | 89   | 82   | 82   | 76   | 69   | 56   | 38   | 36   | 33  | 19  | 15  | 10  | 6   | 3   |
| 10        | 41       | 56   | 71   | 82   | 100  | 94   | 96   | 89   | 85   | 82   | 71   | 57   | 39   | 37   | 33  | 24  | 16  | 10  | 6   | 3   |
| 11        | 42       | 57   | 73   | 92   | 98   | 95   | 101  | 97   | 89   | 85   | 75   | 62   | 45   | 40   | 38  | 26  | 19  | 14  | 6   | 3   |
| 12        | 47       | 62   | 77   | 90   | 107  | 103  | 105  | 96   | 95   | 94   | 82   | 65   | 51   | 47   | 42  | 25  | 18  | 14  | 5   | 2   |
| 13        | 50       | 65   | 85   | 90   | 109  | 109  | 106  | 110  | 98   | 93   | 85   | 67   | 55   | 52   | 51  | 30  | 20  | 14  | 4   | 2   |
| 14        | 51       | 64   | 82   | 89   | 105  | 102  | 103  | 98   | 90   | 89   | 79   | 65   | 53   | 47   | 42  | 30  | 19  | 13  | 3   | 2   |
| 15        | 53       | 69   | 87   | 93   | 114  | 103  | 102  | 97   | 98   | 93   | 82   | 69   | 51   | 49   | 43  | 28  | 17  | 12  | 4   | 1   |
| 16        | 50       | 70   | 83   | 87   | 111  | 96   | 95   | 93   | 96   | 96   | 83   | 71   | 52   | 52   | 41  | 25  | 18  | 10  | 2   | 1   |
| 17        | 56       | 74   | 92   | 97   | 118  | 100  | 100  | 96   | 93   | 88   | 76   | 65   | 47   | 45   | 39  | 23  | 13  | 10  | 2   | 1   |
| 18        | 56       | 77   | 97   | 95   | 110  | 97   | 97   | 92   | 84   | 78   | 71   | 60   | 46   | 46   | 39  | 22  | 12  | 8   | 2   | 1   |
| 19        | 57       | 74   | 73   | 96   | 104  | 94   | 92   | 86   | 85   | 76   | 70   | 59   | 45   | 44   | 37  | 22  | 12  | 8   | 3   | 1   |
| 20        | 57       | 73   | 81   | 90   | 101  | 93   | 93   | 87   | 82   | 78   | 71   | 59   | 46   | 44   | 37  | 22  | 12  | 10  | 3   | 1   |
| 21        | 57       | 74   | 88   | 89   | 99   | 93   | 89   | 84   | 79   | 73   | 66   | 57   | 43   | 42   | 36  | 22  | 12  | 8   | 2   | 1   |
| 22        | 57       | 75   | 85   | 83   | 96   | 94   | 90   | 84   | 80   | 80   | 67   | 56   | 41   | 42   | 34  | 21  | 11  | 9   | 2   | 1   |
| 23        | 58       | 77   | 84   | 83   | 96   | 94   | 93   | 85   | 78   | 75   | 64   | 54   | 37   | 38   | 33  | 19  | 13  | 9   | 2   | 1   |
| 24        | 61       | 75   | 86   | 84   | 95   | 91   | 94   | 84   | 75   | 71   | 63   | 52   | 37   | 35   | 29  | 20  | 11  | 8   | 2   | 1   |
| 25        | 60       | 76   | 80   | 80   | 88   | 88   | 88   | 82   | 72   | 72   | 61   | 50   | 33   | 34   | 28  | 18  | 11  | 10  | 2   | 1   |
| 26        | 60       | 75   | 84   | 78   | 88   | 88   | 85   | 80   | 70   | 69   | 57   | 47   | 33   | 31   | 25  | 18  | 11  | 8   | 2   | 1   |
| 27        | 57       | 75   | 88   | 83   | 91   | 85   | 82   | 75   | 69   | 65   | 55   | 47   | 34   | 32   | 27  | 19  | 12  | 8   | 2   | 1   |
| 28        | 56       | 71   | 87   | 85   | 83   | 83   | 84   | 75   | 65   | 64   | 55   | 48   | 35   | 30   | 26  | 16  | 10  | 5   | 2   | 1   |
| 29        | 54       | 71   | 82   | 86   | 87   | 82   | 80   | 70   | 62   | 61   | 50   | 42   | 28   | 27   | 20  | 12  | 7   | 3   | 1   | 1   |
| 30        | 51       | 64   | 76   | 75   | 75   | 72   | 68   | 65   | 62   | 60   | 49   | 41   | 29   | 25   | 19  | 11  | 8   | 4   | 4   | 1   |
| 31        | 44       | 58   | 71   | 70   | 72   | 66   | 64   | 61   | 64   | 59   | 49   | 45   | 29   | 26   | 19  | 13  | 10  | 4   | 4   | 1   |
| 32        | 47       | 62   | 73   | 69   | 73   | 68   | 64   | 59   | 64   | 58   | 49   | 45   | 30   | 25   | 19  | 11  | 7   | 5   | 2   | 1   |
| 33        | 44       | 58   | 71   | 65   | 70   | 65   | 64   | 59   | 62   | 57   | 48   | 41   | 27   | 25   | 19  | 10  | 5   | 4   | 2   | 1   |
| 34        | 43       | 60   | 66   | 60   | 64   | 58   | 55   | 52   | 55   | 50   | 42   | 32   | 22   | 18   | 13  | 7   | 5   | 3   | 2   | 1   |
| 35        | 40       | 47   | 62   | 60   | 62   | 58   | 57   | 52   | 57   | 49   | 46   | 37   | 25   | 21   | 14  | 8   | 6   | 4   | 2   | 1   |
| 36        | 40       | 45   | 59   | 64   | 59   | 54   | 54   | 49   | 52   | 47   | 42   | 34   | 21   | 18   | 15  | 10  | 8   | 4   | 1   | 1   |
| Сумма     | 1731     | 2163 | 2609 | 2765 | 3063 | 2883 | 2842 | 2658 | 2591 | 2469 | 2147 | 1788 | 1264 | 1179 | 988 | 619 | 423 | 302 | 114 | 57  |
| Среднее   | 48       | 60   | 73   | 77   | 85   | 80   | 79   | 74   | 72   | 69   | 60   | 50   | 35   | 33   | 27  | 17  | 12  | 8   | 3   | 1,6 |

День 1958 г.

|         |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |
|---------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1       | 24  | 26   | 28   | 33   | 36   | 37   | 37   | 36   | 40   | 32   | 30   | 25   | 27   | 23  | 16  | 13  | 11  | 9   | 4   |
| 2       | 23  | 24   | 26   | 32   | 35   | 35   | 35   | 35   | 39   | 30   | 28   | 24   | 28   | 28  | 15  | 12  | 12  | 12  | 4   |
| 3       | 23  | 24   | 26   | 33   | 36   | 37   | 37   | 36   | 41   | 33   | 31   | 27   | 33   | 33  | 16  | 14  | 14  | 12  | 4   |
| 4       | 23  | 24   | 26   | 32   | 37   | 37   | 37   | 37   | 39   | 33   | 31   | 27   | 30   | 30  | 17  | 13  | 10  | 7   | 3   |
| 5       | 23  | 25   | 26   | 35   | 40   | 42   | 42   | 42   | 44   | 38   | 36   | 31   | 31   | 31  | 22  | 16  | 11  | 8   | 3   |
| 6       | 23  | 26   | 26   | 36   | 41   | 42   | 43   | 45   | 50   | 46   | 42   | 35   | 36   | 36  | 19  | 16  | 11  | 7   | 4   |
| 7       | 27  | 30   | 30   | 41   | 43   | 43   | 43   | 45   | 53   | 47   | 45   | 40   | 40   | 40  | 19  | 10  | 9   | 6   | 3   |
| 8       | 25  | 28   | 28   | 40   | 40   | 41   | 41   | 42   | 53   | 47   | 45   | 35   | 33   | 33  | 18  | 10  | 9   | 5   | 2   |
| 9       | 24  | 26   | 26   | 38   | 40   | 38   | 38   | 40   | 47   | 45   | 40   | 36   | 36   | 36  | 18  | 10  | 9   | 5   | 1   |
| 10      | 24  | 26   | 28   | 38   | 41   | 39   | 39   | 41   | 42   | 40   | 38   | 34   | 33   | 33  | 18  | 11  | 8   | 6   | 3   |
| 11      | 23  | 27   | 28   | 37   | 38   | 40   | 40   | 39   | 41   | 38   | 36   | 32   | 33   | 33  | 19  | 10  | 7   | 6   | 2   |
| 12      | 24  | 30   | 31   | 42   | 43   | 44   | 44   | 43   | 50   | 46   | 46   | 35   | 35   | 35  | 23  | 13  | 10  | 5   | 2   |
| 13      | 23  | 28   | 29   | 40   | 42   | 42   | 42   | 44   | 44   | 42   | 42   | 32   | 31   | 31  | 23  | 16  | 13  | 6   | 3   |
| 14      | 25  | 29   | 31   | 44   | 45   | 42   | 42   | 45   | 46   | 46   | 36   | 30   | 29   | 29  | 21  | 15  | 12  | 7   | 3   |
| 15      | 24  | 31   | 34   | 45   | 46   | 43   | 43   | 44   | 44   | 41   | 39   | 34   | 29   | 27  | 23  | 14  | 11  | 7   | 2   |
| 16      | 27  | 33   | 35   | 46   | 47   | 43   | 43   | 46   | 44   | 40   | 39   | 32   | 29   | 29  | 21  | 11  | 9   | 6   | 1   |
| 17      | 27  | 33   | 35   | 43   | 41   | 40   | 40   | 41   | 42   | 38   | 36   | 29   | 29   | 29  | 22  | 12  | 9   | 6   | 1   |
| 18      | 27  | 32   | 35   | 41   | 39   | 38   | 38   | 41   | 40   | 34   | 31   | 25   | 23   | 23  | 16  | 5   | 5   | 3   | 1   |
| 19      | 23  | 28   | 29   | 36   | 36   | 32   | 32   | 35   | 32   | 29   | 29   | 25   | 21   | 21  | 16  | 5   | 4   | 3   | 1   |
| 20      | 21  | 27   | 28   | 37   | 37   | 34   | 34   | 36   | 32   | 29   | 29   | 26   | 26   | 26  | 16  | 4   | 4   | 4   | 1   |
| 21      | 23  | 28   | 28   | 33   | 34   | 31   | 31   | 31   | 29   | 27   | 28   | 24   | 22   | 22  | 18  | 8   | 8   | 4   | 2   |
| 22      | 23  | 29   | 30   | 34   | 35   | 30   | 30   | 31   | 30   | 29   | 27   | 26   | 23   | 23  | 16  | 8   | 5   | 4   | 2   |
| 23      | 23  | 29   | 30   | 35   | 36   | 31   | 31   | 33   | 30   | 28   | 26   | 22   | 20   | 20  | 14  | 6   | 4   | 4   | 2   |
| 24      | 23  | 23   | 30   | 33   | 35   | 31   | 31   | 31   | 29   | 26   | 25   | 22   | 20   | 20  | 13  | 5   | 4   | 3   | 2   |
| 25      | 24  | 23   | 30   | 33   | 35   | 32   | 32   | 33   | 34   | 31   | 31   | 26   | 24   | 24  | 15  | 9   | 8   | 7   | 6   |
| 26      | 24  | 23   | 32   | 34   | 36   | 31   | 31   | 33   | 35   | 32   | 30   | 25   | 27   | 27  | 16  | 10  | 9   | 8   | 6   |
| 27      | 26  | 35   | 36   | 39   | 42   | 37   | 37   | 38   | 40   | 37   | 35   | 33   | 28   | 29  | 22  | 13  | 12  | 7   | 6   |
| 28      | 30  | 40   | 40   | 41   | 45   | 41   | 41   | 42   | 49   | 41   | 37   | 39   | 29   | 29  | 26  | 17  | 16  | 14  | 6   |
| 29      | 30  | 38   | 39   | 45   | 48   | 43   | 43   | 43   | 49   | 41   | 39   | 35   | 31   | 31  | 26  | 15  | 15  | 15  | 7   |
| 30      | 26  | 33   | 34   | 38   | 43   | 38   | 38   | 40   | 50   | 39   | 38   | 35   | 32   | 32  | 26  | 14  | 14  | 14  | 6   |
| 31      | 25  | 35   | 35   | 40   | 45   | 42   | 42   | 44   | 49   | 43   | 41   | 38   | 35   | 35  | 26  | 12  | 11  | 11  | 6   |
| 32      | 27  | 32   | 33   | 38   | 44   | 42   | 42   | 44   | 52   | 42   | 40   | 33   | 33   | 33  | 26  | 12  | 12  | 11  | 6   |
| 33      | 24  | 30   | 30   | 35   | 39   | 38   | 38   | 40   | 53   | 40   | 38   | 34   | 34   | 34  | 24  | 10  | 10  | 8   | 4   |
| 34      | 23  | 28   | 28   | 34   | 37   | 44   | 44   | 37   | 44   | 36   | 36   | 32   | 30   | 30  | 24  | 10  | 10  | 8   | 4   |
| 35      | 21  | 26   | 27   | 34   | 35   | 34   | 34   | 35   | 37   | 29   | 29   | 27   | 24   | 24  | 15  | 9   | 9   | 7   | 2   |
| 36      | 22  | 26   | 27   | 33   | 34   | 34   | 34   | 36   | 38   | 33   | 32   | 28   | 25   | 25  | 17  | 11  | 10  | 8   | 3   |
| Сумма   | 877 | 1085 | 1084 | 1348 | 1419 | 1359 | 1359 | 1400 | 1505 | 1322 | 1242 | 1087 | 1045 | 887 | 702 | 409 | 351 | 274 | 121 |
| Среднее | 24  | 29   | 30   | 37   | 39   | 38   | 38   | 39   | 42   | 37   | 35   | 30   | 29   | 25  | 20  | 11  | 10  | 8   | 3   |

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

6 0,2

| № сектора | № кольца |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |    |    |
|-----------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|
|           | 1        | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19 | 20 |
| 1         | 93       | 97   | 93   | 102  | 83   | 75   | 62   | 50   | 33   | 26   | 22   | 19   | 13  | 13  | 11  | 10  | 6   | 6   | 2  | 1  |
| 2         | 94       | 96   | 91   | 102  | 83   | 77   | 62   | 49   | 31   | 21   | 22   | 18   | 12  | 11  | 9   | 8   | 4   | 4   | 1  | 1  |
| 3         | 89       | 95   | 95   | 98   | 84   | 77   | 61   | 49   | 31   | 22   | 22   | 17   | 11  | 10  | 8   | 7   | 3   | 3   | 2  | 1  |
| 4         | 98       | 98   | 96   | 98   | 82   | 78   | 60   | 47   | 37   | 21   | 20   | 16   | 12  | 10  | 7   | 7   | 3   | 3   | 1  | 1  |
| 5         | 97       | 99   | 97   | 100  | 81   | 73   | 56   | 44   | 34   | 23   | 20   | 16   | 11  | 10  | 8   | 8   | 3   | 3   | 1  | 1  |
| 6         | 99       | 104  | 97   | 95   | 82   | 80   | 60   | 50   | 37   | 30   | 25   | 21   | 15  | 13  | 7   | 7   | 3   | 3   | 1  | 1  |
| 7         | 107      | 113  | 104  | 107  | 96   | 92   | 74   | 61   | 46   | 37   | 33   | 29   | 18  | 15  | 11  | 11  | 6   | 6   | 4  | 4  |
| 8         | 109      | 118  | 109  | 111  | 99   | 94   | 78   | 65   | 49   | 40   | 34   | 31   | 22  | 18  | 14  | 14  | 7   | 7   | 3  | 3  |
| 9         | 108      | 116  | 116  | 94   | 101  | 96   | 84   | 72   | 55   | 46   | 44   | 34   | 24  | 23  | 17  | 8   | 8   | 4   | 4  | 4  |
| 10        | 115      | 126  | 119  | 114  | 108  | 108  | 96   | 85   | 63   | 56   | 44   | 39   | 26  | 25  | 22  | 17  | 8   | 8   | 3  | 3  |
| 11        | 116      | 128  | 118  | 115  | 112  | 107  | 98   | 86   | 68   | 57   | 45   | 45   | 29  | 28  | 21  | 19  | 8   | 8   | 5  | 5  |
| 12        | 120      | 127  | 122  | 118  | 112  | 107  | 100  | 86   | 73   | 61   | 50   | 46   | 30  | 29  | 25  | 21  | 10  | 10  | 4  | 4  |
| 13        | 117      | 125  | 126  | 122  | 109  | 109  | 99   | 86   | 72   | 63   | 50   | 47   | 30  | 33  | 28  | 24  | 10  | 10  | 5  | 5  |
| 14        | 116      | 124  | 122  | 119  | 113  | 106  | 99   | 85   | 77   | 57   | 52   | 48   | 30  | 30  | 30  | 24  | 10  | 10  | 4  | 4  |
| 15        | 120      | 130  | 130  | 123  | 111  | 107  | 101  | 84   | 71   | 59   | 54   | 45   | 31  | 31  | 29  | 24  | 13  | 10  | 3  | 3  |
| 16        | 127      | 136  | 129  | 122  | 118  | 112  | 101  | 81   | 73   | 58   | 53   | 46   | 33  | 31  | 29  | 24  | 13  | 10  | 4  | 4  |
| 17        | 126      | 136  | 131  | 126  | 110  | 103  | 98   | 93   | 71   | 58   | 53   | 44   | 32  | 29  | 26  | 23  | 12  | 9   | 3  | 2  |
| 18        | 126      | 130  | 122  | 126  | 114  | 104  | 95   | 87   | 69   | 56   | 51   | 43   | 31  | 32  | 27  | 22  | 13  | 10  | 5  | 3  |
| 19        | 124      | 125  | 125  | 118  | 111  | 102  | 96   | 83   | 66   | 54   | 51   | 46   | 30  | 30  | 24  | 23  | 12  | 10  | 3  | 3  |
| 20        | 123      | 128  | 121  | 115  | 105  | 99   | 92   | 82   | 62   | 52   | 44   | 42   | 29  | 29  | 26  | 22  | 11  | 8   | 4  | 2  |
| 21        | 120      | 127  | 131  | 121  | 108  | 98   | 92   | 82   | 61   | 54   | 46   | 38   | 32  | 31  | 27  | 24  | 9   | 9   | 4  | 2  |
| 22        | 126      | 121  | 133  | 120  | 109  | 100  | 89   | 84   | 51   | 45   | 40   | 39   | 28  | 26  | 23  | 20  | 9   | 8   | 5  | 4  |
| 23        | 124      | 124  | 126  | 120  | 103  | 100  | 88   | 73   | 56   | 45   | 40   | 39   | 29  | 26  | 23  | 20  | 9   | 8   | 4  | 4  |
| 24        | 125      | 126  | 124  | 119  | 103  | 92   | 81   | 71   | 50   | 42   | 35   | 33   | 26  | 26  | 21  | 16  | 7   | 6   | 4  | 2  |
| 25        | 124      | 123  | 124  | 118  | 97   | 86   | 75   | 64   | 46   | 36   | 33   | 32   | 24  | 19  | 17  | 14  | 6   | 6   | 2  | 2  |
| 26        | 120      | 128  | 121  | 114  | 88   | 82   | 69   | 59   | 40   | 32   | 25   | 26   | 17  | 16  | 13  | 12  | 6   | 6   | 2  | 2  |
| 27        | 115      | 124  | 123  | 115  | 89   | 83   | 68   | 55   | 38   | 31   | 25   | 24   | 18  | 16  | 14  | 12  | 6   | 6   | 4  | 2  |
| 28        | 117      | 119  | 119  | 109  | 88   | 81   | 67   | 54   | 39   | 30   | 26   | 25   | 20  | 16  | 14  | 13  | 6   | 6   | 2  | 2  |
| 29        | 114      | 118  | 113  | 103  | 93   | 87   | 70   | 57   | 40   | 29   | 25   | 24   | 18  | 16  | 14  | 11  | 6   | 6   | 3  | 2  |
| 30        | 105      | 116  | 107  | 103  | 91   | 85   | 69   | 57   | 39   | 29   | 24   | 24   | 17  | 13  | 12  | 11  | 6   | 6   | 3  | 3  |
| 31        | 113      | 120  | 117  | 106  | 95   | 91   | 72   | 57   | 42   | 31   | 25   | 25   | 15  | 16  | 15  | 12  | 7   | 7   | 4  | 4  |
| 32        | 108      | 115  | 115  | 106  | 90   | 84   | 73   | 57   | 39   | 31   | 26   | 25   | 19  | 15  | 17  | 13  | 7   | 7   | 3  | 3  |
| 33        | 103      | 118  | 114  | 108  | 94   | 92   | 73   | 63   | 43   | 33   | 25   | 26   | 18  | 16  | 15  | 14  | 8   | 8   | 4  | 2  |
| 34        | 102      | 110  | 107  | 106  | 96   | 91   | 80   | 64   | 44   | 33   | 30   | 30   | 21  | 20  | 17  | 16  | 9   | 9   | 4  | 3  |
| 35        | 105      | 116  | 102  | 107  | 95   | 92   | 75   | 59   | 43   | 34   | 31   | 28   | 20  | 18  | 18  | 16  | 8   | 8   | 2  | 1  |
| 36        | 97       | 109  | 113  | 99   | 90   | 81   | 69   | 58   | 36   | 29   | 27   | 23   | 17  | 17  | 15  | 15  | 9   | 9   | 3  | 1  |
| Сумма     | 4042     | 4261 | 4152 | 3999 | 3543 | 3336 | 2882 | 2439 | 1826 | 1469 | 1279 | 1153 | 808 | 755 | 657 | 568 | 266 | 129 | 99 | 3  |
| Среднее   | 112      | 118  | 115  | 111  | 99   | 93   | 80   | 68   | 51   | 41   | 36   | 32   | 22  | 21  | 18  | 16  | 7   | 4   | 4  | 3  |



на развитие внутримассовых ливней и гроз. Летом довольно часто наблюдаются грозы, связанные с атмосферными фронтами. На холодном фронте грозы возникают в связи с бурным вытеснением теплого воздуха вверх наступающим валом холодного воздуха. На теплом фронте грозы возникают вследствие того, что неустойчивость стратификации теплого воздуха возрастает при его подъеме над фронтальной поверхностью и в нем развивается интенсивная конвекция.

Синоптические условия оказывают влияние на возникновение и развитие не только фронтальных, но и внутримассовых ливней и гроз. Под-

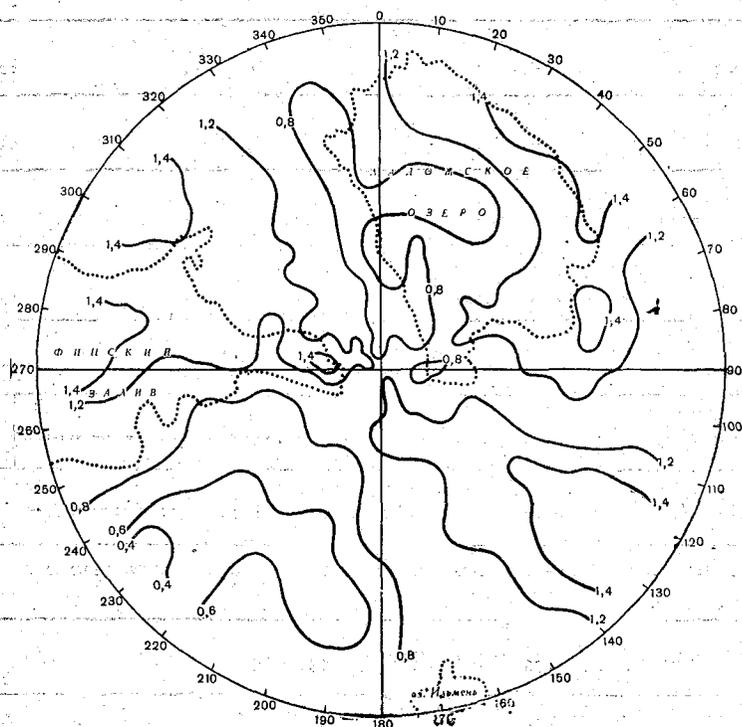


Рис. 4. Относительная повторяемость ливней и гроз в ночные часы 1958 г.

робное описание влияния различных синоптических положений на образование внутримассовых конвективных осадков дано в работе В. М. Черкасской [4].

В данной статье подробного разбора влияния синоптической обстановки на развитие ливней и гроз не производилось. Было подсчитано только число случаев с грозой или ливнем за каждый год отдельно. В 1958 г. зарегистрировано 720 случаев, а в 1959 г. — 563 случая, когда наблюдались отражения радиозо от очагов ливней и гроз. В 1959 г. были также подсчитаны числа дней с грозой или ливнем за дневные и ночные часы, причем отдельно для фронтальных и внутримассовых ливней и гроз.

Фронтальные грозы и ливни за дневные сроки наблюдались 57 дней; внутримассовые — 28 дней. Таким образом, по числу случаев наблюдавшихся отражений видно, что активность ливней и гроз в различные годы неодинакова. Несовпадение карт относительной повторяемости ливней и гроз за дневные часы и объясняется влиянием синоптических условий на возникновение и развитие грозовой деятельности.

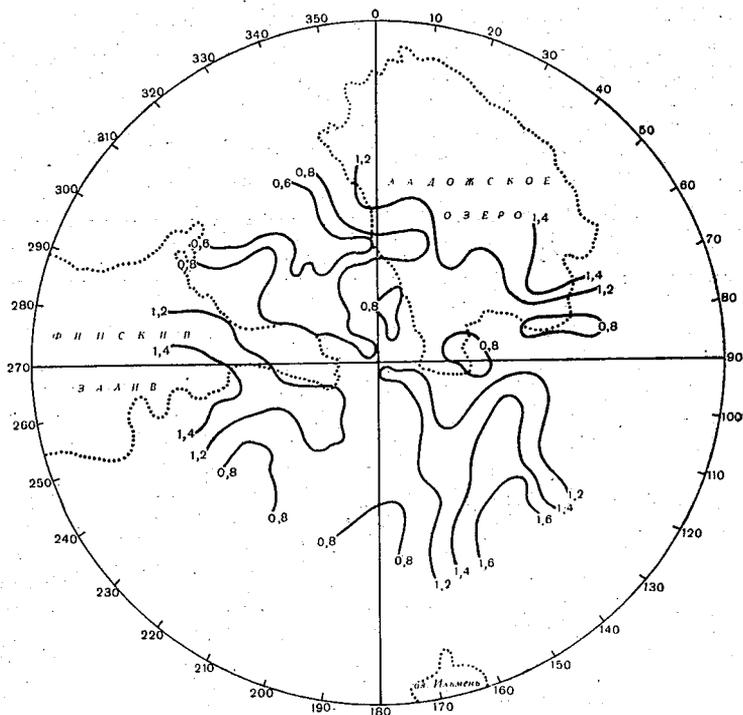


Рис. 5. Относительная повторяемость ливней и гроз в ночные часы 1959 г.

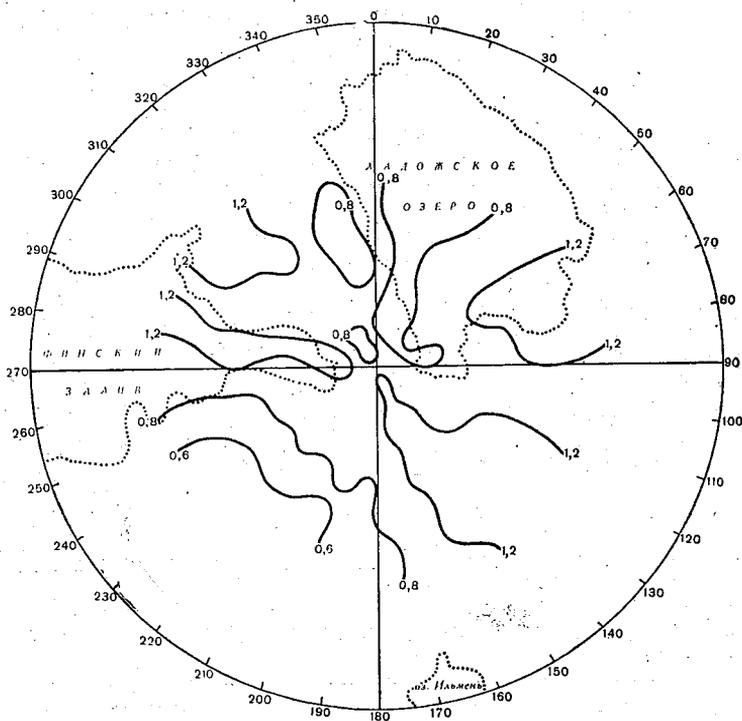


Рис. 6. Относительная повторяемость ливней и гроз в ночные часы 1958—1959 гг.

Перейдем к рассмотрению карт относительной повторяемости ливней и гроз за вечерние и ночные сроки (рис. 4—6). Здесь наиболее полными являются наблюдения за 1958 г. За 1959 г. использовались только данные наблюдений в радиусе до 110 км. Остальные данные в обработку не принимались из-за малого числа случаев наблюдений.

Рассмотрим карту относительной повторяемости за 1958 г. (рис. 4). Минимумы над Ладожским озером и Финским заливом исчезают и сменяются незначительными максимумами (до 120%, а в некоторых участках до 140% и более). Пониженные значения относительной повторяемости сохраняются над центральной частью Карельского перешейка. Возрастание относительной повторяемости ливней и гроз над водной поверхностью объясняется большой тепловой инерцией водоемов. Ввиду этого воздух над ними оказывается теплее, чем над окружающими районами, что при наличии неустойчивой стратификации дает дополнительный импульс к образованию восходящих движений и развитию ночных ливней и гроз над водной поверхностью.

В юго-восточном секторе максимум повторяемости ливней и гроз сохраняется. Это, по-видимому, можно объяснить двумя причинами. Во-первых, в вечерние часы подстилающая поверхность еще не остыла, и, следовательно, еще существуют восходящие движения, которые могут при неустойчивой стратификации в атмосфере создать дополнительные импульсы к образованию весьма мощных облаков вертикального развития, что приводит к увеличению ливней и гроз. Во-вторых, сильная пересеченность рельефа местности создает благоприятные условия для усиления динамической турбулентности не только в дневные часы, но и ночью.

Вместо дневного максимума ночью над значительной частью юго-западного сектора образуется довольно глубокий минимум относительной повторяемости ливней и гроз. Этот минимум, вероятно, связан с нисходящими движениями, компенсирующими подъем воздуха над соседними районами, где имеются для восходящих движений наиболее благоприятные условия.

На рис. 5 и 6 дана относительная повторяемость ливней и гроз в вечерние и ночные часы за 1959 г. и за 1958—1959 гг. Основные центры повышенной и пониженной относительной повторяемости сохраняются и здесь, но с незначительными отклонениями. Это различие можно объяснить теми же причинами, что и в дневные часы, т. е. влиянием на развитие грозовой деятельности не только орографических, но и синоптических условий.

В заключение следует отметить, что полученные карты относительной повторяемости ливней и гроз являются предварительными. Количество рассмотренного материала еще недостаточно. На основании такого короткого ряда наблюдений вряд ли целесообразно делать какие-либо выводы. Дальнейшие радиолокационные исследования дадут возможность выявить весь комплекс закономерностей грозового режима рассматриваемого района.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Архипова Е. П. Карты географического распределения числа дней с грозой на территории СССР. Труды ГГО, вып. 74, 1957.
2. Архипова Е. П. Карты географического распределения среднего числа дней с грозой на территории освоения целинных и залежных земель. Известия ВГО, вып. 2, т. 88, 1956.
3. Федорова А. А. О влиянии рельефа на повторяемость ливневых очагов по данным радиолокационной станции. Труды ЦАО, вып. 17, 1956.
4. Черкасская В. М. Особенности возникновения и развития внутримассовых конвективных осадков при различных синоптических положениях. Труды ЦИП, вып. 31, 1954.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРОЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ЛИВНЕЙ

В статье излагается метод определения радиолокационной характеристики грозового состояния ливней для оперативной работы радиолокационной станции штормоповещения. Приведены таблицы критических значений угла места антенны для стандартных параметров радиолокатора и дан способ их составления для радиолокаторов с другими параметрами.

Радиолокационная характеристика  $M$  грозового состояния ливней дается по трехбалльной системе: 1 — ливни, 2 — грозы, 3 — сильные грозы.

Критериями для радиолокационного разделения ливней и гроз нами выбрана высота изотермы  $-22,4^\circ$  и высота тропопаузы. Выбор таких критериев произведен в результате статистической обработки многолетних радиолокационных данных, полученных в Воейково [1]. Они составлены с учетом особенностей микрофизической структуры ливней и гроз и температурной стратификации атмосферы, вследствие чего могут быть применены в различное время года и до некоторой степени в различных физико-географических районах.

Указанная нами градация грозового состояния ливней, по существу, является градацией вертикальной мощности их развития, а именно: 1 — ливни, вертикальная мощность которых не превышает высоты изотермы  $-22,4^\circ$ ; 2 — ливни, вертикальная мощность которых изменяется от высоты изотермы  $-22,4^\circ$  до высоты тропопаузы; 3 — ливни, вертикальная мощность которых достигает высоты тропопаузы. При этом вертикальная мощность ливня измеряется до той части его вершины, где радиолокационная отражаемость имеет значение  $3-44 \text{ мм}^6/\text{м}^3$ , соответствующее интенсивности осадков  $I=1 \text{ мм/час}$  или водности  $W=0,07 \text{ г/м}^3$ .

Для оперативной работы РЛС штормоповещения большое значение имеет сама методика радиолокационного разделения ливней и гроз. Она должна обеспечить быстроту и надежность такого разделения. Предлагаемая нами методика радиолокационного разделения ливней и гроз, по существу, сводится к определению такого критического значения угла места антенны, при котором вопрос о градации грозового состояния наблюдаемого очага решается его обнаруживаемостью, а именно, если при данном значении критического угла места антенны очаг обнаруживается, то, следовательно, это гроза, а если не обнаруживается, — то ливень. Практика двухлетних радиолокационных наблюдений в Воейково показала, что данный метод прост и удобен. Для использования этого метода необходимо заранее составить таблицу критических значений угла места антенны. Так как критические значения угла места зависят от параметров радиолокатора, то такую таблицу придется составлять

на месте. Поэтому мы опишем способ составления таблицы и в качестве примера приведем таблицу, составленную из расчета стандартных значений параметров радиолокатора.

### Составление таблицы критических значений угла места $\beta$ антенны

Максимальная дальность горизонта для сферической земли с учетом нормальной рефракции равна

$$R = 130 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \text{ км,}$$

где  $h_1$  — высота угла в километрах, а  $h_2$  — высота антенны в километрах.

Если обозначить через  $h$  высоту луча над уровнем антенны, то при угле возвышения, равном нулю, будем иметь  $R = 130 \sqrt{h}$ , откуда  $h = 5,95 \cdot 10^{-5} R^2$ .

При углах места  $\beta$  будем иметь

$$H = R \sin \beta + h = R \sin \beta + 5,95 \cdot 10^{-5} R^2, \quad (1)$$

где  $H$  — высота над уровнем антенны.

При измерении вертикальной мощности очагов ливней и гроз радиолокационным методом необходимо, как это указано нами в [1], вводить поправку на высоту

$$\Delta H = \frac{2}{\gamma} \lg \frac{R}{R_0}. \quad (2)$$

В той же работе нами показано, что при разделении ливней и гроз необходимо вводить двойное значение поправки для ливней, т. е.

$$2\Delta H_{\text{л}} = \frac{4}{\gamma} \lg \frac{R}{R_0}, \quad (3)$$

где

$$\gamma = 0,9 \text{ км}^{-1}, \quad \text{а} \quad R_0 = \sqrt{\frac{z_0}{k}}.$$

Здесь

$$z_0 = 3,44 \text{ мм}^6/\text{м}^3,$$

а

$$k = \frac{9P_{\text{min}}\lambda^6}{0,7\Pi^4 P_t A_p^2 \Theta_0^2 c^2} \left( \frac{m^2 + 2}{m^2 - 1} \right)^2 = 0,1422 \frac{P_{\text{min}}\lambda^6}{P_t A_p^2 \Theta_0^2 c^2}, \quad (4)$$

где  $P_{\text{min}}$  — минимальная мощность, фиксируемая радиолокатором,  $\lambda$  — длина волны,  $P_t$  — мощность, излучаемая радиолокатором,  $A_p$  — апертура антенны,  $\Theta_0$  — угол раствора диаграммы направленности,  $\tau$  — длительность импульса,  $c$  — скорость распространения электромагнитных волн, равная  $3 \cdot 10^{10}$  CGS.

Подставляя (2) в (1) и решая относительно  $\sin \beta$ , получаем

$$\sin \beta = \frac{H}{R} - 5,95 \cdot 10^{-5} R - \frac{4}{\gamma R} \lg \frac{R}{R_0}. \quad (5)$$

Значения  $\frac{4}{\gamma R} \lg \frac{R}{R_0}$  зависят не только от расстояния  $R$ , но и от параметров радиолокатора, так как  $R_0 = \sqrt{\frac{z_0}{k}}$  и должно вычисляться в каждом конкретном случае.

Для составления таблицы критических значений угла места антенны, вычисляемых по формуле (5), имеется вспомогательная табл. 1.

Таблица I

| R   | H      |     |     |     |     |     |     |     |     |     | Δ | 4/R | lg R | Δ'     | Δ''    |        |
|-----|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|-----|------|--------|--------|--------|
|     | 3,0    | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 5,0 | 5,5 | 6,0 | 6,5 | 7,0 | 7,5 |   |     |      |        |        | 8,0    |
| 10  | 0,2994 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |     |      | 1,0000 | 0,0407 | —      |
| 15  | 0,1991 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |     |      | 1,1761 | 0,0793 | 0,0276 |
| 20  | 0,1488 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |     |      | 1,3010 | 0,0872 | 0,0485 |
| 25  | 0,1185 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |     |      | 1,4178 | 0,0870 | 0,0560 |
| 30  | 0,0982 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |     |      | 1,5141 | 0,0842 | 0,0584 |
| 35  | 0,0836 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |     |      | 1,5941 | 0,0807 | 0,0586 |
| 40  | 0,0726 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |     |      | 1,6621 | 0,0771 | 0,0577 |
| 45  | 0,0640 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |     |      | 1,7204 | 0,0736 | 0,0564 |
| 50  | 0,0570 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |     |      | 1,7703 | 0,0703 | 0,0548 |
| 55  | 0,0512 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |     |      | 1,8129 | 0,0684 | 0,0531 |
| 60  | 0,0464 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |     |      | 1,8484 | 0,0635 | 0,0515 |
| 65  | 0,0422 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |     |      | 1,8751 | 0,0593 | 0,0499 |
| 70  | 0,0387 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |     |      | 1,9031 | 0,0556 | 0,0484 |
| 75  | 0,0355 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |     |      | 1,9294 | 0,0523 | 0,0470 |
| 80  | 0,0327 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |     |      | 1,9542 | 0,0494 | 0,0456 |
| 85  | 0,0302 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |     |      | 1,9777 | 0,0468 | 0,0443 |
| 90  | 0,0279 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |     |      | 2,0000 | 0,0444 | 0,0430 |
| 95  | 0,0259 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |     |      |        |        | 0,0419 |
| 100 | 0,0240 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |     |      |        |        | 0,0407 |
| 110 | 0,0208 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |     |      |        |        | 0,0387 |
| 120 | 0,0179 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |     |      |        |        | 0,0369 |
| 130 | 0,0154 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |   |     |      |        |        | 0,0353 |



Она составлена из расчета изменения  $H$  от 3,0 км до максимальной высоты тропопаузы, наблюдаемой в районе установки радиолокатора, через каждые полкилометра и изменения  $R$  от 10 до 100 км, через 5 км и от 100 до 400 км через каждые 10 км.

Значения  $\left(\frac{H}{R} - 5,95 \cdot 10^{-5}R\right)$  приведены в графе 3,0 для расстояний 10—220 км и на больших расстояниях в последующих графах.

Остальные числа каждой строчки можно получить последовательным прибавлением к первому числу числа, стоящего в графе  $\Delta$  той же строчки. Эту операцию удобно производить на арифмометре. Однако ее выгодно делать уже после того, когда первые приведенные в таблице числа будут исправлены на  $\frac{4}{\gamma R} (\lg R - \lg R_0)$ . Значения  $\frac{4}{\gamma R}$  и  $\lg R$  приведены в соответствующих графах.

В графе  $\Delta'$  приведены значения  $\frac{4}{\gamma R} (\lg R - \lg R_0)$  при  $R_0 = 8,1$  км, а в графе  $\Delta''$  — значения  $\frac{4}{\gamma R} (\lg R - \lg R_0)$  при  $R_0 = 12,1$  км. Эти значения всегда положительные, так как берутся для значений  $R > R_0$ .

Для составления таблицы критических значений  $\sin \beta$  поступаем следующим образом. От числа, стоящего в графе 3,0, отнимем число, стоящее в графе  $\Delta'$  в той же строчке. Полученное число записываем в графе 3,0, а последующие числа той же строчки получаем путем последовательного прибавления числа той же строчки, стоящего в графе  $\Delta$ . При этом имеет смысл записывать только числа, большие 0,0087 (что соответствует  $\beta = 0,5^\circ$ ). По табл. 2 и 3 составляются таблицы критических значений угла места антенны (табл. 4 и 5).

### Правила пользования таблицей критических значений угла места $\beta$ антенны

Для определения радиолокационной характеристики  $M$  грозового состояния ливней необходимо знать высоту изотермы  $-22,4^\circ$  и высоту тропопаузы. Эти величины можно определить из ближайших по времени данных наблюдений пункта радиозондирования, расположенного в районе установки радиолокатора.

Высоты изотерм, полученные с пункта радиозондирования, даются от уровня моря. Их необходимо привести к уровню антенны. Допустим, что после исправления мы получаем высоту изотермы  $-22,4^\circ$ , равной 5,2 км, а высоту тропопаузы — 10,2 км. Следовательно, на весь период радиолокационных наблюдений (до следующего радиозондирования) мы можем пользоваться двумя графами табл. 5 — 5,0 и 10,0. Предположим, что, наблюдая картину радиолокационных отражений под оптимальным углом места ( $\beta = 0,5—0,6^\circ$ ), мы замечаем на расстоянии 40 км очаг осадков и хотим определить радиолокационную характеристику его грозового состояния. В графе 5,0 и строчке 40 находим угол 3,6. Устанавливаем антенну под углом  $3,6^\circ$  и наблюдаем за очагом. Если он не виден под этим углом, то это ливень, если виден, то это гроза или сильная гроза. Чтобы решить данный вопрос, устанавливаем антенну под углом  $10,0^\circ$ , который стоит в той же строчке, но в графе 10,0. Если под таким углом очаг не наблюдается, то это гроза, а если наблюдается, то — сильная гроза.

В графе 5,0 видим, что грозовой очаг, находящийся на расстоянии 85 км, будет виден при  $\beta = 0,5^\circ$ . Следовательно, ливень, находящийся на

| R  | H      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|    | 3,0    | 3,5  | 4,0  | 4,5  | 5,0  | 5,5  | 6,0  | 6,5  | 7,0  | 7,5  | 8,0  | 8,5  |
| 10 | 0,2587 | 3087 | 3587 | 4087 | 4587 | 5087 | 5587 | 6087 | 6587 | 7087 | 7587 | 8087 |
| 15 | 1198   | 1531 | 1865 | 2198 | 2531 | 2865 | 3198 | 3531 | 3865 | 4198 | 4531 | 4865 |
| 20 | 0616   | 0866 | 1116 | 1366 | 1616 | 1866 | 2116 | 2366 | 2616 | 2806 | 3116 | 3366 |
| 25 | 0315   | 0515 | 0715 | 0915 | 1115 | 1315 | 1515 | 1715 | 1915 | 2115 | 2315 | 2515 |
| 30 | 0140   | 0307 | 0473 | 0640 | 0807 | 0973 | 1140 | 1307 | 1473 | 1640 | 1807 | 1973 |
| 35 |        | 0171 | 0315 | 0458 | 0600 | 0743 | 0886 | 1029 | 1172 | 1315 | 1458 | 1600 |
| 40 |        | 0080 | 0205 | 0330 | 0455 | 0580 | 0705 | 0830 | 0955 | 1080 | 1205 | 1330 |
| 45 |        |      | 0126 | 0237 | 0348 | 0460 | 0571 | 0682 | 0793 | 0904 | 1015 | 1126 |
| 50 |        |      |      | 0167 | 0267 | 0367 | 0467 | 0567 | 0667 | 0767 | 0867 | 0967 |

| R   | H      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|     | 3,0    | 3,5  | 4,0  | 4,5  | 5,0  | 5,5  | 6,0  | 6,5  | 7,0  | 7,5  | 8,0  | 8,5  |
| 10  | 0,2994 | 3494 | 3994 | 4494 | 4994 | 5494 | 5994 | 6494 | 6994 | 7494 | 7994 | 8494 |
| 15  | 1715   | 2048 | 2382 | 2715 | 3048 | 3382 | 3715 | 4048 | 4382 | 4715 | 5048 | 5382 |
| 20  | 1003   | 1253 | 1503 | 1753 | 2003 | 2253 | 2503 | 2753 | 3003 | 3253 | 3503 | 3753 |
| 25  | 0625   | 0825 | 1025 | 1225 | 1425 | 1625 | 1825 | 2025 | 2225 | 2425 | 2625 | 2825 |
| 30  | 0398   | 0565 | 0731 | 0898 | 1065 | 1231 | 1398 | 1565 | 1731 | 1898 | 2065 | 2231 |
| 35  | 0250   | 0393 | 0536 | 0679 | 0821 | 0964 | 1107 | 1250 | 1393 | 1536 | 1679 | 1821 |
| 40  | 0149   | 0274 | 0399 | 0524 | 0649 | 0774 | 0899 | 1024 | 1149 | 1274 | 1399 | 1524 |
| 45  | 0076   | 0187 | 0298 | 0409 | 0520 | 0632 | 0743 | 0854 | 0965 | 1076 | 1187 | 1298 |
| 50  |        | 0122 | 0222 | 0322 | 0422 | 0522 | 0622 | 0722 | 0822 | 0922 | 1022 | 1122 |
| 55  |        | 0072 | 0163 | 0254 | 0345 | 0436 | 0526 | 0617 | 0708 | 0799 | 0890 | 0981 |
| 60  |        |      | 0116 | 0199 | 0282 | 0366 | 0449 | 0532 | 0616 | 0699 | 0782 | 0866 |
| 65  |        |      | 0077 | 0154 | 0231 | 0308 | 0385 | 0461 | 0538 | 0615 | 0692 | 0769 |
| 70  |        |      |      | 0117 | 0189 | 0260 | 0332 | 0403 | 0474 | 0546 | 0617 | 0689 |
| 75  |        |      |      | 0085 | 0152 | 0218 | 0285 | 0352 | 0418 | 0485 | 0552 | 0618 |
| 80  |        |      |      |      | 0121 | 0184 | 0246 | 0308 | 0371 | 0434 | 0496 | 0558 |
| 85  |        |      |      |      | 0094 | 0153 | 0212 | 0271 | 0330 | 0388 | 0447 | 0506 |
| 90  |        |      |      |      | 0071 | 0127 | 0182 | 0238 | 0293 | 0349 | 0405 | 0460 |
| 95  |        |      |      |      |      | 0103 | 0156 | 0208 | 0261 | 0314 | 0366 | 0419 |
| 100 |        |      |      |      |      | 0083 | 0133 | 0183 | 0233 | 0283 | 0333 | 0383 |
| 110 |        |      |      |      |      |      | 0093 | 0139 | 0185 | 0230 | 0276 | 0321 |
| 120 |        |      |      |      |      |      |      | 0102 | 0143 | 0185 | 0227 | 0268 |
| 130 |        |      |      |      |      |      |      | 0070 | 0109 | 0147 | 0186 | 0224 |
| 140 |        |      |      |      |      |      |      |      | 0080 | 0115 | 0151 | 0187 |
| 150 |        |      |      |      |      |      |      |      |      | 0087 | 0120 | 0154 |
| 160 |        |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 0094 | 0125 |
| 170 |        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 0099 |
| 180 |        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 0076 |
| 190 |        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 200 |        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

Таблица 2

H

| 9,0  | 9,5  | 10,0 | 10,5 | 11,0 | 11,5 | 12,0 | 12,5 | 13,0 | 13,5 | 14,0 | 14,5 | 15,0 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 3587 | 9087 | 9587 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 5198 | 5531 | 5865 | 6198 | 6531 | 6865 | 7198 | 7531 | 7865 | 8198 | 8531 | 8865 | 9198 |
| 3616 | 3866 | 4116 | 4366 | 4616 | 4866 | 5116 | 5366 | 5616 | 5866 | 6116 | 6366 | 6616 |
| 2715 | 2915 | 3115 | 3315 | 3515 | 3715 | 3915 | 4115 | 4315 | 4515 | 4715 | 4915 | 5115 |
| 2140 | 2307 | 2473 | 2640 | 2807 | 2973 | 3140 | 3307 | 3473 | 3640 | 3807 | 3973 | 4140 |
| 1743 | 1886 | 2029 | 2172 | 2315 | 2458 | 2600 | 2743 | 2886 | 3029 | 3172 | 3315 | 3458 |
| 1455 | 1580 | 1705 | 1830 | 1955 | 2080 | 2205 | 2330 | 2455 | 2580 | 2705 | 2830 | 2955 |
| 1237 | 1348 | 1460 | 1571 | 1682 | 1793 | 1904 | 2015 | 2126 | 2237 | 2348 | 2460 | 2571 |
| 1067 | 1167 | 1267 | 1367 | 1467 | 1567 | 1667 | 1767 | 1867 | 1967 | 2067 | 2167 | 2267 |

Таблица 3

H

| 9,0  | 9,5  | 10,0 | 10,5 | 11,0 | 11,5 | 12,0 | 12,5 | 13,0 | 13,5 | 14,0 | 14,5 | 15,0 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 3994 | 9494 | 9994 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 5715 | 6048 | 6382 | 6715 | 7048 | 7382 | 7715 | 8048 | 8382 | 8715 | 9048 | 9382 | 9715 |
| 4003 | 4253 | 4503 | 4753 | 5003 | 5253 | 5503 | 5753 | 6003 | 6253 | 6503 | 6753 | 7003 |
| 3025 | 3225 | 3425 | 3625 | 3825 | 4025 | 4225 | 4425 | 4625 | 4825 | 5025 | 5225 | 5425 |
| 2398 | 2565 | 2731 | 2898 | 3065 | 3231 | 3398 | 3565 | 3731 | 3898 | 4065 | 4231 | 4398 |
| 1964 | 2107 | 2250 | 2393 | 2536 | 2679 | 2821 | 2964 | 3107 | 3250 | 3393 | 3536 | 3679 |
| 1649 | 1774 | 1899 | 2024 | 2149 | 2274 | 2399 | 2524 | 2649 | 2774 | 2899 | 3024 | 3149 |
| 1409 | 1520 | 1632 | 1743 | 1854 | 1965 | 2076 | 2187 | 2298 | 2409 | 2520 | 2631 | 2743 |
| 1222 | 1322 | 1422 | 1522 | 1622 | 1722 | 1822 | 1922 | 2022 | 2122 | 2222 | 2322 | 2422 |
| 1072 | 1163 | 1254 | 1345 | 1436 | 1526 | 1617 | 1708 | 1799 | 1890 | 1981 | 2072 | 2162 |
| 0949 | 1032 | 1116 | 1199 | 1282 | 1366 | 1449 | 1532 | 1616 | 1699 | 1782 | 1866 | 1949 |
| 0846 | 0923 | 1000 | 1077 | 1154 | 1231 | 1308 | 1384 | 1461 | 1538 | 1615 | 1692 | 1769 |
| 0760 | 0832 | 0903 | 0974 | 1046 | 1117 | 1189 | 1260 | 1332 | 1403 | 1474 | 1546 | 1617 |
| 0685 | 0752 | 0818 | 0885 | 0952 | 1018 | 1085 | 1152 | 1218 | 1285 | 1352 | 1418 | 1485 |
| 0621 | 0684 | 0746 | 0808 | 0871 | 0934 | 0996 | 1058 | 1121 | 1184 | 1246 | 1308 | 1371 |
| 0565 | 0624 | 0682 | 0741 | 0800 | 0859 | 0918 | 0977 | 1035 | 1094 | 1153 | 1212 | 1271 |
| 0516 | 0571 | 0627 | 0682 | 0738 | 0794 | 0849 | 0905 | 0960 | 1016 | 1071 | 1127 | 1182 |
| 0472 | 0524 | 0577 | 0629 | 0682 | 0735 | 0787 | 0840 | 0893 | 0945 | 0998 | 1050 | 1103 |
| 0433 | 0483 | 0533 | 0583 | 0633 | 0683 | 0733 | 0783 | 0833 | 0883 | 0933 | 0983 | 1033 |
| 0366 | 0412 | 0457 | 0503 | 0548 | 0594 | 0639 | 0685 | 0730 | 0775 | 0821 | 0866 | 0912 |
| 0310 | 0352 | 0393 | 0435 | 0477 | 0518 | 0560 | 0602 | 0643 | 0685 | 0727 | 0768 | 0810 |
| 0263 | 0301 | 0339 | 0378 | 0416 | 0455 | 0493 | 0532 | 0570 | 0609 | 0647 | 0686 | 0724 |
| 0223 | 0258 | 0294 | 0330 | 0365 | 0401 | 0437 | 0472 | 0508 | 0544 | 0580 | 0615 | 0651 |
| 0187 | 0220 | 0254 | 0287 | 0320 | 0354 | 0387 | 0420 | 0454 | 0487 | 0520 | 0554 | 0587 |
| 0156 | 0187 | 0218 | 0250 | 0281 | 0312 | 0344 | 0375 | 0406 | 0437 | 0468 | 0500 | 0531 |
| 0128 | 0157 | 0187 | 0216 | 0246 | 0275 | 0304 | 0334 | 0363 | 0393 | 0422 | 0451 | 0481 |
| 0103 | 0131 | 0159 | 0187 | 0214 | 0242 | 0270 | 0298 | 0326 | 0353 | 0381 | 0409 | 0437 |
| 0081 | 0107 | 0133 | 0160 | 0186 | 0212 | 0239 | 0265 | 0291 | 0318 | 0344 | 0370 | 0397 |
|      | 0086 | 0111 | 0136 | 0161 | 0186 | 0211 | 0236 | 0261 | 0286 | 0311 | 0336 | 0361 |

| R  | H    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|    | 3,0  | 3,5  | 4,0  | 4,5  | 5,0  | 5,5  | 6,0  | 6,5  | 7,0  | 7,5  | 8,0  | 8,5  |
| 10 | 14,0 | 18,0 | 21,0 | 24,1 | 27,3 | 30,6 | 34,0 | 37,5 | 41,2 | 45,1 | 49,4 | 54,0 |
| 15 | 7,0  | 8,8  | 10,8 | 12,7 | 14,7 | 16,6 | 18,6 | 20,7 | 22,7 | 24,8 | 26,9 | 29,1 |
| 20 | 3,5  | 5,0  | 6,4  | 7,8  | 9,3  | 10,8 | 12,2 | 13,7 | 15,2 | 16,3 | 18,2 | 19,7 |
| 25 | 1,8  | 3,0  | 4,1  | 5,2  | 6,4  | 7,6  | 8,7  | 9,9  | 11,0 | 12,2 | 13,4 | 14,6 |
| 30 | 0,8  | 1,8  | 2,7  | 3,7  | 4,6  | 5,6  | 6,5  | 7,5  | 8,5  | 9,4  | 10,4 | 11,4 |
| 35 |      | 1,0  | 1,8  | 2,6  | 3,4  | 4,3  | 5,1  | 5,9  | 6,7  | 7,6  | 8,4  | 9,2  |
| 40 |      | 0,5  | 1,2  | 1,9  | 2,6  | 3,3  | 4,0  | 4,8  | 5,5  | 6,2  | 6,9  | 7,6  |
| 45 |      |      | 0,7  | 1,4  | 2,0  | 2,6  | 3,3  | 3,9  | 4,6  | 5,2  | 5,8  | 6,5  |
| 50 |      |      |      | 1,0  | 1,5  | 2,1  | 2,7  | 3,2  | 3,8  | 4,4  | 5,0  | 5,6  |

| R   | H    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|     | 3,0  | 3,5  | 4,0  | 4,5  | 5,0  | 5,5  | 6,0  | 6,5  | 7,0  | 7,5  | 8,0  | 8,5  |
| 10  | 17,4 | 20,4 | 23,5 | 26,7 | 30,0 | 33,3 | 36,8 | 40,5 | 44,4 | 48,5 | 53,1 | 58,1 |
| 15  | 9,9  | 11,8 | 13,8 | 15,8 | 17,7 | 19,8 | 21,8 | 23,9 | 26,0 | 28,1 | 30,3 | 32,6 |
| 20  | 5,8  | 7,2  | 8,7  | 10,1 | 11,6 | 13,0 | 14,5 | 16,0 | 17,5 | 19,0 | 20,5 | 22,0 |
| 25  | 3,6  | 4,7  | 5,9  | 7,0  | 8,2  | 9,4  | 10,5 | 11,7 | 12,9 | 14,0 | 15,2 | 16,4 |
| 30  | 2,3  | 3,2  | 4,2  | 5,2  | 6,1  | 7,1  | 8,0  | 9,0  | 10,0 | 10,9 | 11,9 | 12,9 |
| 35  | 1,4  | 2,2  | 3,1  | 3,9  | 4,7  | 5,5  | 6,4  | 7,2  | 8,0  | 8,8  | 9,7  | 10,5 |
| 40  | 0,9  | 1,6  | 2,3  | 3,0  | 3,6  | 4,4  | 5,2  | 5,9  | 6,6  | 7,3  | 8,0  | 8,8  |
| 45  | 0,5  | 1,1  | 1,7  | 2,3  | 3,0  | 3,6  | 4,3  | 4,9  | 5,5  | 6,2  | 6,8  | 7,5  |
| 50  |      | 0,7  | 1,3  | 1,8  | 2,4  | 3,0  | 3,6  | 4,1  | 4,7  | 5,2  | 5,9  | 6,4  |
| 55  |      |      | 0,9  | 1,5  | 2,0  | 2,5  | 3,0  | 3,5  | 4,1  | 4,6  | 5,1  | 5,6  |
| 60  |      |      | 0,7  | 1,1  | 1,6  | 2,1  | 2,6  | 3,2  | 3,5  | 4,0  | 4,5  | 5,0  |
| 65  |      |      |      | 0,9  | 1,3  | 1,8  | 2,2  | 2,6  | 3,1  | 3,5  | 4,0  | 4,4  |
| 70  |      |      |      | 0,7  | 1,1  | 1,5  | 1,9  | 2,3  | 2,7  | 3,1  | 3,5  | 4,0  |
| 75  |      |      |      | 0,5  | 0,9  | 1,2  | 1,6  | 2,0  | 2,4  | 2,8  | 3,2  | 3,5  |
| 80  |      |      |      |      | 0,7  | 1,1  | 1,4  | 1,8  | 2,1  | 2,5  | 2,8  | 3,2  |
| 85  |      |      |      |      | 0,5  | 0,9  | 1,2  | 1,6  | 1,9  | 2,2  | 2,6  | 2,9  |
| 90  |      |      |      |      |      | 0,7  | 1,0  | 1,4  | 1,7  | 2,0  | 2,3  | 2,6  |
| 95  |      |      |      |      |      | 0,6  | 0,9  | 1,2  | 1,5  | 1,8  | 2,1  | 2,4  |
| 100 |      |      |      |      |      | 0,5  | 0,8  | 1,1  | 1,3  | 1,6  | 1,9  | 2,6  |
| 110 |      |      |      |      |      |      | 0,5  | 0,8  | 1,1  | 1,3  | 1,6  | 1,8  |
| 120 |      |      |      |      |      |      |      | 0,6  | 0,8  | 1,1  | 1,3  | 1,6  |
| 130 |      |      |      |      |      |      |      |      | 0,6  | 0,9  | 1,1  | 1,3  |
| 140 |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 0,6  | 0,9  | 1,1  |
| 150 |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 0,5  | 0,7  | 0,9  |
| 160 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 0,5  | 0,7  |
| 170 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 0,6  |
| 180 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 0,6  |
| 190 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 0,5  |
| 200 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 0,5  |

Таблица 4

| H    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 9,0  | 9,5  | 10,0 | 10,5 | 11,0 | 11,5 | 12,0 | 12,5 | 13,0 | 13,5 | 14,0 | 14,5 | 15,0 |
| 59,2 | 65,3 | 73,5 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 31,3 | 33,6 | 36,0 | 38,3 | 40,8 | 43,4 | 46,0 | 48,9 | 51,9 | 55,1 | 58,6 | 62,4 | 66,9 |
| 21,2 | 22,7 | 24,3 | 25,6 | 27,5 | 29,1 | 30,8 | 32,4 | 34,2 | 35,9 | 37,7 | 39,2 | 41,4 |
| 15,8 | 17,0 | 18,2 | 19,4 | 20,6 | 21,8 | 23,0 | 24,3 | 25,6 | 26,8 | 28,1 | 29,4 | 30,8 |
| 12,4 | 13,3 | 14,3 | 15,3 | 16,3 | 17,3 | 18,3 | 19,3 | 20,3 | 21,3 | 22,3 | 23,4 | 24,5 |
| 10,0 | 10,9 | 11,7 | 12,5 | 13,4 | 14,2 | 15,1 | 15,9 | 16,8 | 17,6 | 18,5 | 19,4 | 20,2 |
| 8,4  | 9,1  | 9,8  | 10,5 | 11,3 | 12,0 | 12,7 | 13,5 | 14,2 | 15,0 | 15,7 | 16,4 | 17,2 |
| 7,1  | 7,8  | 8,4  | 9,0  | 9,7  | 10,3 | 11,0 | 11,6 | 12,3 | 12,9 | 13,6 | 14,2 | 14,9 |
| 6,1  | 6,7  | 7,3  | 7,9  | 8,4  | 9,0  | 9,6  | 10,2 | 10,8 | 11,3 | 11,9 | 12,5 | 13,1 |

Таблица 5

| H    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 9,0  | 9,5  | 10,0 | 10,5 | 11,0 | 11,5 | 12,0 | 12,5 | 13,0 | 13,5 | 14,0 | 14,5 | 15,0 |
| 64,1 | 71,7 | 88,0 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 34,9 | 37,2 | 39,7 | 42,2 | 44,8 | 47,6 | 50,5 | 53,6 | 56,7 | 60,6 | 64,8 | 69,8 | 76,3 |
| 23,6 | 25,2 | 26,8 | 28,4 | 30,0 | 31,7 | 33,4 | 35,1 | 36,9 | 38,7 | 40,6 | 42,5 | 44,5 |
| 17,6 | 18,8 | 20,0 | 21,3 | 22,5 | 23,7 | 25,0 | 26,3 | 27,6 | 28,9 | 30,2 | 31,5 | 33,0 |
| 13,9 | 14,9 | 15,9 | 16,8 | 17,9 | 18,9 | 19,9 | 20,9 | 21,9 | 22,9 | 24,0 | 25,0 | 26,1 |
| 11,3 | 12,2 | 13,0 | 13,8 | 14,7 | 15,5 | 16,4 | 17,2 | 18,1 | 19,0 | 19,8 | 20,7 | 21,6 |
| 9,5  | 10,2 | 10,0 | 11,7 | 12,4 | 13,1 | 14,0 | 14,6 | 15,4 | 16,1 | 16,9 | 17,6 | 18,4 |
| 8,1  | 8,7  | 9,4  | 10,0 | 10,7 | 11,3 | 12,0 | 12,6 | 13,3 | 13,9 | 14,6 | 15,3 | 15,9 |
| 7,0  | 7,6  | 8,2  | 8,8  | 9,3  | 9,9  | 10,5 | 11,1 | 11,7 | 12,2 | 12,8 | 13,4 | 14,0 |
| 6,2  | 6,7  | 7,2  | 7,7  | 8,3  | 8,8  | 9,3  | 9,8  | 10,4 | 10,9 | 11,4 | 12,0 | 12,5 |
| 5,4  | 5,9  | 6,4  | 6,9  | 7,4  | 8,0  | 8,3  | 8,8  | 9,3  | 9,8  | 10,3 | 10,8 | 11,2 |
| 4,9  | 5,3  | 5,7  | 6,2  | 6,6  | 7,1  | 7,5  | 8,0  | 8,4  | 8,8  | 9,3  | 9,7  | 10,2 |
| 4,4  | 4,8  | 5,2  | 5,6  | 6,0  | 6,4  | 6,8  | 7,2  | 7,7  | 8,1  | 8,5  | 8,9  | 9,3  |
| 3,9  | 4,3  | 4,7  | 5,1  | 5,5  | 5,8  | 6,2  | 6,6  | 7,0  | 7,4  | 7,8  | 8,2  | 8,5  |
| 3,6  | 3,9  | 4,3  | 4,6  | 5,0  | 5,4  | 5,7  | 6,1  | 6,4  | 6,8  | 7,2  | 7,5  | 7,9  |
| 3,2  | 3,6  | 3,9  | 4,2  | 4,6  | 4,9  | 5,3  | 5,6  | 5,9  | 6,3  | 6,6  | 7,0  | 7,3  |
| 3,0  | 3,3  | 3,6  | 3,9  | 4,2  | 4,6  | 4,9  | 5,2  | 5,5  | 5,8  | 6,2  | 6,5  | 6,8  |
| 2,7  | 3,0  | 3,3  | 3,6  | 3,9  | 4,2  | 4,5  | 4,8  | 5,1  | 5,4  | 5,7  | 6,0  | 6,3  |
| 2,4  | 2,8  | 3,1  | 3,3  | 3,6  | 3,9  | 4,2  | 4,5  | 4,8  | 5,1  | 5,4  | 5,6  | 5,9  |
| 2,1  | 2,4  | 2,6  | 2,9  | 3,1  | 3,4  | 3,7  | 3,9  | 4,2  | 4,5  | 4,7  | 5,0  | 5,3  |
| 1,8  | 2,1  | 2,3  | 2,5  | 2,7  | 3,0  | 3,2  | 3,5  | 3,7  | 3,9  | 4,1  | 4,4  | 4,6  |
| 1,5  | 1,7  | 1,9  | 2,2  | 2,4  | 2,6  | 2,9  | 3,1  | 3,3  | 3,5  | 3,7  | 4,0  | 4,2  |
| 1,3  | 1,5  | 1,7  | 1,9  | 2,1  | 2,3  | 2,5  | 2,7  | 2,9  | 3,1  | 3,3  | 3,5  | 4,3  |
| 1,1  | 1,3  | 1,5  | 1,7  | 1,9  | 2,1  | 2,2  | 2,4  | 2,6  | 2,8  | 3,0  | 3,2  | 3,4  |
| 0,9  | 1,1  | 1,3  | 1,5  | 1,7  | 1,9  | 2,0  | 2,2  | 2,4  | 2,5  | 2,7  | 2,9  | 3,1  |
| 0,7  | 0,9  | 1,1  | 1,2  | 1,4  | 1,6  | 1,7  | 1,9  | 2,1  | 2,3  | 2,4  | 2,6  | 2,8  |
| 0,6  | 0,8  | 1,0  | 1,1  | 1,2  | 1,4  | 1,6  | 1,7  | 1,9  | 2,0  | 2,2  | 2,3  | 2,5  |
| 0,5  | 0,6  | 0,8  | 0,9  | 1,1  | 1,2  | 1,4  | 1,5  | 1,7  | 1,8  | 2,0  | 2,1  | 2,3  |
|      | 0,5  | 0,6  | 0,8  | 1,0  | 1,1  | 1,2  | 1,4  | 1,5  | 1,6  | 1,8  | 2,0  | 2,1  |

расстоянии 85 км, уже не будет нами наблюдаться. Отсюда можно сделать вывод, что все, что наблюдается дальше 80 км, нужно относить к грозам и сильным грозам.

Пользоваться табл. 4 и 5 можно только при стандартных параметрах радиолокатора. Если параметры изменены, необходимо составить таблицу критических значений угла места антенны, как это указано выше.

#### *ЛИТЕРАТУРА*

1. Котов Н. Ф. Радиолокационные характеристики ливней и гроз. Труды ГГО, вып. 102, 1959.

Г. Б. БРЫЛЕВ, Е. М. САЛЬМАН

## РАДИОЭХО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ТЕРМИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА

В статье описываются предварительные результаты радиолокационных наблюдений за диэлектрическими неоднородностями атмосферы типа «термиков» и приводятся метеорологические данные, доказывающие термический характер их происхождения. Дается упрощенная теория радиоэхо термиков на основе характера возникающих в чистой атмосфере отражений. Проводятся расчеты величин  $\Delta\epsilon$  и  $\Delta T$ , создающих радиоэхо.

Созданные в последние годы отечественные и зарубежные высокоэффективные радиолокационные средства, специально рассчитанные на применение в метеорологических целях, позволили подойти к проблеме радиолокационного зондирования тропосферы, представляющей собой большой научный и практический интерес. Первые предварительные результаты таких работ [1], [4], констатирующие возникновение радиоэхо при безоблачном небе, т. е. в отсутствие гидрометеоров, объясняли его появление существованием в тропосфере диэлектрически неоднородных объемов, возникающих при флуктуациях плотности молекул воздуха.

Целью настоящей работы является предварительное обсуждение некоторых результатов радиолокационных наблюдений за диэлектрическими неоднородностями, проведенных в ГГО им. А. И. Воейкова на радиолокационной аппаратуре.

Радиолокационные наблюдения за диэлектрическими неоднородностями в режиме вертикального зондирования проводились ежедневно с 10 до 20 час. в районе Ленинграда в течение апреля — июня 1960 г. Для получения временной картины характера, возникающего от диэлектрических неоднородностей радиоэхо, была установлена непрерывная фоторегистрация с индикатора кругового обзора при неподвижной развертке на пленку, движущуюся со скоростью 5 мм/мин. Одновременно с непрерывной фоторегистрацией ИКО велось периодическое фотографирование индикатора типа А на выходе приемника, предварительно калиброванного по чувствительности.

Образцы представленных на рис. 1 и 2 фотограмм ИКО и ИА дают представление о картине радиоэхо, возникающего при отражении 3-сантиметровых волн от диэлектрически неоднородной тропосферы.

Прежде всего обращает на себя внимание хаотический характер возникающего радиоэхо, имеющего на фотограммах ИКО вид одиночных и парных меток. Для объяснения картины полученного радиоэхо обратимся к рис. 3, схематически поясняющему режим вертикального зондирования тропосферы.

Характеризуя геометрические размеры диэлектрически неоднородного объема через  $l$  и  $d$ , нетрудно показать, что возникающий характер радио-

это будет зависеть от соотношений между  $L$ ,  $l$ ,  $h$  и  $d$ , где  $h = c\tau$  — длина цуга волн, проходимых в пространстве за время длительности импульса  $\tau$ ;  $L = \Theta H$  — диаметр освещенной области на высоте  $H$  при ширине диаграммы направленности  $\Theta$ .

При  $d \leq \frac{h}{2}$  на ИКО и движущейся ленте фоторегистратора возникают точечные засветки, время существования которых зависит от  $L$ ,  $l$  и горизонтальной скорости переноса  $v$  отражающего объема.

При  $d > \frac{h}{2}$  на ИКО и ленте фоторегистратора возникают парные метки, характеризующие существование радиоэхо только на границах отражающего объема, вертикальные размеры которого больше, чем разрешающая способность радиолокатора по дальности.

Отсутствие радиоэхо от внутренних областей отражающего объема говорит о его диэлектрической однородности и зеркальности возникающего характера отражений. Последнее хорошо иллюстрируется фотографией, полученной на отметчике типа А, которая показывает отсутствие «деформации» отраженных от диэлектрических неоднородностей сигналов (рис. 2). Это в свою очередь подтверждает зеркальный характер возникающих отражений. Не останавливаясь на анализе геометрических форм отражающих объемов из-за отсутствия необходимого для этих целей экспериментального материала, следует, однако, указать на неправильность и сложность форм таких объемов. Это иллюстрируется временным сдвигом парных меток на фотограммах ИКО (рис. 1), объясняемым вытянутостью по ветру отражающих объемов.

Как следует из анализа материалов радиолокационных наблюдений, величина вертикальной протяженности таких объемов  $d$  может меняться от нескольких до сотен метров. Оценка величины  $d < 50$  м не может быть проведена с помощью дан-

ной аппаратуры, так как разрешающая способность последней по дальности составляет 47 м. Сделанные выводы относительно зеркальности характера возникающих отражений на диэлектрически однородных

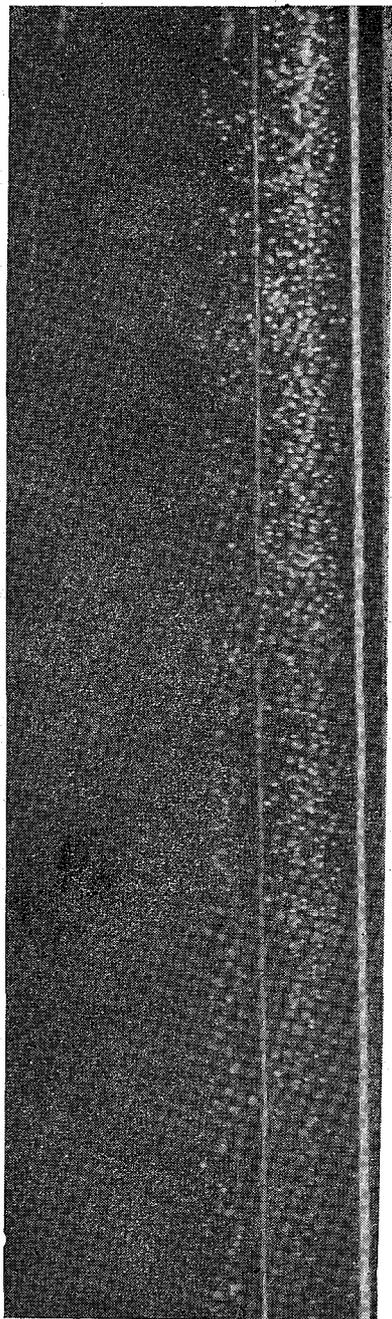


Рис. 1. Фотограмма радиоэхо диэлектрических неоднородностей с экрана ИКО.

объемах, размеры которых  $d$  и  $l$  много больше, чем длина волн  $\lambda$ , позволяют оценить величины возникающих на границе атмосфера — диэлектрический однородный объем коэффициентов отражения  $\rho$  с помощью известных формул Френеля, допускающих наличие скачка  $\Delta\epsilon$ , локализованного в бесконечно тонком слое.

Для вертикальной поляризации падающего излучения и имеющего место в нашем случае вертикального зондирования

$$\rho = \frac{\sqrt{\epsilon_{\text{отн}} - 1}}{\sqrt{\epsilon_{\text{отн}} + 1}}, \quad (1)$$

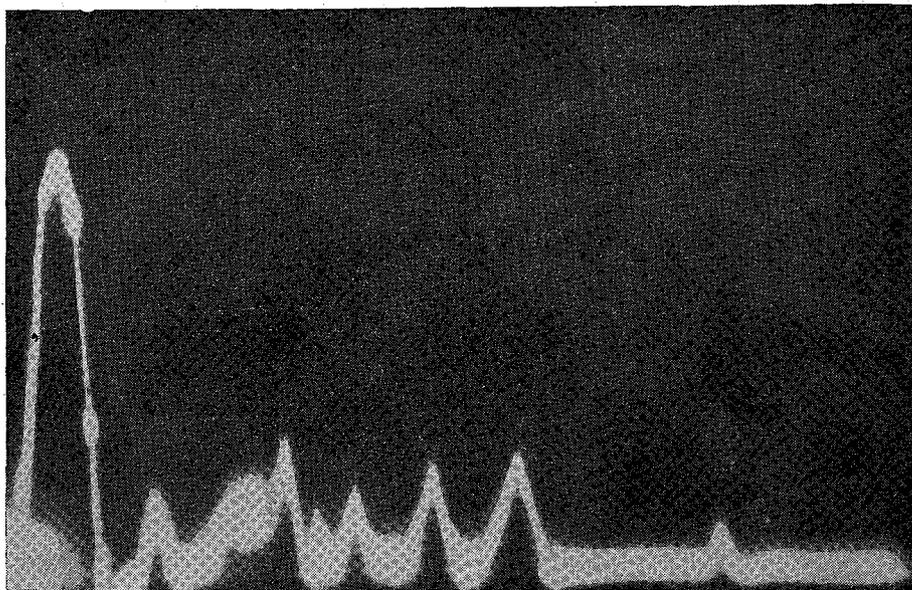


Рис. 2. Фотограмма радиоэхо диэлектрических неоднородностей с индикатора типа «А».

где  $\epsilon_{\text{отн}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_0}$  — отношение диэлектрических проницаемостей отражающего объема  $\epsilon_1$  и атмосферного воздуха  $\epsilon_0$ .

Принимая во внимание, что

$$\epsilon_1 = \epsilon_0 + \Delta\epsilon, \quad (2)$$

и преобразуя (1), получим

$$\rho = \frac{\Delta\epsilon}{4\epsilon_0} \approx \frac{\Delta\epsilon}{4}. \quad (3)$$

Как показали непосредственные рефрактометрические измерения [5], в диэлектрически неоднородной тропосфере возможно существование скачков  $\Delta\epsilon = 2 \cdot 10^{-5}$ . В этом случае можно ожидать, как следует из (3), величины  $\rho = 5 \cdot 10^{-6}$ . Однако сделанное допущение относительно возможности существования скачка  $\Delta\epsilon$ , локализованного на бесконечно тонкой границе атмосфера — диэлектрический однородный объем, не является строгим. Более реально предположение о существовании на границе

атмосфера — диэлектрический однородный объем переходного слоя  $\delta$ , в котором  $\varepsilon(\delta)$  подчиняется определенному закону.

Если допустить, что  $\varepsilon(H)$  линейно в слое  $\delta$  (рис. 4), ослабление в атмосфере пренебрежимо мало, а характер отражения зеркальный, то, используя результаты работы [2] и метод последовательных приближений, разработанный в [3] для  $\rho \ll 1$  и  $\Delta\varepsilon \ll 1$ , получим следующее выражение для  $\rho$  в случае вертикально поляризованной волны:

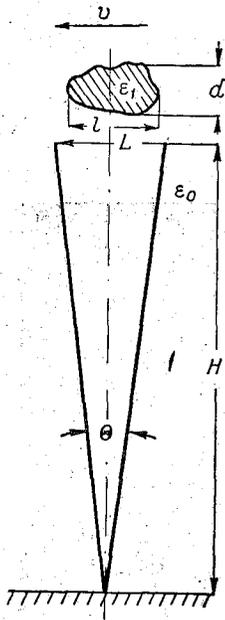


Рис. 3. Схема режима вертикального зондирования тропосферы.

пользуя результаты работы [2] и метод последовательных приближений, разработанный в [3] для  $\rho \ll 1$  и  $\Delta\varepsilon \ll 1$ , получим следующее выражение для  $\rho$  в случае вертикально поляризованной волны:

$$\rho = \frac{1}{4} \int_{H_1}^{H_2} \frac{d[\varepsilon(H)]}{dH} e^{2ikH} dH, \quad (4)$$

где  $k$  — волновое число.

В интервале  $\delta = H_2 - H_1$ , где  $H_1 \ll H \ll H_2$ ,

$$\frac{d\varepsilon}{dH} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{H_2 - H_1} = \frac{\Delta\varepsilon}{\delta}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4), получаем

$$\rho = -\frac{1}{4} \int_0^{\delta} \frac{\Delta\varepsilon}{\delta} \exp \frac{4i\pi H}{\lambda} dH. \quad (6)$$

Вычисляя интеграл и переходя к коэффициенту отражения по мощности, находим, что

$$\rho^2 = \left( \frac{\Delta\varepsilon}{16\pi} \frac{\lambda}{\delta} \right)^2 \left( 2 - 2 \cos \frac{4\pi\delta}{\lambda} \right). \quad (7)$$

Соблюдая условие зеркальности отражения и полагая  $\Delta\varepsilon = 2 \cdot 10^{-5}$ , найдем, что  $\rho = 2 \cdot 10^{-6}$ , т. е. имеет такой же порядок, как и полученный нами ранее из формулы Френеля.

Проведенная оценка величины коэффициентов отражения, возникающих на диэлектрических неоднородностях, позволяет объяснить наблюдаемое на индикаторах радиолокатора радиоэхо.

Если предположить, что  $\rho = 5 \cdot 10^{-6}$  существуют на всей площади  $S$ , освещенной антенной, то интенсивность возникшего радиоэхо может быть рассчитана из следующего уравнения радиолокации:

$$P_r = \frac{2P_t A_p^2 S_p^2}{3H^4 \lambda^2} S \rho^2. \quad (8)$$

Так как

$$S = \frac{\pi}{4} (H\theta)^2, \quad (9)$$

а

$$\theta = 0,85 \frac{\lambda}{D}, \quad (10)$$

где  $D$  — диаметр параболической антенны, то, преобразуя (8), имеем

$$P_r = \frac{2,6 \cdot 10^{-8} \pi^2 P_t A_p (\Delta\varepsilon)^2}{H^2}. \quad (11)$$

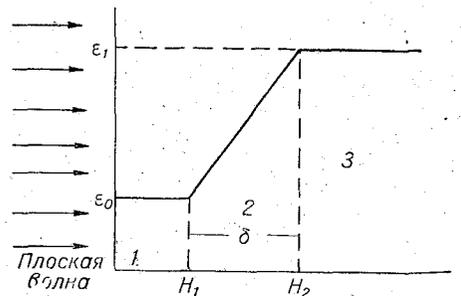


Рис. 4. Изменение  $\varepsilon(H)$  в переходном слое  $\delta$ .

1 — атмосфера, 2 — переходный слой, 3 — отражающий объем.

Рефрактометрические измерения  $\Delta\varepsilon$  допускают возникновение интенсивного радиоэхо от диэлектрических неоднородностей на радиолокаторе. Однако они не объясняют физической причины и природы образования таких неоднородностей.

Для полупроводящих сред, какой является атмосфера,

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (12)$$

При отсутствии дисперсий

$$\epsilon' = 1 + \frac{155}{T} \left( p + \frac{4810e}{T} \right) 10^{-6}, \quad (13)$$

где  $T$  — абсолютная температура,  $p$  — давление в миллибарах,  $e$  — парциальное давление водяного пара в миллибарах.

Мнимая часть  $\epsilon''$  диэлектрической проницаемости на частоте  $\omega$  определяется проводимостью атмосферы  $\sigma$

$$\epsilon'' = \frac{4\pi i \sigma}{\omega}, \quad (14)$$

которая составляет, по данным непосредственных измерений,  $(1 \div 5) \cdot 10^{-4}$  CGSE.

При таких значениях  $\sigma$   $\epsilon'' \ll \epsilon'$  и  $\epsilon \approx \epsilon'$ . Поэтому причину образования диэлектрических неоднородностей, т. е. скачков  $\Delta\epsilon$ , следует искать в возможных флуктуациях  $T$ ,  $p$  и  $e$  атмосферы. Полагая, что давление внутри отражающего объема выравнивается с окружающей атмосферой, можно записать (13) в виде

$$\Delta\epsilon = \frac{155 \cdot 4810}{T^2} \Delta e - \frac{155}{T^2} \left( p + \frac{9620}{T} \right) \Delta T. \quad (15)$$

Исходя из (15) и (11), проведем оценку величин  $\Delta e$  и  $\Delta T$ , необходимых для существования минимального радиоэхо на радиолокаторе, интенсивность которого равна пороговой чувствительности приемника. Рассчитанные данные, относящиеся к высотам  $H = 1000 \div 2000$  м, где наиболее часто наблюдается радиоэхо при безоблачном небе, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Величины  $\Delta e$  и  $\Delta T$  на разных высотах  $H$ , обуславливающие радиоэхо на радиолокаторе

| $H$ м            | 1000              |      |      | 1500                 |      |      |      | 2000                |      |      |      |      |
|------------------|-------------------|------|------|----------------------|------|------|------|---------------------|------|------|------|------|
| $T^\circ$        | 284               |      |      | 282                  |      |      |      | 279                 |      |      |      |      |
| $p$ мб           | 900               |      |      | 850                  |      |      |      | 800                 |      |      |      |      |
| $e$ мб           | 7                 |      |      | 6,6                  |      |      |      | 6,3                 |      |      |      |      |
| $\Delta\epsilon$ | $7 \cdot 10^{-6}$ |      |      | $1,06 \cdot 10^{-5}$ |      |      |      | $1,4 \cdot 10^{-5}$ |      |      |      |      |
| $\Delta e$       | 0,70              | 0,80 | 0,90 | 1,00                 | 1,08 | 1,16 | 1,27 | 1,34                | 1,46 | 1,55 | 1,63 | 1,72 |
| $\Delta T$       | 0                 | 0,5  | 1,0  | 1,5                  | 0    | 0,5  | 1,0  | 1,5                 | 0    | 0,5  | 1,0  | 1,5  |

Приведенные выше расчетные значения  $\Delta e$  и  $\Delta T$ , объясняющие возникновение радиоэхо, при соблюдении условия зеркальности характера отражения должны существовать в достаточно тонком слое. Это может иметь место при интенсивном конвективном переносе тепла и влаги с сильно нагретой подстилающей поверхности, приводящем к образованию «термиков», т. е. замкнутых объемов воздуха с отличной от окружающей атмосферы температурой и влажностью. Предварительно проведенный анализ метеорологических условий возникновения радиоэхо при безоблачном небе доказывает термический характер образования диэлектрических неоднородностей. Как правило, радиоэхо возникает в дни и часы неустойчивой стратификации атмосферы при наличии в приземном слое сверхадиабатических градиентов температуры и высокой абсолютной влажности. Ветер в приземном слое не сопутствует раз-

витию термической конвекции и образованию термиков. Доказательством термического происхождения возникающих в атмосфере диэлектрических неоднородностей является суточный ход наблюдаемых на ИКО радиолокатора термиков с максимумом их числа  $n$ , приходящимся на дневные часы (рис. 5). Облака верхнего и среднего ярусов, лежащие выше уровня максимальной конвекции, не препятствуют образованию термиков (рис. 6). Облака нижнего яруса (Sc, St) и вертикального развития

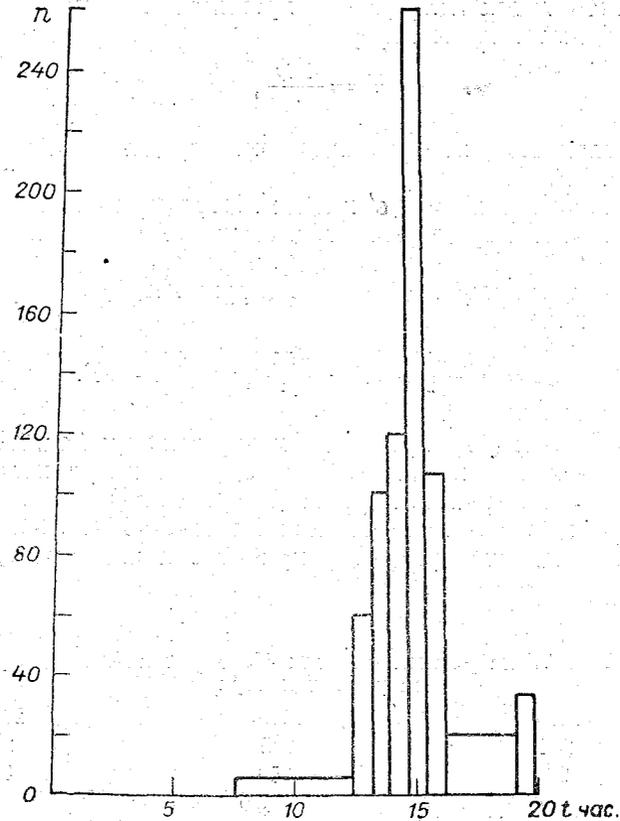


Рис. 5. Суточный ход термиков 14 мая 1960 г.

(Cu, Cu cong.) уменьшают число наблюдаемых термиков (рис. 7). Обычные дни с наблюдаемыми термиками характерны развитием кучевой облачности, являющейся следствием интенсивной термической конвекции.

Приведенные данные позволяют утверждать, что наблюдаемые в слое 0—2000 м диэлектрические неоднородности типа термиков возникают в результате конвективного переноса тепла и влаги с подстилающей поверхности.

Возможность радиолокационных наблюдений за такими неоднородностями открывает перспективы исследования механизма термической конвекции, недостаточно изученного до настоящего времени.

Практическим приложением таких радиолокационных наблюдений является установление количественных связей между термиками, конвекцией и степенью болтанки самолета.

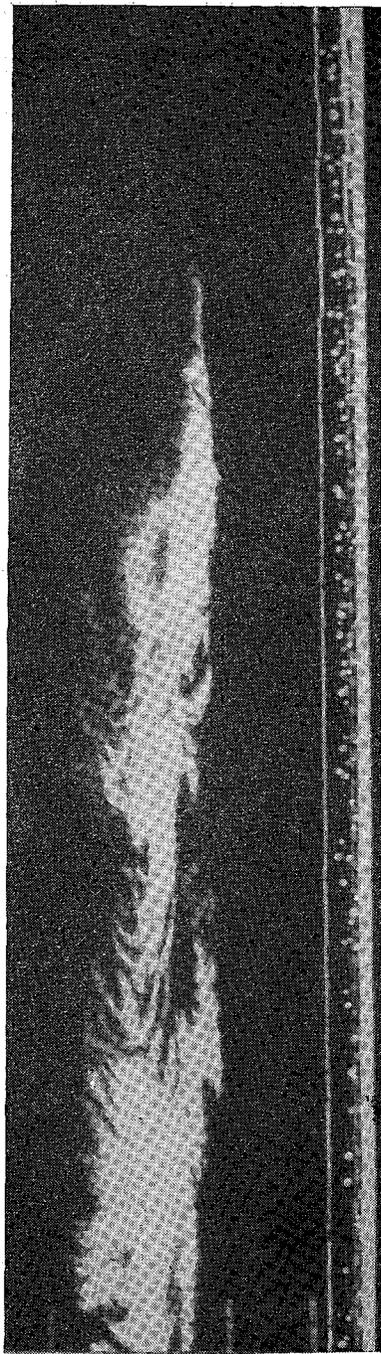


Рис. 6. Фотограмма радиоэхо термиков под облаками Ас.

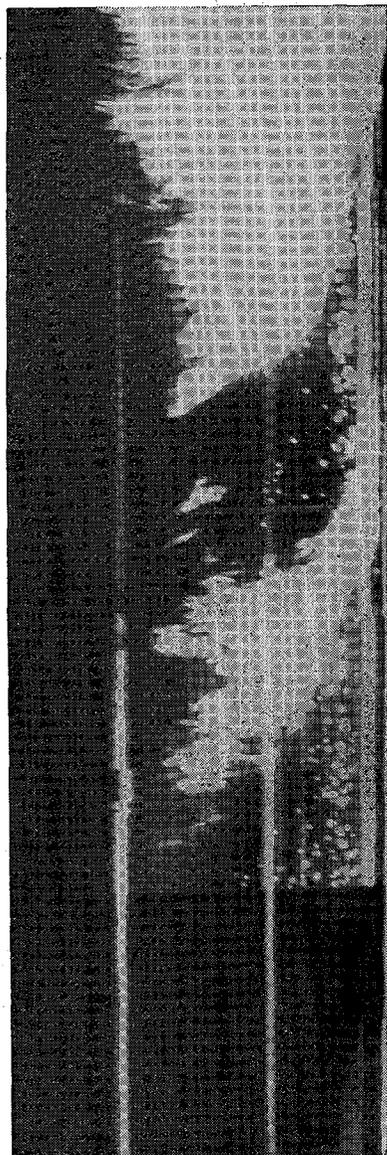


Рис. 7. Фотограмма радиоэхо термиков под облаками Сд.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Костарев В. В., Горелик А. Г. Радиозо некоторых невидимых объектов тропосферы. ДАН СССР, т. 125, № 1, 1959.
2. Троицкий В. Н. Отражение УКВ от слоистых неоднородностей тропосферы. Радиотехника, т. 11, № 1, 1956.
3. Бреховских Л. М. Отражение плоских волн от слоистооднородных сред. ЖТФ, т. XIX, вып. 10, 1949.
4. Friend A. W. Теория и практика радиолокационного зондирования тропосферы.
5. Jones R. F. Radar echoes from inhomogenities. Quart. Journ. Roy. Meteorol. Soc., No 84, 1958.

Н. Ф. КОТОВ, ХЭ ЖУИ-ЦЗЮНЬ

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРА ДВИЖЕНИЯ ОЧАГОВ ЛИВНЕЙ И ГРОЗ

В статье приведены некоторые результаты радиолокационного исследования характера движения очагов ливней и гроз в сопоставлении их с радиозондовыми данными распределения ветра в атмосфере; показано, что горизонтальное перемещение очагов ливней и гроз определяется средним ветром в слое образования осадков и может изменяться соответствующим образом в связи с изменениями вертикальной мощности их развития.

Простейшим приемом прогноза ливней и гроз является экстраполяция их горизонтального перемещения. Такой формальный прием может быть использован только при прогнозе на короткий срок и в службе радиолокационного штормоповещения. Радиолокационные станции штормоповещения имеют возможность непосредственно определять горизонтальные перемещения очагов ливней и гроз. Однако эти данные в большинстве случаев теряют свое оперативное значение вследствие кратковременного существования ливней и гроз. Кроме того, как это будет указано ниже, характер движения очагов ливней и гроз в процессе их развития может претерпевать существенные изменения. Все это говорит об актуальности данного вопроса, о необходимости выяснения причин, обуславливающих характер движения очагов ливней и гроз. Однако выяснению этого вопроса до сих пор уделялось мало внимания.

При исследовании структуры обложных осадков радиолокационным методом Н. Ф. Котов [1] показал, что характер очертаний полосы падения осадков хорошо согласуется с распределением ветра в атмосфере. Вся эта полоса осадков движется со скоростью и по направлению ветра в том слое атмосферы, где данная полоса имеет свое начало. К аналогичному выводу приходят и авторы работы [6]. Однако, как было указано Котовым [2], перенесение этого вывода на случай фронтальных и внутримассовых ливней и гроз может быть сделано с известной осторожностью и только на период их зрелой стадии, когда выявляется более или менее определенный слой атмосферы, который мы можем принять за область образования ливневых осадков. Тогда мы можем утверждать, что ливни и грозы движутся со скоростью и по направлению ветра в этом слое атмосферы.

В результате статистической обработки большого количества радиолокационных наблюдений за очагами ливней и гроз авторы работы [3] пришли к заключению, что ливни и грозы, за редким исключением, движутся со скоростью и по направлению среднего ветра в двухкилометровом слое, в середине которого находится уровень нулевой изотермы. Этот экспериментальный факт они объясняют тем, что на уровне нулевой

изотермы происходит формирование жидких частиц осадков. Такое объяснение не имеет под собой достаточного физического обоснования и нуждается в проверке. Задача данной работы и состоит в том, чтобы проверить достоверность и причину, обуславливающую характер движения очагов ливней и гроз.

### Характер горизонтального движения очагов ливней и гроз

Для выполнения этой работы были использованы материалы радиолокационных наблюдений за 1951—1955 гг., производившихся в пос. Воейково по методу, описанному в работе [5]. В основном это были фотоснимки с экрана ИКО, которые представляли собой горизонтальные разрезы ливней и гроз, производившиеся при различных значениях угла места антенны.

В обработку фотопленок входили следующие процессы:

- 1) предварительный осмотр фотопленок и выбор кадров;
- 2) увеличение фотоснимков и окончательный выбор очагов;
- 3) измерение наклонной дальности  $R$ , азимута  $\alpha$ , угла места  $\beta$  и времени наблюдения  $t$  для каждого выбранного очага;
- 4) вычисление ряда величин, характеризующих горизонтальное и вертикальное движение очагов ливней и гроз:  $H$  — высота данной части очага по формуле  $H=R \sin \beta$ ,  $L$  — горизонтальная дальность по формуле  $L=R \cos \beta$ ,  $\Delta t$  — промежуток времени между двумя последовательными кадрами для данного очага,  $\Delta H$  и  $\Delta L$  — изменение  $H$  и  $L$  за время  $\Delta t$ ,  $\omega$  — вертикальная скорость вершины очага,  $\Theta$  — направление перемещения очагов,  $v$  — скорость перемещения очагов, измеренная на круге Молчанова.

Выбор очагов производился по следующим признакам:

- 1) выбирались очаги, находившиеся от радиолокатора на расстоянии от 10 до 50 км;
- 2) выбирались очаги, имеющие правильную форму и четкие очертания;
- 3) очаги выбирались по возможности из кадров с большим значением угла места  $\beta$ ;
- 4) последующий кадр одного и того же очага выбирался по признаку подобия изображения;
- 5) промежуток времени между двумя последовательными кадрами для одного и того же очага выбирался от 5 до 10 мин.

По радиозондовым данным были выписаны скорость и направление ветра на высоте нулевой изотермы, 3 км и на высоте вершин выбранных нами очагов ливней и гроз. По ним были вычислены градиенты скорости и направления ветра для слоев с различными толщинами и границами. Дополнительно были использованы материалы по самолетному зондированию, а для отдельных случаев были рассмотрены и синоптические карты.

В результате обработки было выбрано всего 47 серий наблюдений.

При выяснении характера движения ливней и гроз мы исходили из соображений, что полоса осадков образуется из множества отдельных дождевых капель. Поэтому движение полосы осадков есть не что иное как суммарное движение всех капель. Но при падении капли непрерывно подвергаются влиянию ветров в тропосфере, и если предположить, что профиль ветра в тропосфере со временем не меняется, то при этом достаточно учесть ветер на той высоте, откуда капли начинают падать. Таким образом, мы можем сделать следующий общий вывод для характеристики движения ливней и гроз, а именно полоса осадков движется

со скоростью и направлением ветра на высоте нахождения области образования осадков.

Для обложных осадков, область образования которых имеет сравнительно небольшую и постоянную во времени вертикальную мощность, можно за ветер на высоте области образования осадков взять ветер на уровне вершины очага радиозохи от этих осадков, что и было подтверждено в [1] и [6]. Для ливневых осадков эти предположения, очевидно, не имеют места. По исследованию В. А. Зайцева [4] о распределении размеров капель в кучевых облаках, можно предполагать, что область образования ливневых осадков имеет значительно большую вертикальную мощность, приблизительно равную вертикальной мощности ливневых облаков.

Мы указывали, что при падении капель нужно учесть ветер на уровне начала их падения.

Аналогично, если капли поднимаются вверх, то при этом нужно учесть ветер на ниже лежащих уровнях, а мы знаем, что именно внутри ливневых облаков в течение периода их существования наблюдается интенсивное восходящее движение.

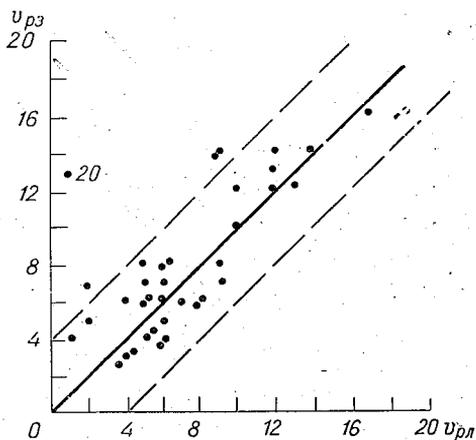


Рис. 1.

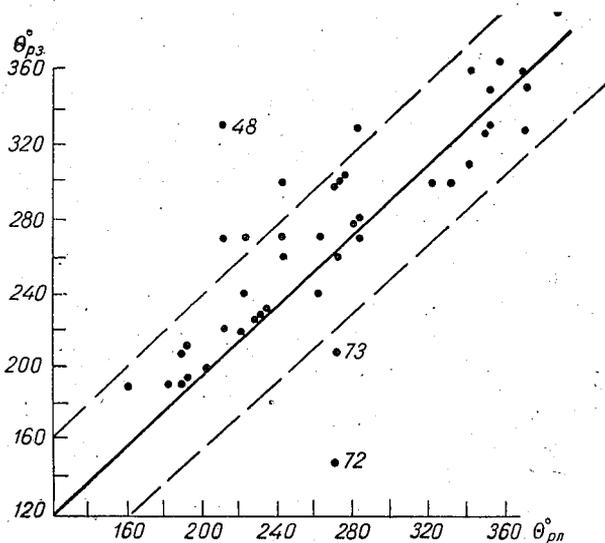


Рис. 2.

По этим двум причинам для характеристики среднего результирующего движения необходимо взять средний ветер в слое от уровня конденсации до уровня конвекции.

Построенные нами графики подтверждают наш вывод. На рис. 1 и 2 даны графики, построенные по средним ветрам в указанном выше слое. Для упрощения обработки здесь вместо высоты уровня конвекции взяты

максимальные высоты вершин очагов ливней и гроз, а вместо высоты уровня конденсации — высота 1 км, так как, по нашим данным, средняя высота уровня конденсации близка к 1 км. Эти значения средних ветров  $v_{pz}$  м/сек. и  $\Theta_{pz}^\circ$ , полученные нами по радиозондовым данным, отложены

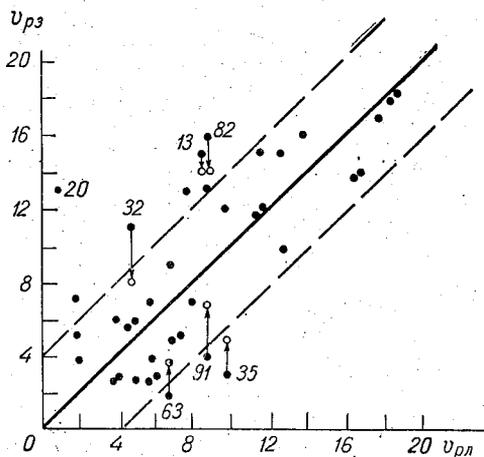


Рис. 3.

по оси ординат на рис. 1 и 2. По оси абсцисс отложены значения  $v_{rl}$  м/сек. и  $\Theta_{rl}^\circ$ , полученные по радиолокационным данным. Кроме линий корреляции, показанных в виде сплошных прямых, пунктирными линиями выделены зоны с максимальным отклонением  $\pm 4$  м/сек. для скорости ветра и  $\pm 40^\circ$  для направления. Эти графики имеют хорошую связь.

Графики корреляции на рис. 3 и 4, построенные по ветру, отмеченному на высоте вершин очагов ливней и гроз, показывают плохую связь. Анализ свидетельствует о том, что именно для этих серий наблюдается преобладание восходящего движения, т. е. для них нужно учесть ветер на ниже лежащих уровнях.

При учете этого связь улучшается, что видно по стрелкам, указывающим новые положения этих выскочивших точек.

Графики корреляции на рис. 5 и 6 построены по ветру на уровне нулевой изотермы (таким путем мы заменили средний ветер в двухкилометровом слое, как это было сделано в работе [3]). Связь в данном случае получается лучше, чем в предыдущем, что объясняется расположением двухкилометрового слоя в середине нашего слоя. Однако эта связь также улучшается при учете ветра на выше и ниже лежащих уровнях.

Выше мы упоминали, что движение очагов ливневых осадков обусловлено средним значением ветра в слое от уровня конденсации до уровня конвекции. Поскольку в период существования очагов наблюдается сильное изменение с высотой

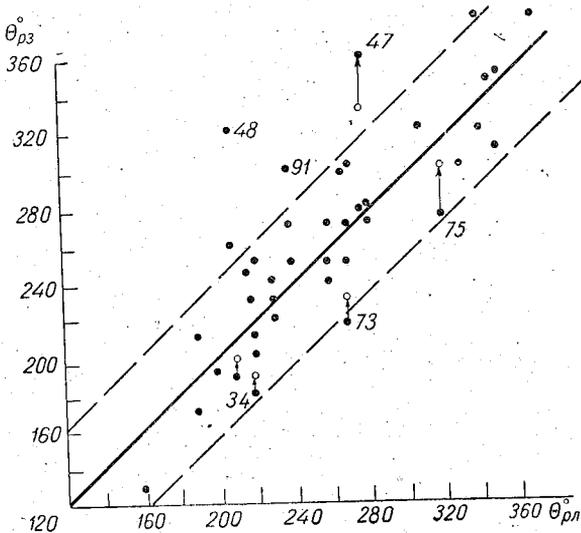


Рис. 4.

его верхней границы, то меняется и слой, а следовательно, и характер горизонтального движения самого очага ливневых осадков. При этом по данным о профиле ветра и вертикальной скорости вершины очага мы всегда можем предполагать, какое именно изменение скорости и на-

правления движения очага будет иметь место. Например, если в данный момент наблюдается рост вершины, а ветер с высотой усиливается и поворачивается вправо, то и горизонтальное движение очага при этом будет ускоряться и поворачиваться вправо. Для детального исследования влияния вертикальной скорости вершины очагов и профиля ветра на характер горизонтального движения очагов ливней и гроз мы строим для каждого очага траектории перемещения, а для скорости — графики ходов горизонтальной скорости и высоты вершины очагов радиоэхо.

Из 29 траекторий только две траектории не подтверждают нашей теории, а из 41 графика ходов тоже только два случая не подтверждают нашего вывода.

Главными источниками ошибок, которые вытекают из неточности при наблюдении и обработке и непосредственно влияют на достоверность полученных нами выводов о характере движения ливней и гроз, являются следующие.

1. Ошибки за счет несинхронности радиолокационных и радиозондовых наблюдений. Имеющиеся у нас данные показывают, что время наблюдения по радиолокатору и радиозонду часто расходится на 1—6 час.

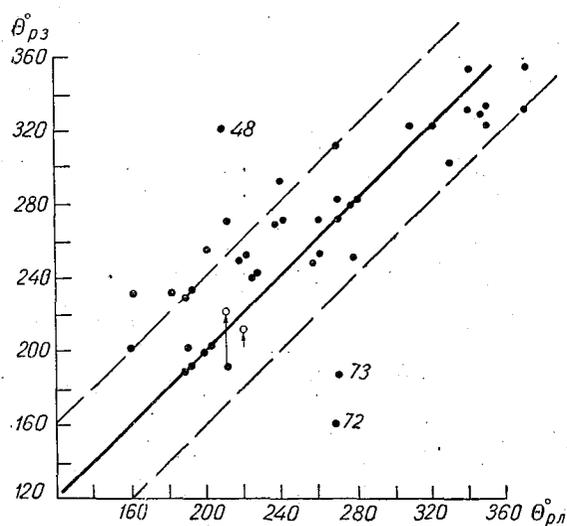


Рис. 6.

Влияние этого фактора хорошо наблюдаются в те дни, когда были сделаны две и больше серий наблюдений. На всех графиках корреляции для этих дней каждая последующая серия смещается в одну сторону по отношению к предыдущей. Те серии наблюдений, которые находятся вне выделенной зоны на всех графиках корреляции, в том числе и для графиков на рис. 1 и 2, объясняются именно влиянием этого фактора. Данный фактор является главным источником ошибки при определении корреляционной связи между средним ветром в указанном нами слое и движением очагов, так как именно этот фактор приносит отклонение движения очагов от среднего ветра в атмосфере в одну сторону.

2. Ошибки за счет неточности определения наклонной дальности  $R$  ( $\Delta R = \pm 0,5$  км) и угловых координат  $\alpha$  и  $\beta$  ( $\pm 1^\circ$ ).

Эти ограничения точности при измерении исходных данных, несомненно, приводят к ошибкам полученных нами результатов о характере движения очагов.

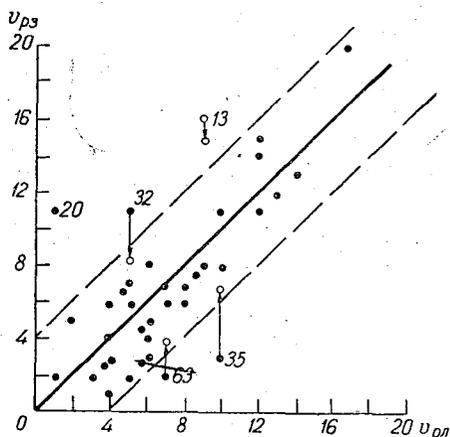


Рис. 5.

Эти ограничения точности при измерении исходных данных, несомненно, приводят к ошибкам полученных нами результатов о характере движения очагов.

Если предположить, что скорость и направление движения очагов, а также и высоты их вершин меняются плавно, то можно по графикам траекторий и ходов  $v$  и  $H$  приближенно оценить величины этих ошибок. Они показывают, что ошибки в направлении из кадра в кадр могут достигать  $90^\circ$ , а в случаях, когда очаги являются малоподвижными, ошибки могут достигать  $180^\circ$ . Ошибки определения горизонтальной скорости составляют 3—4 м/сек., а для вертикальной скорости — 2 м/сек. Таким образом, ошибки за счет данного фактора довольно большие. Но для полного периода одной серии эти ошибки колеблются в ту и в другую сторону около среднего результирующего вектора движения, в результате чего они частично компенсируются. По этой причине при выяснении корреляционной связи между профилем ветра и движением очагов ливневых осадков мы использовали только средние величины за весь период данной серии, а не скорости и направления, полученные за промежуток времени между двумя последовательными кадрами, так как в последнем случае будут сильно проявляться вышеуказанные ошибки, которые могут полностью затушевать эти связи.

3. Неточность за счет недостаточного объема данных.

### О характере вертикального движения вершины очагов радиоэхо от ливней и гроз

В работе [7] показано, что вертикальная скорость вершины очага радиоэхо как при подъеме, так и при опускании колеблется от 2 до 10 м/сек. Средняя скорость при этом равна 4 м/сек.

Вычисления по нашим данным дали несколько иной результат, а именно: средняя скорость опускания (осредненная по 102 случаям) составляет 2,8 м/сек., средняя скорость подъема (осредненная по 55 случаям) — 2,4 м/сек.

Хотя эти величины лишь приблизительные, но то, что они отличаются от приведенных выше величин, взятых из иностранной литературы, не должно вызывать удивления, поскольку скорость опускания и подъема вершины очага радиоэхо может сильно зависеть от местных условий.

При подъеме вершины очага радиоэхо скорость несколько компенсируется скоростью падения капель по отношению к воздуху, а при ее опускании движение воздушного потока и падение капель направлены в одну сторону. Поэтому результаты того, что абсолютное значение величины скорости при опускании немного больше, является тоже логичным, хотя при подъеме скорость может быть несколько увеличена вследствие роста частиц на более высоком уровне до размера обнаружения.

Нами была сделана попытка определить средние периоды развития и распада очагов. Для этого мы выбрали все очаги, за периоды существования которых наблюдались процессы развития и распада. Строились графики вертикальной скорости вершины очагов радиоэхо, с которых снимались промежутки времени при развитии и распаде отдельно. Эти графики показывают, что опускающиеся очаги часто не исчезают сразу, а снова начинают развиваться. Для детального исследования наблюдаемого явления все подъемы для одного и того же очага были условно разделены по порядку на первый подъем, второй, третий и т. д. Также были разделены все опускания для того же очага. Результаты обработки сведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что:

1) средняя продолжительность процесса опускания меньше, чем средняя продолжительность подъема. Это согласуется с тем, что средняя

скорость опускания вершины очага радиоэхо больше средней скорости подъема;

2) средняя продолжительность периода повторного подъема меньше, чем предыдущего; то же и для процесса опускания.

Т а б л и ц а 1

| № подъема или опускания | Средняя продолжительность (мин.) |                          |
|-------------------------|----------------------------------|--------------------------|
|                         | процесса                         | периода полного развития |
| I подъем . . . . .      | >10                              | >19,4                    |
| I опускание . . . . .   | 9,4                              |                          |
| II подъем . . . . .     | 9,0                              | 17,8                     |
| II опускание . . . . .  | 8,8                              |                          |
| III подъем . . . . .    | 6,4                              | 10,4                     |
| III опускание . . . . . | 4,0                              |                          |

С энергетической точки зрения это должно иметь место, так как каждый раз при стадии развития высвобождается часть энергии, и потенциальная энергия для следующего процесса развития становится меньше;

3) средняя продолжительность последующего периода полного развития тоже меньше, чем предыдущего, и, очевидно, по той же причине.

### Выводы

1. Характер горизонтального движения очагов ливней и гроз определяется средним значением ветра во всем слое, где происходит образование осадков, т. е. между уровнем конденсации и уровнем конвекции. Очевидно, что объяснение относится к любому виду осадков как обложного, так и ливневого характера.

2. Из-за небольшого объема материала наблюдений полученные нами данные о характере вертикального движения вершины очагов радиоэхо от ливней и гроз имеют значения лишь для качественного анализа.

Поскольку этот вопрос имеет большое практическое значение, а данная работа в связи с наличием ряда источников погрешностей не дает хорошей количественной оценки, требуется дальнейшее его исследование. При этом первые усилия должны быть направлены на обеспечение синхронности радиолокационных и радиозондовых наблюдений и на увеличение их числа и точности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Котов Н. Ф. Вертикальное зондирование осадков методом радиолокации. Труды ГГО, вып. 22, 1953.
2. Котов Н. Ф. Радиолокационные характеристики ливней и гроз. Труды ГГО, вып. 102, 1960.
3. Костарев В. В., Гейгеров С. С., Федорова А. А. Некоторые результаты радиолокационных наблюдений за очагами ливней и гроз. Труды ЦАО, вып. 15, 1954.
4. Зайцев В. А. Размеры и распределения капель в кучевых облаках. Труды ГГО, вып. 13- (75), 1948.
5. Котов Н. Ф., Николаев П. Н. Метод радиолокационных наблюдений ливней и гроз. Труды ЦАО, вып. 20, 1958.
6. Gunn K. L. S., Marshall T. S., The effect of wind shear on falling precipitation. J. Met., vol. 12, No 4, 1955.
7. Mason B. J. The physics of clouds, 1957.

## О НЕКОТОРЫХ РАЗЛИЧИЯХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРОЗ И ЛИВНЕЙ

В статье рассматриваются особенности хода электрического поля во время гроз и ливней, изменение электрической проводимости воздуха, сопоставляется интенсивность грозовых и ливневых дождей, приводятся примерные заряды капель и даются некоторые радиолокационные характеристики облаков в связи с их разрядной активностью.

Прогноз гроз и ливней является практически важной задачей, которая до сих пор решалась на основании синоптических данных. В последнее время Н. С. Шишкиным [1] предложен прогноз гроз на основе метода слоя. Будет гроза с ливнем или ливень без грозы — часто такого различия прогнозировать не требуется, но в некоторых случаях (для некоторых потребителей прогноза) необходимо знать, будет ли гроза или только ливень. Как известно, чтобы предвидеть явление, надо знать его физическую сущность. Физические различия в проявлении гроз и ливней без грозы изучены еще недостаточно. Нами была сделана попытка выяснить, какие имеются различия в электрических и некоторых других характеристиках этих явлений.

С этой целью были использованы материалы комплекса наблюдений в пос. Воейково за 1954 г. В комплекс вошли: регулярные наблюдения за градиентом потенциала электрического поля и проводимостью в атмосфере, осуществляющиеся в отделе атмосферного электричества ГГО; измерения зарядов отдельных капель дождя, проводившиеся в порядке дипломной работы К. Ф. Крамич; регистрация интенсивности осадков плювиографом и радиолокационные наблюдения, проводившиеся в лаборатории радиометеорологии ГГО.

Для исследований были взяты данные, полученные во время 11 гроз и 13 ливней. Прежде всего нами был рассмотрен ход градиента потенциала.

По данным наблюдений, во время ливней без гроз наблюдалось уменьшение положительного градиента потенциала вплоть до отрицательных значений. В качестве примера на рис. 1 приводится запись градиента потенциала во время ливня, имевшего место 3 августа 1954 г. Ливень, начавшийся в 4 ч. 55 м., с небольшими перерывами продолжался до 9 ч. 08 м. Изменение градиента потенциала во время гроз не сколько иное. Для гроз характерны резкие скачки градиента потенциала, которые одинаково часто могут быть как положительного, так и отрицательного значения (см. рис. 2). Наблюдались случаи, когда градиент потенциала во время грозы имел преимущественно положительные значения.

Н. А. Парамонов [2], обобщая наблюдения за градиентом потенциала в Свердловской гидрометобсерватории по данным за 5 лет, делает вы-

вод, что во время гроз одинаково часто встречаются как отрицательные, так и положительные значения градиента потенциала, а для ливневых дождей в среднем градиент потенциала уменьшается, а иногда и принимает отрицательные значения.

По наблюдениям Е. Р. Двали [3] в Тбилисской обсерватории, также получается, что при ливнях электрическое поле преимущественно имеет отрицательное направление, а при грозах градиент потенциала резко

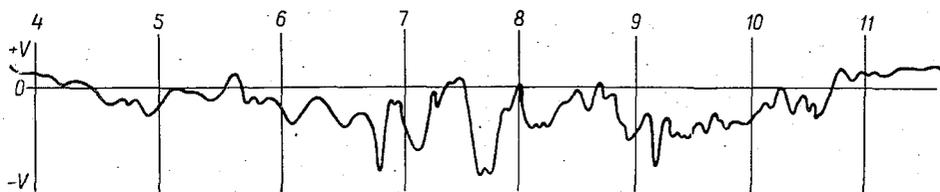


Рис. 1. Копия с ленты электрографа от 3/VIII 1954 г. Ливень продолжался от 4 ч. 55 м. до 9 ч. 08 м. с перерывами.

изменяется и принимает большие положительные и отрицательные значения.

Такая же картина получается по данным И. М. Имянитова [4], который проводил измерения напряженности электрического поля с самолета: при ливневых дождях поле было отрицательным, напряженность поля в среднем достигала 50 в/см, мало меняясь по величине со временем. В грозовом дожде (периферийная область грозовых осадков)

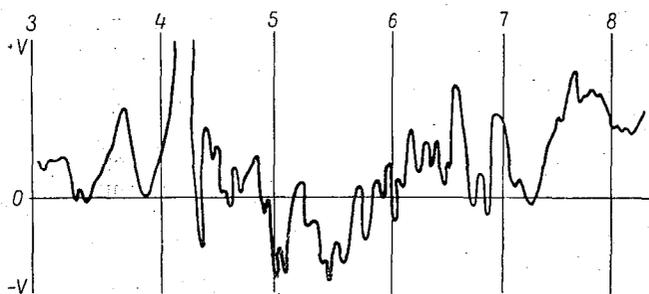


Рис. 2. Копия с ленты электрографа от 13/VI 1954 г. Гроза наблюдалась от 4 ч. 20 м. до 5 ч. 15 м. и от 6 ч. 20 м. до 7 ч. 20 м.

напряженность поля резко возрастала и составляла в среднем +90 в/см. Отдельные пики достигали значений 143, 180 и даже 368 в/см.

Нами было исследовано электрическое поле для 8 ливней и 9 гроз. При этом изменение градиента потенциала рассматривалось за первые полчаса от начала грозы или ливня. Сделано это было потому, что, как известно, процесс грозы подразделяется на три стадии: 1) стадию зарождения и роста грозового облака, 2) зрелую стадию и 3) стадию диссипации (разрушения). Начало зрелой стадии обычно связывают с первым грозовым разрядом и началом выпадения интенсивного дождя. Эта стадия продолжается чаще всего около 30 мин. По-видимому, для выяснения различия в исследуемых явлениях целесообразно было рассматривать проявление их в первые полчаса от начала.

Оказалось, что за первые полчаса средняя величина градиента потенциала при грозах была в 2 раза больше, чем за то же время при ливнях. Изменение градиента потенциала во время гроз с переходом через нулевые значения, по данным записей электрографа, отмечалось до 3—5 раз в час. По данным Двали и Парамонова получается примерно такая же картина, но изменения градиента потенциала с переходом через нуль происходили в среднем каждые 10 мин., т. е. несколько чаще, чем у нас.

Разница в ходе градиента потенциала во время гроз и ливней, по-видимому, объясняется тем, что ливневое облако по мере выпадения осадков принимает преимущественно отрицательный заряд, а это и вызывает отрицательный ход градиента потенциала.

На преимущественный вынос положительно заряженных осадков во время ливней указывал И. С. Аникиев [5]. По данным В. П. Колоколова [6], положительно заряженных осадков выпадает больше как во время

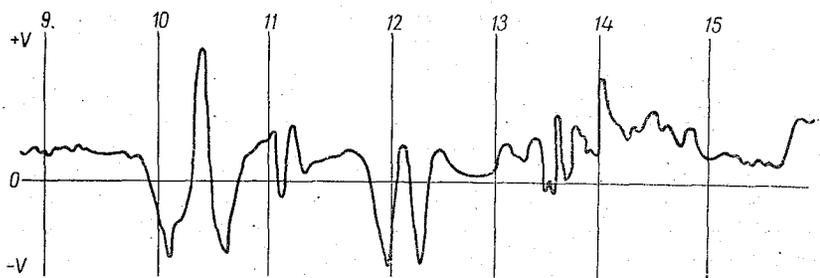


Рис. 3. Копия с ленты электрографа от 4/VI 1954 г. Изменения электрического поля без осадков во время ливня и после него. Ливень наблюдался от 12 ч. 00 м. до 12 ч. 20 м и от 13 ч. 30 м. до 13 ч. 45 м.

гроз, так и во время ливней без гроз. Как известно, знак выпадающих осадков сильно зависит от объемного заряда между облаком и землей. Этот объемный заряд по величине и по знаку во время гроз изменяется значительно чаще, чем только при ливнях, поэтому интервалы времени, когда выпадают осадки того или другого знака, будут разные. Колоколов [7] отмечает, что эти интервалы более длительны при ливневых осадках и резко уменьшаются во время гроз. Кроме того, необходимо учесть, что вынос зарядов из грозовых облаков происходит также в виде разряда молнии и в свою очередь оказывает влияние на ход градиента потенциала. Причины, вызывающие тот или иной ход градиента потенциала, много сложнее рассмотренных нами.

Укажем еще на одну особенность, которая выявилась в ходе градиента потенциала. При облачности, предшествовавшей ливневым осадкам, наблюдались значительные изменения электрического поля, причем эти изменения становились заметными уже за 2—3 часа до начала выпадения ливневых осадков (рис. 3).

В случаях грозовых облаков нарушения электрического поля совпадали с началом грозы или возникали за 10—15 мин. до ее начала. Нарушения электрического поля как в случае гроз, так и ливней без грозы продолжались после этих явлений в течение 1—2 час. (рис. 4).

Особенность в ходе градиента потенциала перед началом ливней и гроз может быть объяснена тем, что ливневые облака приходят к месту наблюдений уже потерявшими некоторое количество осадков и в них возникает объемный заряд, который влияет на ход градиента потен-

циала. По данным непосредственных измерений в облаках И. М. Имяни-  
това, этот объемный заряд получается отрицательным. В грозовом же  
облаке, возникающем в непосредственной близости к месту наблюдений  
и являющемся в начале своего возникновения в целом нейтральным,  
только с началом разрядной деятельности и выпадения осадков возни-  
кает преимущественный заряд, влияющий на электрическое поле. По-  
этому и воздействие его на ход градиента потенциала начинается с мо-

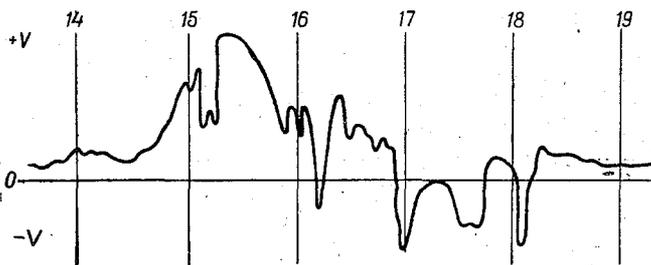


Рис. 4. Копия с ленты электрографа от 10/VII 1954 г. Изменения  
электрического поля. Гроза наблюдалась от 15 ч. 15 м. до  
15 ч. 50 м.

мента выпадения осадков или немного раньше. Итак, во время гроз и  
ливней без гроз в ходе электрического поля имеются явные различия.

При исследовании проводимости воздуха нами были использованы  
материалы, полученные с помощью регистрирующей установки ГГО.

В результате анализа материалов мы пришли к выводу, что суще-  
ственной разницы в среднечасовых значениях и ходе суммарной прово-  
димости во время ливней и гроз не обнаруживается. Но исследования

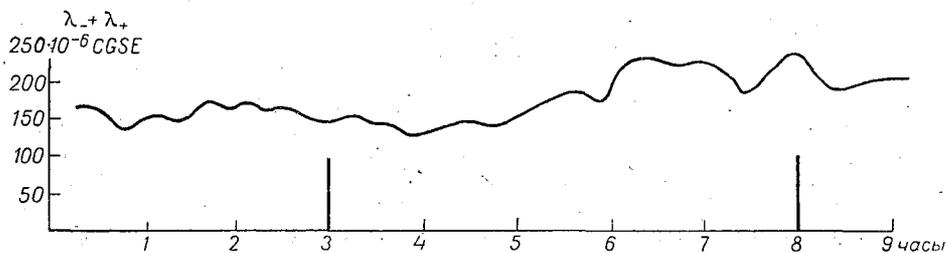


Рис. 5. Средняя суммарная проводимость по 10-минутным интервалам без осадков,  
во время ливней и гроз и после окончания осадков.

проводимости за малые промежутки времени — через каждые 10 мин. —  
показали, что проводимость воздуха возрастает по мере выпадения  
дождя, и максимум достигается в конце грозы или ливня или даже  
спустя некоторое время после окончания дождя (рис. 5).

Было также обнаружено, что при ливнях наблюдается возрастание  
отрицательной проводимости (рис. 6), для гроз же такой зависимости  
не получалось.

Изменение проводимости во время гроз и ливней, по всей вероятно-  
сти, получается за счет разбрызгивания капель. Особенно интенсивно  
разбрызгивание капель происходит в электрическом поле. Разбрызги-  
вающие капли в электрическом поле заряжаются различно. По данным  
В. М. Мучника [8], при отрицательном электрическом поле брызги (мел-

кие капли) заряжаются отрицательно, а при положительном поле — положительно. При ливнях без гроз, как было показано выше, преобладают поля отрицательного направления. Поэтому мелкие капельки будут заряжаться отрицательно, а испаряясь, превращаться в отрицательно заряженные ионы. Во время гроз, когда электрическое поле часто меняется по знаку, разбрызгиваемые мелкие капельки будут заряжаться тем и другим знаком, а их испарение приведет к увеличению ионов обоих знаков, и, следовательно, суммарная проводимость возрастет. Увеличение суммарной проводимости может происходить также за счет вымывания пыли дождем. По-видимому, разбрызгивание капель все же является основной причиной изменения проводимости во время дождя. Этот вывод подтверждается данными Нориндера и Сиксна [12], которые в Упсале летом 1950 г. проводили наблюдения за плотностью ионов во время ливней и гроз. По их данным получается, что в момент усиления

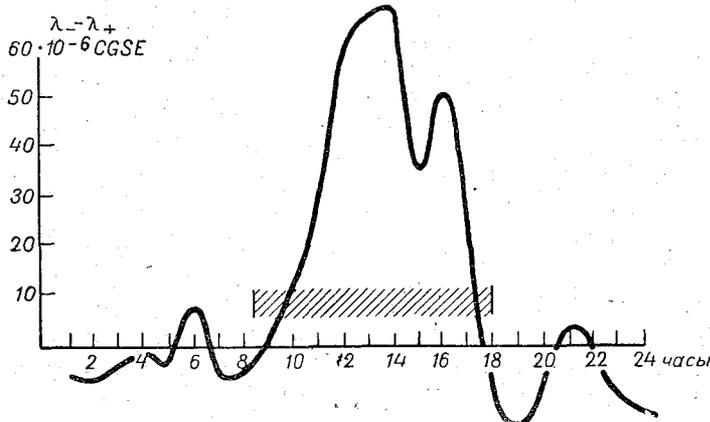


Рис. 6. Ход отрицательной проводимости во время ливня, наблюдавшегося 8/VIII 1954 г. от 8 ч. 18 м. до 17 ч. 40 м.

гроз и ливней плотность ионов обоих знаков возрастает, причем плотность отрицательных ионов возрастает больше (при вымывании атмосферы от пыли этого не будет).

Данных о зарядах отдельных капель дождя, полученных в комплексе с другими измерениями, оказалось весьма мало. Только во время двух ливней (11 и 14 августа) были получены надежные данные. Во время ливня 11 августа одинаково часто наблюдались как положительно, так и отрицательно заряженные капли. 14 августа ливень был в промежутке между двумя грозами. Во время этого ливня капли выпадали преимущественно заряженные положительным знаком. Средний заряд капель во время обоих этих ливней был равен: положительно заряженных капел ь  $5,4 \cdot 10^{-3}$  эсе и отрицательно заряженных  $-10,2 \cdot 10^{-3}$  эсе. По данным В. П. Колоколова [7], для сильных ливневых дождей (он не разделяет данные, полученные во время ливней с грозой и ливней без грозы), исследованных им в пос. Воейково в 1958 г., получается, что средний заряд положительно заряженных капел ь равен  $2,7 \cdot 10^{-2}$  эсе, а отрицательно заряженных  $-2,3 \cdot 10^{-2}$  эсе. И. С. Аникиев [5], наблюдавший дожди в Ленинграде, нашел, что при грозах средний отрицательный заряд капел ь равен  $-10,3 \cdot 10^{-3}$  эсе, а положительный заряд равен  $8,1 \cdot 10^{-3}$  эсе. Для ливневых дождей без гроз у него получились средние заряды  $+3,6 \cdot 10^{-3}$  и  $-3,9 \cdot 10^{-3}$  эсе. При этом он указывает, что для ливней ха-

рактерно преобладание положительно заряженных капель. Приведенные данные не сильно различаются между собой, хотя и получены они различными методами и в разное время. Этих данных, если взять их отдельно, мало для утверждения того, что осадками из ливневых облаков производится вынос преимущественно положительных зарядов, но вместе с другими данными они подкрепляют этот вывод.

При оценке интенсивности осадков нами рассматривались материалы, полученные с помощью плувиографа, установленного на метеостанции ГГО в Воейково. Данные об осадках во время гроз и во время ливней без грозы также сравнивались за промежутки времени — первые полчаса от начала этих явлений. По записям плувиографа была рассчитана интенсивность в мм/мин. для 10 гроз и 14 ливней. Данные приведены в табл. 1. В среднем оказалось, что отношение интенсивности грозового дождя к интенсивности ливня без грозы равно 8. По данным В. М. Мучника [9], исследовавшего количество выпавших осадков во время гроз и ливней в районе Киева, что среднее значение максимальной интенсивности во время гроз примерно в 10 раз больше, чем при ливнях без гроз. Столь большое различие в интенсивностях осадков может получиться либо потому, что осадки из грозовых облаков выпадают из большей толщи облака, чем в случаях только ливня, либо механизм образования осадков в ливневых и грозовых облаках разный. В табл. 2 приведены данные о мощности грозовых и ливневых облаков. Мощность облаков — толщина, из которой выпадали осадки, — определялась разностью высот вершины радарного эха и уровня конденсации (данных прямых измерений высоты нижней границы облаков в нашем распоряжении не было). Высота нулевой изотермы находилась по данным радиозондирования. Для гроз в табл. 2 дана дополнительная характеристика их по разрядной деятельности. Как видно из табл. 2, мощность грозовых облаков колеблется в пределах 5—10 км, а ливневых — 3,5—4,0 км. По данным Н. Ф. Котова [10], сделавшего обобщения радиолокационных характеристик ливней и гроз по наблюдениям в Воейково за 1954 и 1955 гг., средняя вертикальная мощность эха (толща от верхней границы радиоэхо до уровня конденсации) для грозовых облаков составляет 9,2 км, а для ливневых — 3,5 км.

Таблица 1

Значения интенсивностей осадков во время гроз и ливней

| Дата    | Интенсивность грозовых дождей (мм/мин.) | Дата    | Интенсивность ливней (мм/мин.) |
|---------|---|---------|--------------------------------|
| 13/VI   | 0,050                                   | 2/VI    | 0,026                          |
| 27/VI   | 0,130                                   | 25/VI   | 0,075                          |
| 4/VII   | 0,600                                   | 8/VII   | 0,007                          |
| 13/VII  | 0,500                                   | 11/VII  | 0,013                          |
| 25/VII  | 0,880                                   | 23/VII  | 0,043                          |
| 26/VII  | 0,070                                   | 26/VII  | 0,030                          |
| 17/VIII | 0,300                                   | 2/VIII  | 0,012                          |
| 6/IX    | 0,150                                   | 4/VIII  | 0,060                          |
| 13/IX   | 0,060                                   | 11/VIII | 0,080                          |
| 22/IX   | 0,040                                   | 13/VIII | 0,060                          |
|         |   | 31/VIII | 0,023                          |
|         |   | 14/IX   | 0,032                          |
|         |   | 15/IX   | 0,007                          |
|         |   | 17/IX   | 0,008                          |
| Среднее | 0,250                                   | Среднее | 0,033                          |

Как видно, толща облаков, из которой выпадают осадки, в случае гроз значительно больше, чем при выпадении только ливневых осадков. Кютнер [11], например, считает, что мощность грозовых облаков должна быть не меньше 5 км. По всем данным, имеющимся в литературе, облака, дающие ливневые осадки и не являющиеся электрически активными, никогда не достигают мощности более 5 км. Из табл. 2 можно также видеть, что более мощным грозовым облакам соответствует и большая разрядная деятельность. Целый ряд авторов указывает, что существует тесная связь между интенсивностью осадков и активностью разрядной деятельности.

Таблица 2

| Дата    | Уровень конденсации (м) | Высота вершины радарного пятна $H$ км | Мощность облаков (км) | Высота нулевой изотермы $h$ км | $H-h$ км | Расположение основания облака относительно нулевой изотермы (км) | Число разрядов в час |
|---------|-------------------------|---------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|----------|--|----------------------|
| Гроза   |                         |                                       |                       |                                |          |  |                      |
| 6/VII   | 350                     | 10,00                                 | 9,65                  | 3,95                           | 6,05     | 3,60   | 1196                 |
| 10/VII  | 700                     | 6,80                                  | 6,10                  | 4,45                           | 2,35     | 3,75   | 11                   |
| 4/VIII  | 150                     | 5,80                                  | 5,65                  | 2,50                           | 3,30     | 2,35   | 52                   |
| 14/VIII | 250                     | 5,00                                  | 4,75                  | 2,75                           | 2,25     | 2,50   | 18                   |
| 17/VIII | 200                     | 8,50                                  | 8,30                  | 4,00                           | 4,50     | 3,80   | 93                   |

Ливень

|         |     |      |      |      |       |      |  |
|---------|-----|------|------|------|-------|------|--|
| 16/VII  | 900 | 4,50 | 3,60 | 3,50 | 1,00  | 2,60 |  |
| 10/VIII | 500 | 3,50 | 3,00 | 3,90 | -0,40 | 3,40 |  |
| 11/VIII | 450 | 3,50 | 3,05 | 3,75 | -0,25 | 3,30 |  |

Примечание. Относительная влажность за 4 и 14/VIII взята по утренним срокам наблюдений, так как грозы проходили в первую половину дня.

Таким образом, проведенное нами исследование гроз и ливней показало, что эти близкие друг другу явления по своим физическим характеристикам все же различны. Поэтому дальнейшее изучение физических характеристик гроз и ливней должно привести к тому, что будут найдены те различия в них, которые окажутся очень важными в прогностической практике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шишкин Н. С. О прогнозе гроз и ливней по методу слоя. Метеорол. и гидрол., № 8, 1957.
2. Парамонов Н. А. Состояние электрического поля в грозовой и предгрозовой периоды в Высокой Дубраве. Сб. докл. V межведомственной конференции по вопросам исследования облаков, осадков и грозового электричества. Гидрометеониздат, Л., 1957.
3. Двали Е. Р. Электрическое поле атмосферы во время осадков. Труды ГГО, вып. 58, 1956.
4. Имянитов И. М., Кулик М. М., Чуваев А. П. Опыт исследования грозовых зон в южных районах Европейской территории Союза ССР и в Закавказье. Труды ГГО, вып. 67, 1957.
5. Анкиев Н. С. Электрические заряды дождевых капель и снежинок. Метеорол. и гидрол., № 4, 1951.

6. Колоколов В. П., Семенов К. А. Об электрической структуре облаков, дающих ливневые осадки. Труды ГГО, вып. 110, 1960.
7. Колоколов В. П., Семенов К. А. Измерение заряда дождя в Воейково в 1958 г. Труды ГГО, вып. 97, 1960.
8. Мучник В. М. Исследование электризации капель при разрушении в электрическом поле. Метеорол. и гидрол., № 4, 1949.
9. Мучник В. М. Связь грозообразования с интенсивностью осадков. Метеорол. и гидрол., № 9, 1957.
10. Котов Н. Ф. Радиолокационные характеристики ливней и гроз. Труды ГГО, вып. 102, 1960.
11. Kuttner. The electrical and meteorological conditions inside thunderclouds. Journ. of Meteorol., 7, No 5, 1950.
12. Norinder, Sirkna. Ionic density of the atmosphere air near ground during thunderstorm conditions. Archiv Geophysic, No 5—6, 1953.

## ЗАВИСИМОСТЬ ВРЕМЕНИ И СКОРОСТИ ДИФФУЗИОННОЙ ПЕРЕГОНКИ ОТ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАКА

В статье рассматривается перегонка водяного пара с капель переохлажденной воды на частицы льда. Выведено выражение для времени протекания процесса, зависящее только от входных данных. Исследована зависимость скорости перегонки от объемной концентрации влаги и льда и соотношения масс различных фаз воды в облаке. Указаны оптимальные условия осадкообразования.

### 1. Постановка задачи

Процесс роста ледяных частиц предшествует выпадению осадков из облаков смешанного строения. Увеличение размеров льдинок происходит главным образом вследствие диффузионной перегонки пара с капель переохлажденной воды на кристаллы льда и за счет гравитационной коагуляции этих кристаллов [1], [3]. Решающее значение для роста сферических ледяных частиц с радиусами порядка  $10^{-6}$ — $10^{-3}$  см имеет процесс перегонки [3].

Задача о диффузионной перегонке в трехфазной системе лед — вода — пар при конечном соотношении объемных концентраций капель и твердых частиц была исследована в работах [1] и [2]<sup>1</sup>. Рассмотрим пространственно однородное, монодисперсное облако, считая капли и частицы сферами, а процесс перегонки изотермичным. Подробный анализ показывает допустимость этих предположений при расчете кинетики процесса перегонки в первом приближении [1]. Искомые функции времени  $t$  следующие:  $a = a(t)$  — радиус капли,  $b = b(t)$  — радиус частицы и  $c = c(t)$  — плотность пара. Они представляют собой решение задачи Коши для системы трех нелинейных дифференциальных уравнений [1]:

$$\frac{dc}{dt} = 4\pi D n_a a (c_a - c) + 4\pi D n_b b (c_b - c), \quad (1)$$

$$\rho_a a \frac{da}{dt} = D (c - c_a), \quad (2)$$

$$\rho_b b \frac{db}{dt} = D (c - c_b), \quad (3)$$

$$a(0) = a_0, \quad b(0) = b_0, \quad c(0) = c_a. \quad (4)$$

Здесь  $D$  — коэффициент диффузии пара в воздухе,  $\rho_a$  и  $\rho_b$  — плотности жидкой и твердой фаз,  $n_a$  и  $n_b$  — объемные концентрации капель и

<sup>1</sup> Для краткости облачную влагу в жидкой фазе будем называть каплями, в твердой фазе — частицами.

частиц,  $c_a$  и  $c_b$  — значения плотности паров, насыщающих жидкую и твердую фазы, причем

$$\Delta c = c_a - c_b > 0. \quad (5)$$

Все рассуждения проводятся для объема 1 см<sup>3</sup>. Численный анализ решения задачи Коши (1) — (4) показывает, что в реальных условиях радиусы капель и частиц (практически в течение всего процесса) имеют порядок не менее 10<sup>-4</sup> см [2]. Отсюда следует, что можно не учитывать влияние кривизны поверхности капель и частиц на плотности насыщающих паров  $c_a$  и  $c_b$ , т. е. значения  $c_a$  и  $c_b$  постоянны в рассматриваемом изотермическом процессе [5]. Частицы начинают расти, если их диаметры превышают некоторые критические значения, зависящие от температуры. Эти критические диаметры находятся по (3) с учетом формулы Томсона (критические диаметры ледяных частиц приведены в табл. IX, [3]). Будем считать, что начальные размеры частиц близки к критическим. В этом случае при вычислении времени и скорости процесса перегонки значениями  $b(0) = b_0$  можно пренебречь и ниже будем считать, что

$$b_0 = 0. \quad (6)$$

Время конца  $T_*$  определяется из уравнения

$$c(T_*) = c_b. \quad (7)$$

Обозначим:

1) массу жидкой фазы  $q_a(t)$ , массу твердой фазы  $q_b(t)$ ,

$$q_a(t) = \frac{4}{3} \pi \rho_a n_a a^3(t), \quad q_b(t) = \frac{4}{3} \pi \rho_b n_b b^3(t). \quad (8)$$

Согласно [1], имеет место

$$c(t) + q_a(t) + q_b(t) = M, \quad (9)$$

где  $M$  — полный запас вещества во всех трех фазах — определяется по начальным данным

$$M = c_a + q_a(0); \quad (10)$$

2) наибольшее возможное количество твердой фазы  $q_*$  и наибольший возможный радиус частиц  $b_*$ , получающиеся в результате перегонки. Тогда

$$q_* = M - c_b, \quad b_* = \left( \frac{q_*}{\frac{4}{3} \pi \rho_b n_b} \right)^{\frac{1}{3}}; \quad (11)$$

3) безразмерные параметры  $\Delta$ ,  $\nu$  и безразмерный коэффициент  $x = x(t)$ , смысл которых ясен из определений:

$$\Delta = \left( \frac{M - c_a}{M - c_b} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad 0 < \Delta < 1, \quad (12)$$

$$\nu = \frac{n_b}{n_a}, \quad (13)$$

$$x(t) = \frac{b^2(t)}{b_*^2}, \quad 0 \leq x \leq 1. \quad (14)$$

Параметры  $\Delta$  и  $\nu$  известны заранее. Отметим, что  $\Delta$  зависит от начальной влажности облака и от  $\Delta c$  — количества пара, избыточного отно-

сительно льда; значение  $\Delta c$  определяется температурой облака (табл. 10 в [4]).

Так как

$$\Delta^{\frac{3}{2}} = \frac{q_a(0)}{q_a(0) + \Delta c}, \quad (15)$$

то  $\Delta$  фактически определяется отношением  $\frac{\Delta c}{q_a(0)}$ .

## 2. Две стадии процесса перегонки

Строгий анализ задачи Коши (1)–(4), проведенный в [2], показывает, что кинетика процесса перегонки определяется значениями параметров  $\Delta$  и  $\nu$ . За время перегонки в твердую фазу переходит масса вещества

$$q_* = q_a(0) + \Delta c, \quad (16)$$

где  $q_a(0)$  — начальное количество жидкой фазы,  $\Delta c$  — количество избыточного пара относительно твердой фазы. Процесс перекачки разбивается на две стадии [2]. Первая (трехфазная) стадия характеризуется полным испарением жидкой фазы; кинетика этой стадии рассчитывается с помощью табл. 1 [2]<sup>1</sup>.

Обозначим время трехфазной стадии через  $T$ . Значения искомых функций в конце трехфазной стадии определяются с помощью безразмерного коэффициента [см. (14)]

$$x_1 = x(T), \quad \Delta < x_1 < 1, \quad (17)$$

отыскиваемого по табл. 2 [2]. Имеет место

$$\left. \begin{aligned} a(T) &= 0, \quad \text{причем } a(t) > 0 \quad \text{при } t < T \\ b(T) &= b_* x_1^{\frac{1}{2}}, \quad q_b(T) = q_* x_1^{\frac{3}{2}} \\ c(T) &= M - q_* x_1^{\frac{3}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$T = \frac{\rho_a a_0^2 + \rho_b b_*^2 x_1}{2D\Delta c}. \quad (19)$$

Вторая (безжидкостная) стадия характеризуется перекачкой в твердую фазу остатка избыточного пара:

$$\Delta_1 c = c(T) - c_b = q_* \left( 1 - x_1^{\frac{3}{2}} \right), \quad 0 < \Delta_1 c < \Delta c. \quad (20)$$

Время второй стадии будем отсчитывать от момента  $T$

$$\tau = t - T \quad (21)$$

и положим

$$z(\tau) = x(T + \tau), \quad 0 < x_1 \leq z(\tau) \leq 1 \quad (\tau \geq 0). \quad (22)$$

<sup>1</sup> Отметим, что окончательная относительная ошибка, возникающая при вычислении по предложенной схеме, не превосходит 5–10%. Все дальнейшие заключения справедливы соответственно в пределах указанной точности.

Кинетика безжидкостной стадии рассчитывается по формулам [2]:

$$b(\tau) = b_* z^{\frac{1}{2}}(\tau), \quad q(\tau) = q_* z^{\frac{3}{2}}(\tau), \quad c(\tau) = M - q_* z^{\frac{3}{2}}(\tau), \quad (23)$$

где  $z = z(\tau)$  — решение задачи Коши

$$\frac{dz}{1 - z^{\frac{3}{2}}} = \omega d\tau, \quad z|_{\tau=0} = x_1, \quad (24)$$

$$\omega = \frac{8}{3} \pi D n_b b_*. \quad (25)$$

В силу (22)  $1 - z^2 > 1 - z^{\frac{3}{2}} > 1 - z > 0$  при  $\tau \geq 0$ ; интегрируя (24) с учетом этих неравенств, получаем

$$1 - (1 - x_1) e^{-\omega\tau} \leq z(\tau) \leq 1 - \frac{(1 - x_1) e^{-\omega\tau}}{ch\omega\tau + x_1 sh\omega\tau}, \quad \tau \geq 0. \quad (26)$$

Обе оценки  $z(\tau)$  монотонно растут вместе с  $\tau$ , причем из (26) вытекает, что  $z(0) = x_1$  и  $z(\infty) = 1$  (из последнего равенства следует, что безжидкостная стадия длится бесконечно долго). Перепишем (26) в виде

$$z(\tau) = 1 - (1 - x_1) e^{-\omega\tau} \theta(\tau, x_1), \quad \tau \geq 0, \quad (27)$$

где

$$\theta(0, x_1) = 1, \quad 1 \geq \theta(\tau, x_1) \geq 1 - \frac{1}{ch\omega\tau + x_1 sh\omega\tau}, \quad (28)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x_1} \approx 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \approx 0 \quad (29)$$

при малых  $\omega\tau$ .

При больших  $\omega\tau$  множитель  $e^{-\omega\tau}$  мал и  $z(\tau) \approx 1$  не зависит от  $\theta(\tau, x_1)$ . Расчеты показывают, что можно полагать

$$\tau = \frac{1}{\omega} \ln \frac{1 - x_1}{1 - z(\tau)}, \quad (30)$$

учитывая, что относительная погрешность этой формулы при определении  $\tau$  отрицательна и практически для всех  $z$  и  $x_1$  не превосходит 5—10% (см сноску к стр. 70).

*Замечание.* Конкретные численные расчеты удобно производить по формулам:

$$z(\tau) = 1 - (1 - x_1) e^{-\omega\tau} + r(\tau), \quad \tau \geq 0, \quad (31)$$

$$r(\tau) = \frac{(1 - x_1) e^{-\omega\tau}}{2} \left( 1 - \frac{1}{ch\omega\tau + x_1 sh\omega\tau} \right). \quad (32)$$

Отметим, что функция  $r(\tau)$  представляет собой одновременно максимальную абсолютную погрешность формулы (31). Соответствующие формулы из [2] для расчета кинетики безжидкостной стадии менее удобны.

### 3. Полное время процесса перегонки

За счет безжидкостной стадии масса вещества  $q_*$  перегоняется в твердую фазу бесконечно долго. Однако любое количество твердой фазы, меньшее  $q_*$ , образуется в течение конечного промежутка времени. Определим время безжидкостной стадии  $T_b \geq 0$  из условия

$$q_b(\Gamma + T_b) = x^{\frac{3}{2}} q_*, \quad x_b < 1 \quad (33)$$

и в качестве полного времени перегонки (его снова обозначаем  $T_*$ ) примем

$$T_* = T + T_b. \quad (34)$$

Это физически совершенно естественное определение вносит некоторые осложнения в рассматриваемую схему. В частности, значения  $x_1 > x_b$  приходится относить за счет неточности вычислений и при  $x_1 \geq x_b$  пренебрегать наличием безжидкостной стадии. Таким образом, учитывая (23) и (30), принимаем

$$T_b = \begin{cases} \frac{1}{\omega} \ln \frac{1-x_1}{1-x_b}, & \text{если } x_1 < x_b \\ 0, & \text{если } x_1 \geq x_b \end{cases} \quad (35)$$

Согласно (19), (34) и (35), явная зависимость полного времени перегонки от параметров задачи дается формулой

$$T_* = \gamma \left[ \frac{\rho_a}{\rho_b} \left( \frac{a_0}{b_*} \right)^2 + x_1 + \varepsilon \ln \frac{1-x_1}{1-x_b} \right], \quad x_b \geq x_1, \quad (36)$$

где

$$\gamma = \frac{\rho_b b_*^2}{2D\Delta c}, \quad (37)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta c}{q_*} = 1 - \Delta^{\frac{3}{2}}. \quad (38)$$

В силу (10) и (11)

$$n_b b_*^3 = \frac{M - c_b}{\frac{4}{3} \pi \rho_b}, \quad n_a a_0^3 = \frac{M - c_a}{\frac{4}{3} \pi \rho_a}. \quad (39)$$

Учитывая (12), имеем

$$\left( \frac{a_0}{b_*} \right)^2 = \left( \frac{n_b}{n_a} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{\rho_b}{\rho_a} \right)^{\frac{2}{3}} \Delta. \quad (40)$$

Введем поправку на плотность

$$\varepsilon_n = \left( \frac{0,9\rho_a}{\rho_b} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (41)$$

где  $\varepsilon_n = 1$ , если  $\rho_a = 1$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho_b = 0,9$  г/см<sup>3</sup>. Используя (40) и (41), перепишем выражение (36) в виде

$$T_* = \gamma \left[ 1,036\Delta \left( \frac{\varepsilon_n n_b}{n_a} \right)^{\frac{2}{3}} + x_1 + \varepsilon \ln \frac{1-x_1}{1-x_b} \right], \quad x_b \geq x_1. \quad (42)$$

В силу (17) имеет место тождество

$$\frac{\varepsilon}{1-x_1} - 1 = \frac{x_1 - \Delta^{\frac{3}{2}}}{1-x_1} > 0. \quad (43)$$

Из физического смысла  $x_1$  (18) и из

$$\frac{\partial T_*}{\partial x_1} = \gamma \left( 1 - \frac{\varepsilon}{1-x_1} \right) < 0 \quad (44)$$

вытекает важное следствие: скорость роста массы частиц в течение безжидкостной стадии меньше, чем за время трехфазной стадии.

<sup>1</sup> При образовании осадков значение  $\gamma$  обычно порядка 10<sup>2</sup> сек.

Значение  $x_1 = x(T)$  определяется по  $\Delta$  и  $v$  с помощью табл. 2 [2]. Математическая обработка данных этой таблицы позволяет дать явное выражение зависимости  $x_1$  от  $\Delta$  и  $v$  ( $x_b \geq \Delta$ ):

$$x_1 = x_1(\Delta, v) = \Delta + \max \left\{ 0, \min \left[ x_b - \Delta, \frac{\lg v' + 2}{4} (1 - \Delta^2) \right] \right\}, \quad (45)$$

$$v' = v \varepsilon_{\pi}. \quad (46)$$

Рассмотрим уравнение

$$\Delta + \frac{\lg v'_0 + 2}{4} (1 - \Delta^2) = x_b, \quad (47)$$

$$v'_0 \equiv \frac{n_b \varepsilon_{\pi}}{n_0} = \varphi^{-1}(\Delta).$$

В силу (45) и (47) область  $K$  (рис. 1) — область отсутствия безжидкостной стадии (точнее, область  $T_b = 0$ ) — имеет вид

$$\begin{cases} \lg v' \geq 2 \frac{1 - \Delta}{1 + \Delta} - 4 \frac{1 - x_b}{1 - \Delta^2} = \lg v'_0, \\ \text{если } 0 < \Delta < x_b \\ v' - \text{любое, если } x_b \leq \Delta < 1 \end{cases} \quad (48)$$

Учитывая точность рассматриваемой схемы при конкретных математических расчетах, будем полагать

$x_b^{\frac{3}{2}} = 0,95$  (соответственно  $x_b = 0,966$ ). Ниже считаем, если нет особых оговорок, что  $\Delta \leq x_b = 0,966$ .

Из (47) следует

$$n_0 = n_b \varepsilon_{\pi} \varphi(\Delta), \quad \varphi(\Delta) = \exp \left[ \frac{0,313}{1 - \Delta^2} - \frac{4,605(1 - \Delta)}{1 + \Delta} \right]. \quad (49)$$

Согласно (45) и (49),

$$x_1 = \begin{cases} 0,966, & \text{если } 0 < n_a \leq n_0 \\ \Delta + \frac{\lg n_b - \lg n_a + 2 + \lg \varepsilon_{\pi}}{4} (1 - \Delta^2), & \text{если } n_0 \leq n_a \leq 100 n_b \varepsilon_{\pi} \\ \Delta, & \text{если } n_a \geq 100 n_b \varepsilon_{\pi} \end{cases} \quad (50)$$

И, наконец, по (42) с учетом (50)

$$T_* = \begin{cases} \gamma \left[ 1,036 \Delta \left( \frac{\varepsilon_{\pi} n_b}{n_a} \right)^{\frac{2}{3}} + 0,966 \right], & 0 < n_a \leq n_0 \\ \gamma \left[ 1,036 \Delta \left( \frac{\varepsilon_{\pi} n_b}{n_a} \right)^{\frac{2}{3}} + x_1 + \varepsilon_{\pi} \ln(1 - x_1) + 3,381 \varepsilon \right], & n_0 \leq n_a \leq 100 n_b \varepsilon_{\pi} \\ \gamma \left[ 1,036 \Delta \left( \frac{\varepsilon_{\pi} n_b}{n_a} \right)^{\frac{2}{3}} + \Delta + \varepsilon_{\pi} \ln(1 - \Delta) + 3,381 \varepsilon \right], & n_a \geq 100 n_b \varepsilon_{\pi} \end{cases} \quad (51)$$

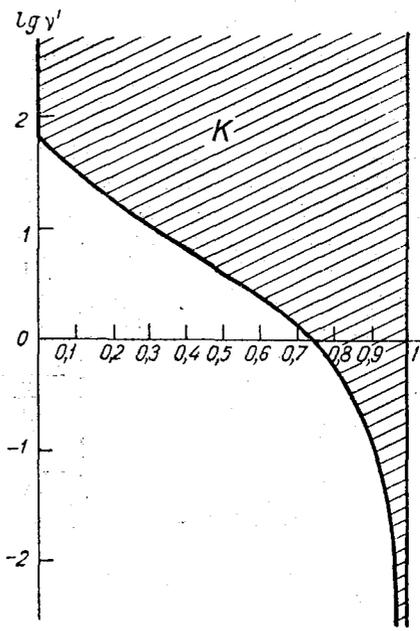


Рис. 1. Область  $K$  отсутствия безжидкостной стадии при  $x_b = 0,966$ .

Функция  $T_*$ , как и функция  $x_1$ , непрерывна по всем аргументам. Время  $T_*$  отыскивается по (50) и (51) с большой точностью, так как погрешности формул (35) и (45) взаимно компенсируются.

#### 4. Зависимость времени перегонки от размеров капель и частиц

При рассмотрении изотермического процесса перегонки предполагаем постоянными  $D$ ,  $\rho_a$ ,  $\rho_b$ ,  $c_a$  и  $c_b$ . Различные трехфазные системы естественно сравнивать между собой при одном и том же количестве вещества  $M$ . Будем считать, что  $M$  и температура фиксированы. В этом случае постоянны  $\Delta$  (12),  $\varepsilon$  (38), а также  $n_b b^3$  и  $n_a a_0^3$  (39).

Исследуем поведение  $\dot{T}_* = T_*(n_b)$ . Увеличение числа частиц  $n_b$  приводит к увеличению площади общей поверхности частиц и к уменьшению доли массы т. ф., получаемой в течение безжидкостной стадии. Обе эти причины вызывают уменьшение времени процесса (ср. следствие п. 3). Докажем это строго математически. При изучении зависимости  $T_* = T_*(n_b)$  следует предполагать  $n_b b^3 = \text{const}$ , а все остальные параметры — закрепленными. Согласно (37), (39) и (51),

$$\mu_1 T_*(n_b) - \mu_2 = \begin{cases} \frac{0,966}{n_b^3}, & 0 < n_a \leq n_0 \\ \frac{1}{n_b^3} [x_1 + \varepsilon \ln(1 - x_1) + 3,381\varepsilon], & n_0 \leq n_a \leq 100n_b \varepsilon_{II} \\ \frac{1}{n_b^3} [\Delta + \varepsilon \ln(1 - \Delta) + 3,381\varepsilon], & n_a \geq 100n_b \varepsilon_{II} \end{cases} \quad (52)$$

где

$$\mu_1 = \frac{2 \left( \frac{4}{3} \pi \right)^{\frac{2}{3}} D \Delta c}{\rho_b^{\frac{2}{3}} q_*^{\frac{2}{3}}}, \quad \mu_2 = 1,036 \Delta \left( \frac{\varepsilon_{II}}{n_a} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (53)$$

не зависят от  $n_b$ , а  $x_1$  задается формулой (50). В силу (43) и  $\frac{\partial x_1}{\partial n_b} > 0$  при любом  $n_b$  имеет место

$$\frac{\partial T_*}{\partial n_b} < 0, \quad (54)$$

что и требовалось доказать.

Исследуем поведение  $T_* = T_*(n_a)$ . Рост числа капель приводит к возрастанию площади испаряющейся поверхности и к увеличению доли массы твердой фазы, получаемой в течение безжидкостной стадии. Первая причина вызывает уменьшение времени процесса, а вторая — увеличение его (ср. следствие п. 3). Таким образом,  $T_*(n_a)$ , в отличие от  $T_*(n_b)$ , не обязательно должна быть монотонно убывающей функцией для всех значений  $n_a$ .

Так как за время всего процесса  $T_*$  в твердую фазу переходит масса вещества, равная  $0,95[q_a(0) + \Delta c]$ , в том числе за безжидкостную стадию меньше, чем  $\Delta_1 c$ , то роль второй причины растет с уменьшением  $\Delta$ . Далее, функция  $T_*(n_a)$  убывает с ростом  $n_a$ , если  $v' \leq 10^{-2}$  ( $n_a$  боль-

шие) или  $v' \geq \varphi^{-1}(\Delta)$  ( $n_a$  малые). Это объясняется тем, что: 1) при  $n_a$  больших в твердую фазу за время безжидкостной стадии переходит одна и та же масса вещества, примерно равная  $\Delta \epsilon$  (независимо от  $n_a$ ), т. е. вторая причина перестает оказывать влияние, в то время как первая действует, хотя и слабо; 2) при  $n_a$  малых действует только первая причина.

Отсюда следует, что  $T_*(n_a)$  при малых  $n_a$  уменьшается быстро, а при больших  $n_a$  медленно. Исследуем строго математически зависимость  $T_*(n_a)$  при различных значениях  $\Delta$ , предполагая  $n_a a_0^3 = \text{const}$ , а все остальные параметры фиксированными. Введем в (51) для удобства новую переменную

$$y = \left[ \frac{n_a}{n_b \epsilon_n \varphi(\Delta)} \right]^{\frac{2}{3}}, \quad n_a = n_b \epsilon_n \varphi(\Delta) y^{\frac{3}{2}}. \quad (55)$$

Имеем

$$\frac{1}{\gamma} T_*(y) = \begin{cases} \frac{\epsilon_1(\Delta)}{y} + 0,966, & 0 < y \leq 1 \\ \frac{\epsilon_1(\Delta)}{y} + x_1 + \epsilon \ln(1 - x_1) + 3,381\epsilon, & 1 \leq y \leq \psi(\Delta) \\ \frac{\epsilon_1(\Delta)}{y} + \Delta + \epsilon \ln(1 - \Delta) + 3,381\epsilon, & y \geq \psi(\Delta) \end{cases} \quad (56)$$

$$\epsilon_1(\Delta) = \frac{1,036\Delta}{\varphi^{\frac{2}{3}}(\Delta)}, \quad \psi(\Delta) = \frac{10^{\frac{4}{3}}}{\varphi^{\frac{2}{3}}(\Delta)}. \quad (57)$$

На основании (47), (50) и (55) безразмерный коэффициент  $x_1$  в (56) следует вычислять по формуле

$$x_1 = 0,966 - \epsilon_2(\Delta) \lg y, \quad \epsilon_2(\Delta) = 0,375(1 - \Delta^2). \quad (58)$$

Из формулы (56) непосредственно следует, что  $T_*(y)$  монотонно убывает при  $y \leq 1$  ( $n_a \leq n_0$ ) и при  $y \geq \psi(\Delta)$  ( $n_a \geq 100n_b \epsilon_n$ ). Отметим, что разность между

$$\frac{1}{\gamma} T_*[\psi(\Delta)] = \frac{\epsilon_1(\Delta)}{\psi(\Delta)} + \Delta + \epsilon \ln(1 - \Delta) + 3,381\epsilon$$

и

$$\frac{1}{\gamma} T_*(\infty) = \Delta + \epsilon \ln(1 - \Delta) + 3,381\epsilon$$

составляет 2—3% от  $\frac{1}{\gamma} T_*[\psi(\Delta)]$ , т. е. уменьшение времени процесса с увеличением  $n_a$  для  $n_a > 100n_b \epsilon_n$  практически ничтожно.

При  $1 \leq y \leq \psi(\Delta)$  ( $n_0 \leq n_a \leq 100n_b \epsilon_n$ )

$$\frac{\partial T_*}{\partial y} = -\frac{\gamma}{y} \left[ \frac{\epsilon_1(\Delta)}{y} - \left( \frac{\epsilon}{1 - x_1} - 1 \right) \frac{\epsilon_2(\Delta)}{\ln 10} \right] \quad (59)$$

в силу (43) и (58) представляет собой разность положительных убывающих функций  $y$  и потому может иметь разные знаки в зависимости от  $\Delta$ .

Строгий анализ выражения (59) показывает: а) если  $\Delta \leq 0,45$ , то функция  $T_*(y)$  растет при всех  $1 \leq y \leq \psi(\Delta)$ ; б) если  $0,45 < \Delta \leq 0,68$ , то функция  $T_*(y)$  растет при  $1 \leq y \leq y_{\max}$  и  $y_{\min} \leq y \leq \psi(\Delta)$  и убывает при  $y_{\max} \leq y \leq y_{\min}$ ; таким образом,  $T_*(y)$  достигает максимума в  $y = y_{\max}$  и минимума в  $y = y_{\min}$ ; в) если  $0,68 < \Delta \leq 0,966 = x_b$ , то функция  $T_*(y)$  убывает при всех  $1 \leq y \leq \psi(\Delta)$ .

Отсюда следует, в частности, что при  $y=1$  функция  $T_*(y)$  имеет минимум для  $\Delta \leq 0,68$ . Минимум  $T_*(y)$  при  $y=1$  имеет место при любом  $\Delta < 1$ , если значение  $x_b$  взять достаточно близким к единице (он сглаживается по мере увеличения  $\Delta$ ). С ростом  $\Delta$  уменьшается участок  $[1, \psi(\Delta)]$  нестрогого убывания  $T_*(y)$ , причем  $\psi(\Delta) \rightarrow 1$  при  $\Delta \rightarrow x_b$ .

В табл. 1 (для  $\Delta=0,1$  (0,1) 0,4; 0,4 (0,02) 0,7; 0,8; 0,9;  $x_b=0,966$ ) приведены значения функции  $\frac{1}{\gamma} T_*(y)$  при  $y=1$ ,  $y=\psi(\Delta)$ ,  $y=\infty$ , а также (если эти значения существуют) при  $y_{\max}$  и  $y_{\min}$ . Таким образом, табл. 1 дает возможность определить характер поведения  $T_*(n_a)$  при

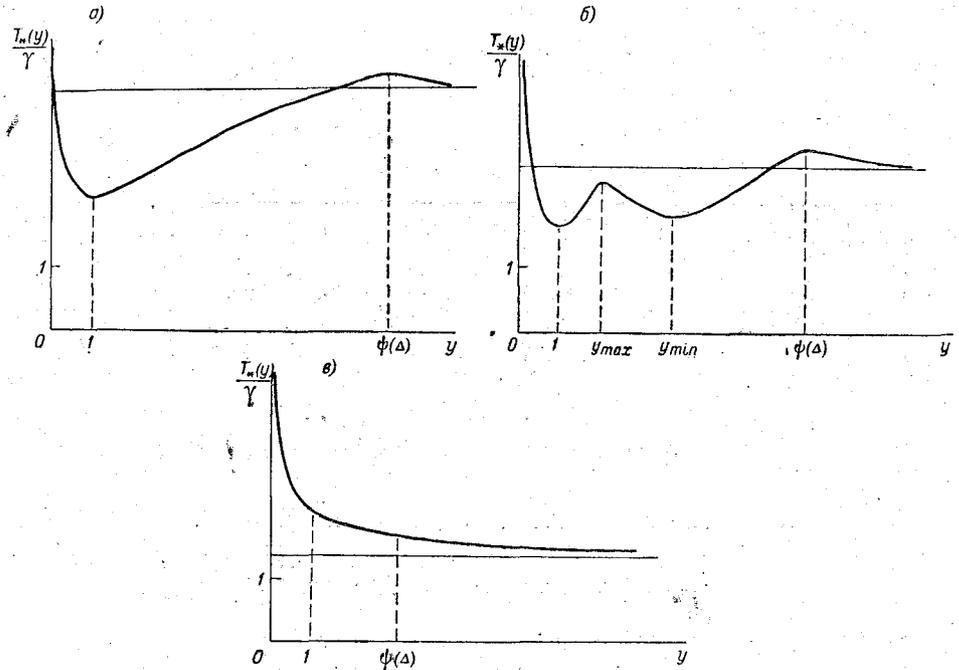


Рис. 2. Характер зависимости  $T_*(n_a)$  при различных  $\Delta$ .

а)  $\Delta \leq 0,45$ , б)  $0,45 < \Delta \leq 0,68$ , в)  $0,68 < \Delta \leq 0,966 = x_b$ .

различных значениях параметра  $\Delta$ . Предположим, что размах  $T_*(y)$  и  $\inf T_*(y)$  при  $y \geq 1$  ( $n_a \geq n_0$ ) соответственно равны  $W(\Delta)$  и  $\tau_\Delta$ . Тогда: а)  $W(\Delta) \approx 20-60\%$   $\tau_\Delta$  ( $\Delta \leq 0,45$ ), б)  $W(\Delta) < 12\%$   $\tau_\Delta$  ( $0,45 < \Delta \leq 0,68$ ), в)  $W(\Delta) \approx 20-30\%$   $\tau_\Delta$  ( $0,68 < \Delta \leq x_b$ ). Наиболее типичные случаи поведения  $T_*(n_a)$  представлены на рис. 2 а, б, в.

## 5. Вычислительная схема

Для рассматриваемого изотермического процесса перегонки входными данными являются величины:

$$a(0) = a_0, \quad b(0) = 0, \quad \rho_a, \rho_b, c_a, c_b, D, n_a, n_b. \quad (60)$$

Время процесса  $T_*$  ( $x_b=0,966$ ) удобно рассчитывать по формулам (55)–(58). Для облегчения вычислений и оценок физических величин, характеризующих процесс, составлены табл. 1 и 2. Исходным параметром этих таблиц является безразмерная величина  $\Delta$ .

Таблица 1

| $\Delta$      | $\frac{q_a(0)}{\Delta c}$ | $\varepsilon$ | $\varphi(\Delta)$ | $\psi(\Delta)$ | $\frac{0,95q_*}{\Delta c}$ | $\varepsilon_1(\Delta)$ | $\varepsilon_2(\Delta)$ | $\frac{T_*(1)}{\gamma}$ | $\frac{T_*(y_{max})}{\gamma}$     | $\frac{T_*(y_{min})}{\gamma}$  | $\frac{T_*[\psi(\Delta)]}{\gamma}$ | $\frac{T_*(\infty)}{\gamma}$ | $\frac{\varepsilon_n/\gamma}{b_*}$ | $n_b$ |
|---------------|---------------------------|---------------|-------------------|----------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|-------|
| 0,10          | 0,033                     | 0,968         | 0,032             | 215,0          | 0,98                       | 1,04                    | 0,371                   | 2,04                    | Функция<br>$T_*(y)$<br>возрастает | 3,28                           | 3,27                               | 3,27                         | 0,961                              | 1,41  |
| 0,20          | 0,098                     | 0,911         | 0,065             | 133,0          | 1,04                       | 1,28                    | 0,360                   | 2,28                    |                                   | 3,09                           | 3,08                               | 3,08                         | 1,07                               | 1,49  |
| 0,30          | 0,198                     | 0,835         | 0,118             | 89,7           | 1,14                       | 1,30                    | 0,341                   | 2,27                    |                                   | 2,84                           | 2,83                               | 2,83                         | 1,08                               | 1,63  |
| 0,40          | 0,337                     | 0,748         | 0,202             | 62,4           | 1,27                       | 1,20                    | 0,315                   | 2,16                    |                                   | 2,57                           | 2,55                               | 2,55                         | 1,04                               | 1,82  |
| 0,42          | 0,374                     | 0,728         | 0,221             | 58,8           | 1,30                       | 1,19                    | 0,308                   | 2,15                    | $1 \leq y \leq \psi(\Delta)$      | 2,50                           | 2,48                               | 2,48                         | 1,03                               | 1,87  |
| 0,44          | 0,411                     | 0,709         | 0,247             | 54,7           | 1,34                       | 1,16                    | 0,302                   | 2,14                    |                                   | 2,45                           | 2,43                               | 2,43                         | 1,02                               | 1,92  |
| 0,46          | 0,454                     | 0,688         | 0,273             | 51,0           | 1,38                       | 1,13                    | 0,295                   | 2,12                    | 2,34                              | 2,33                           | 2,38                               | 2,36                         | 1,01                               | 1,98  |
| 0,48          | 0,500                     | 0,667         | 0,298             | 47,9           | 1,43                       | 1,11                    | 0,288                   | 2,08                    | 2,28                              | 2,27                           | 2,32                               | 2,30                         | 0,998                              | 2,04  |
| 0,50          | 0,546                     | 0,647         | 0,330             | 45,1           | 1,47                       | 1,09                    | 0,281                   | 2,07                    | 2,24                              | 2,22                           | 2,26                               | 2,23                         | 0,985                              | 2,11  |
| 0,52          | 0,600                     | 0,625         | 0,361             | 42,5           | 1,52                       | 1,09                    | 0,274                   | 2,04                    | 2,18                              | 2,17                           | 2,20                               | 2,17                         | 0,976                              | 2,18  |
| 0,54          | 0,659                     | 0,603         | 0,391             | 40,3           | 1,58                       | 1,05                    | 0,265                   | 2,02                    | 2,14                              | 2,11                           | 2,14                               | 2,11                         | 0,969                              | 2,26  |
| 0,56          | 0,721                     | 0,581         | 0,432             | 37,2           | 1,64                       | 1,02                    | 0,257                   | 1,97                    | 2,08                              | 2,05                           | 2,07                               | 2,04                         | 0,950                              | 2,34  |
| 0,58          | 0,792                     | 0,558         | 0,468             | 35,7           | 1,71                       | 1,00                    | 0,249                   | 1,96                    | 2,05                              | 1,98                           | 2,02                               | 1,99                         | 0,947                              | 2,44  |
| 0,60          | 0,869                     | 0,535         | 0,517             | 33,4           | 1,78                       | 0,964                   | 0,240                   | 1,96                    | 2,00                              | 1,87                           | 1,95                               | 1,92                         | 0,931                              | 2,55  |
| 0,62          | 0,948                     | 0,513         | 0,566             | 31,5           | 1,85                       | 0,939                   | 0,231                   | 1,90                    | 1,96                              | 1,84                           | 1,88                               | 1,85                         | 0,919                              | 2,66  |
| 0,64          | 1,05                      | 0,488         | 0,619             | 29,6           | 1,94                       | 0,913                   | 0,221                   | 1,89                    | 1,92                              | 1,81                           | 1,82                               | 1,79                         | 0,905                              | 2,79  |
| 0,66          | 1,15                      | 0,465         | 0,677             | 27,9           | 2,05                       | 0,886                   | 0,211                   | 1,86                    | 1,88                              | 1,76                           | 1,76                               | 1,73                         | 0,893                              | 2,93  |
| 0,68          | 1,28                      | 0,438         | 0,746             | 26,1           | 2,17                       | 0,857                   | 0,202                   | 1,82                    | 1,83                              | 1,69                           | 1,69                               | 1,66                         | 0,878                              | 3,11  |
| 0,70          | 1,42                      | 0,414         | 0,820             | 24,5           | 2,30                       | 0,827                   | 0,191                   | 1,80                    | 1,83                              | Функция<br>$T_*(y)$<br>убывает | 1,64                               | 1,60                         | 0,863                              | 3,29  |
| 0,80          | 2,50                      | 0,286         | 1,430             | 16,8           | 3,32                       | 0,647                   | 0,135                   | 1,61                    | $1 \leq y \leq \psi(\Delta)$      | убывает                        | 1,34                               | 1,30                         | 0,763                              | 4,76  |
| 0,90          | 5,90                      | 0,145         | 4,100             | 8,4            | 6,55                       | 0,364                   | 0,071                   | 1,48                    | $1 \leq y \leq \psi(\Delta)$      | при<br>$\psi(x_b) = 1$         | 1,10                               | 1,06                         | 0,572                              | 9,40  |
| $x_b = 0,966$ | 19,00                     | 0,050         | 98,500            | 1,0            | 19,09                      | 0,047                   | 0,025                   | 1,00                    |                                   |                                | 1,00                               | $x_b$                        | 0,205                              | 27,23 |

В табл. 1 значение  $\Delta$  находится по отношению  $\frac{q_a(0)}{\Delta c}$ ; непосредственно по  $\Delta$  определяются  $\varepsilon$ ,  $\varphi(\Delta)$ ,  $\psi(\Delta)$ ,  $\frac{0,95q_*}{\Delta c}$ ,  $\varepsilon_1(\Delta)$ ,  $\varepsilon_2(\Delta)$ , а также значения функции  $\frac{1}{\gamma} T_*(y)$  при  $y=1$ ,  $\psi(\Delta)$ ,  $\infty$ ,  $y_{\max}$  и  $y_{\min}$  (см. п. 4).

Легко видеть, что (независимо от  $x_b$ ) справедливы формулы:

$$n_b = \frac{3\Delta c}{4\pi r_b b_*^3 \varepsilon}, \quad a_0 = \frac{b_*}{\varepsilon_{\Pi} \sqrt{y}} \sqrt[3]{\frac{0,9(1-\varepsilon)}{\varphi(\Delta)}}. \quad (61)$$

В табл. 1 приведены также значения  $\frac{\varepsilon_{\Pi} \sqrt{y}}{b_*} a_0$  и объемные концентрации облачных частиц  $n_b$  при  $t^{\circ} = -12^{\circ}$  и  $b_* = 35 \mu$  (соответственно  $b(T_*) = 34,4 \mu$ ).

Таблица 2

| $\Delta$ | $y_{\max}$ | $y_{\min}$ | $\psi(\Delta)$ | $\Delta$ | $y_{\max}$ | $y_{\min}$ | $\psi(\Delta)$ |
|----------|------------|------------|----------------|----------|------------|------------|----------------|
| 0,46     | 2,11       | 3,9        | 51,0           | 0,58     | 1,55       | 7,2        | 35,7           |
| 0,48     | 2,03       | 4,3        | 47,9           | 0,60     | 1,50       | 8,2        | 33,4           |
| 0,50     | 1,95       | 4,8        | 45,1           | 0,62     | 1,40       | 10,1       | 31,5           |
| 0,52     | 1,82       | 5,1        | 42,5           | 0,64     | 1,25       | 13,0       | 29,6           |
| 0,54     | 1,63       | 6,0        | 40,3           | 0,66     | 1,17       | 15,1       | 27,9           |
| 0,56     | 1,58       | 6,3        | 37,2           | 0,68     | 1,15       | 25,5       | 26,1           |

В табл. 2 приведены значения  $y_{\max}$ ,  $y_{\min}$  и  $\psi(\Delta)$  для тех  $\Delta$ , при которых действительно существуют значения

$$1 < y_{\max} < y_{\min} < \psi(\Delta) \quad (0,45 < \Delta \leq 0,68).$$

### б. Скорость процесса перегонки

Время  $T_*$ , вычисляемое по формуле (56), определяет продолжительность перегонки 95% твердой фазы по массе от всего количества твердой фазы, получаемого в результате рассматриваемого процесса. Поэтому значение  $T_*$  можно считать и критерием скорости перегонки трехфазной системы (критерий А). Однако критерий А во многих отношениях неудобен. В самом деле, им можно пользоваться только при постоянном значении  $M$ ; при разных  $x_1$  нужно «приводить»  $T_*$ , используя формулу (35), к одному и тому же  $x_b$ , где  $x_b$  не меньше значений  $x_1$  всех сравниваемых систем. От этих недостатков свободен критерий В трехфазной системы, также непосредственно определяемый по  $\Delta$  и  $v$ :

$$\xi = \frac{10^3 q_b(T)}{T} = \frac{10^3 x_1^{\frac{3}{2}}}{T} q_* \text{ г/см}^3 \text{сек.} \quad (62)$$

Очевидно, что система тем выгоднее, чем больше величина критерия В. Если рассматриваются системы при одинаковом общем количестве вещества, то критерий В удобнее применять в форме (критерий С)

$$\xi_* = \frac{10^3 x_1^{\frac{3}{2}}}{T} \text{ сек.}^{-1} \quad (63)$$

Физически критерии В и С соответствуют средней скорости процесса за время полной перекачки жидкой фазы.

Во всех рассмотренных ниже примерах будем считать, что перегонка происходит в облаке при  $t = -12^\circ$ , т. е.:

$c_a = 2,02 \text{ г/м}^3$ ,  $c_b = 1,80 \text{ г/м}^3$ , а разность  $\Delta c = 0,22 \text{ г/м}^3$  достигает наибольшего значения ([4], табл. 10);  $\rho_a = 1 \text{ г/м}^3$ ,  $\rho_b = 0,9 \text{ г/см}^3$ ,  $\varepsilon_n = 1$ ,  $D = 0,2 \text{ см}^2/\text{сек}$ . Предположим, что  $a_0 = 10 \mu$ .

*Пример 1.*  $q_a(0) = 1 \text{ г/м}^3$ , следовательно,  $\Delta = 0,876$ ,  $M = 3,02 \text{ г/м}^3$ ,  $q_* = 1,22 \text{ г/м}^3$ ,  $n_a = 239 \text{ см}^{-3}$ .

а)  $n_b = 12 \text{ см}^{-3}$ , тогда  $b_* = 30 \mu$ ,  $\nu = 0,05$ ,  $x_1 = 0,917$ ,  $T_* = 111 \text{ сек.}$ ,  $\xi_* = 9,25 \text{ сек.}^{-1}$ ;

б)  $n_b = 2 \text{ см}^{-3}$ , тогда  $b_* = 54,5 \mu$ ,  $\nu = 0,008 < 10^{-2}$ ,  $x_1 = \Delta = 0,876$ ,  $T_* = 376 \text{ сек.}$ ,  $\xi_* = 2,69 \text{ сек.}^{-1}$ .

*Пример 2:*  $q_a(0) = 0,2 \text{ г/м}^3$ , следовательно,  $\Delta = 0,610$ ,  $M = 2,22 \text{ г/м}^3$ ,  $q_* = 0,42 \text{ г/м}^3$ ,  $n_a = 48 \text{ см}^{-3}$ .

а)  $n_b = 192 \text{ см}^{-3}$ , тогда  $b_* = 8,33 \mu$ ,  $\nu = 4$ ,  $x_1 = x_b = 0,966$ ,  $T_* = 19 \text{ сек.}$ ,  $\xi_* = 52,63 \text{ сек.}^{-1}$ ;

б)  $n_b = 4 \text{ см}^{-3}$ , тогда  $b_* = 30,2 \mu$ ,  $\nu = 0,083$ ,  $x_1 = 0,754$ ,  $T_* = 169 \text{ сек.}$ ,  $\xi_* = 6,70 \text{ сек.}^{-1}$ .

*Пример 3.*  $q_a(0) = 0,1 \text{ г/м}^3$ , следовательно,  $\Delta = 0,460$ ,  $M = 2,12 \text{ г/м}^3$ ,  $q_* = 0,32 \text{ г/м}^3$ ,  $n_a = 24 \text{ см}^{-3}$ . Пусть  $n_b = 3 \text{ см}^{-3}$ , тогда  $b_* = 30,5 \mu$ ,  $\nu = 0,125$ ,  $x_1 = 0,518$  и  $T_* = 235 \text{ сек.}$ ,  $\xi_* = 6,11 \text{ сек.}^{-1}$ .

Значения критерия  $B$  для примеров № 1–3

| № задачи                         | 1а    | 1б   | 2а    | 2б   | 3    |
|----------------------------------|-------|------|-------|------|------|
| $\xi \text{ г/см}^3\text{сек}$ . | 11,30 | 3,28 | 22,17 | 2,81 | 1,96 |

### Заклучение

Кинетика процесса перегонки определяется значениями двух безразмерных параметров  $\Delta$  и  $\nu$ , физический смысл которых очевиден из (15) и (13). Процесс перегонки сопровождается перекачкой в твердую фазу массы вещества, равной  $q_*$  (16); этот процесс разбивается на трехфазную и безжидкостную стадию, причем последняя теоретически продолжается бесконечно долго. В качестве времени процесса определяется время  $T_*$ , в течение которого в твердую фазу перекачивается масса вещества  $q_* x_b^{\frac{3}{2}}$ ,  $x_b < 1$  (практически принимается  $x_b^{\frac{3}{2}} = 0,95$ )<sup>1</sup>. Непосредственное вычисление  $T_*$  удобно производить по формуле (56).

Скорость перегонки (отношение массы, перекаченной в твердую фазу, ко времени) в течение трехфазной стадии больше, чем за время безжидкостной стадии.

Безразмерный коэффициент  $x_1$ , определяемый формулой (45), характеризует относительную роль обеих стадий в образовании твердой фазы: с увеличением  $x_1$  уменьшается доля вещества, перекаченного в твердую фазу, за безжидкостную стадию. На рис. 1 заштрихована

область  $K$  полного отсутствия безжидкостной стадии при  $x_b^{\frac{3}{2}} = 0,95$ .

Время перекачки  $T_* \rightarrow 0$  при  $n_a, n_b \rightarrow \infty$  (если  $n_a \leq n_b$ ).

Скорость перекачки в облаке растет с увеличением объемной концентрации льда  $n_b$  (п. 4). Однако с ростом  $n_b$  уменьшается максимальный радиус льдинок  $b_*$  (11), получаемый в результате рассматриваемого процесса. Вместе с тем известно, что скорость роста сферических частиц льда за счет гравитационной коагуляции соизмерима со скоростью их роста из-за перегонки водяного пара с капель при  $b_* \geq 30 \mu$

<sup>1</sup> Иначе говоря, время конца процесса  $T_*$  определяется из уравнения  $c(T_*) = M - 0,95q_* > c_b$ .

[1], а коагуляционная скорость превосходит конденсационную при  $b_* \geq 40 \mu$  [3]. Если принять критическое  $b_*$  равным  $30 \mu$ , то условие на  $n_b$ , согласно (11), имеет вид

$$n_b \leq n_{b_{\max}} = 10(k_1 + k_2) \text{ см}^{-3}, \quad (64)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  — численно равны водности облака и разнице плотностей пара, насыщающих воду и лед, в  $\text{г/м}^3$  при  $t=0$ . Таким образом,  $n_{b_{\max}}$  определяется водностью и температурой облака.

Характер зависимости  $T_*$  от объемной концентрации капель воды  $n_a$  определяется величиной  $\Delta$  и имеет сравнительно сложный характер (п. 4). Отметим, что:

1) при  $\Delta$  порядка 0,6 и меньше наибольшая скорость процесса осадкообразования достигается при (49), (55)

$$n_a = n_{b_{\max}} \varepsilon_{\text{п}\varphi}(\Delta); \quad (65)$$

2) при  $\Delta \geq 0,7$  для увеличения скорости перекачки следует выбирать наиболее мелкокапельные облака. Так как для конкретных облачных спектров средний радиус капель может колебаться лишь в определенных пределах, то при выборе оптимального  $n_a$  в случае необходимости следует руководствоваться формулой (56) или табл. 1. В реальных условиях параметр  $\Delta$  порядка 0,3—0,4 и более; величина  $\frac{T_*}{\gamma}$  убывает с ростом  $\Delta > 0,3$  независимо от  $n_a$  и  $n_b$ , а время  $T_*$  убывает с ростом  $q_a(0)$  и  $\Delta c$ .

В заключение отметим, что указанная в [2] и в настоящей статье вычислительная схема позволяет быстро рассчитать для любого конкретного случая кинетику всего процесса перегонки. В самом деле, по  $\Delta$  и  $v'$  с помощью табл. 1 [2] определяются искомые функции времени  $a(t)$ ,  $b(t)$  и  $c(t)$  в течение трехфазной стадии процесса ( $0 \leq t \leq T$ ); функции  $b(\tau)$  и  $c(\tau)$  для безжидкостной стадии ( $\tau = t - T \geq 0$ ) находятся по формулам (23), (27). Существенно, что как время первой стадии, так и время всего процесса определяется непосредственно по начальным данным (19), (56), (58).

Автор выражает глубокую благодарность проф. К. С. Шифрину за предложенную тему и внимание к работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шифрин К. С. Кинетика образования осадков. Труды ГГО, вып. 31 (93), 1951.
2. Шифрин К. С., Перельман А. Я. Кинетика кристаллизации облаков. Изв. АН СССР, сер. геофизич., № 6, 1960.
3. Шишкин Н. С. Облака, осадки и грозное электричество. Гостехиздат, М., 1952.
4. Никандров В. Я. Искусственные воздействия на облака и осадки. Гидрометеоздат, Л., 1959.
5. Зверев А. С. и др. Курс метеорологии. Под ред. П. Н. Тверского. Гидрометеоздат, Л., 1951.

## ОБ АЭРОЗОЛЬНОЙ ТЕОРИИ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

В статье рассмотрены отдельные положения, выдвинутые для обоснования аэрозольной теории атмосферного электричества, при оценке которой особенно важную роль играет проверка результатов опытов в отношении зависимости зарядов капелек от величины водородного показателя рН. Указывается, что новые измерения, проведенные другим методом, позволяющим непосредственно измерять заряды отдельных капелек, не подтвердили зависимости, использованной для обоснования аэрозольной теории.

Для обоснования аэрозольной теории атмосферного электричества В. Д. Решетов, распространяя на все атмосферные аэрозоли коллоидно-химические представления, приписывает электрокинетическому потенциалу определяющую роль в отношении электрического заряда отдельных частиц [1]. Однако, следуя пути, намеченному Я. И. Френкелем, Решетов коренным образом изменяет исходные данные, утверждая на основании своих лабораторных опытов, что капельки в атмосфере имеют обычно не отрицательный, а положительный заряд [2]. Для оценки микрофизической части предложенной теории решающее значение имеет проверка полученной в результате этих опытов зависимости зарядов капелек от величины водородного показателя рН. Имеющиеся в статье [1] другие доводы в пользу аэрозольной теории и критика некоторых известных положений в ряде случаев не являются достаточно убедительными. Например, далеко идущие выводы из аналогии между вертикальным профилем напряженности электрического поля, плотности объемных зарядов и концентрации аэрозолей (ядер конденсации) могут быть оправданы только при наличии определенных количественных оценок. Между тем в работе [1] выводится только давно известная теоретическая формула для распределения концентрации аэрозолей и дается на рисунке несколько экспериментальных кривых без указания действительной величины коэффициентов в показательных формулах. Можно добавить, что изменение упругости водяного пара с высотой также приближенно описывается показательной формулой (Ганна), но это не говорит о какой-нибудь связи с электрическим полем.

Сопоставляя данные наземных измерений напряженности электрического поля  $E$  и проводимости воздуха  $\lambda$ , Решетов [1] на основании энергетических соображений утверждает, что объяснить изменение  $E$  за счет изменения  $\lambda$  можно только при выполнении условия

$$\left(\frac{E_2}{E_1}\right)^2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}. \quad (1)$$

Это условие было бы справедливым только в том случае, если бы результаты наземных наблюдений распространялись на всю толщу атмосферы. Для отдельных слоев нельзя требовать выполнения условия

(1); в частности, изменения  $E$ , вызванные изменением  $\lambda$  в нижнем слое атмосферы, связаны известным соотношением

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}, \quad (2)$$

которое фактически выполняется в примере, приведенном в работе [1]:  $\frac{E_2}{E_1} = 1,53$ ,  $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 1,58$ .

Переходя к результатам опытов, поставленных для проверки зависимости зарядов капелек от величины рН, напомним кратко, что данные о зарядах аэрозольных частиц, осевших на пластинах вертикального конденсатора; при этом можно было оценить только среднюю разность зарядов капель одного и другого знака. Из формулы (6) в работе [2], на основании которой вычислялся средний заряд капель

$$\frac{m_k - m_a}{m_k + m_a} = \frac{3v}{c}, \quad (3)$$

где  $m_k$  и  $m_a$  — массы всех капель, осевших на катоде и на аноде;  $v$  — скорость, приобретаемая капелькой в электрическом поле;  $c$  — тепловая скорость капельки, вытекает физически неоправданный вывод о сравнимости в условиях опыта этих скоростей ( $v$  и  $c$ ). Поэтому сделанные таким методом количественные оценки зависимости зарядов капель от величины рН имеют грубо ориентировочный характер.

Для получения более надежных данных заряды и размеры отдельных капель были измерены с помощью прибора ПЗК-1, описанного в статье [3]. Этот прибор применялся раньше как для лабораторных опытов, так и для измерений, в первую очередь зарядов капелек естественных туманов [4]. Капельки небольших размеров (радиусы которых находились в диапазоне примерно от 5 до 20 мк) получились в результате пульверизации различных водных растворов с определенными значениями рН, средний радиус равнялся 11 мк.

Всего было измерено около 1800 индивидуальных капелек. Зависимость средних (алгебраических) зарядов от величины рН представлена на рис. 1. Для сравнения на рис. 1 *a* приведена соответствующая кривая, полученная в работе [2]. Как видно на этом рисунке, данные Решетова не согласуются даже качественно с результатами измерений, проведенных другим методом; расхождение в знаках зарядов капель при рН > 5 не позволяет считать обоснованным предложенный в [1] набросок аэрозольной теории атмосферного электричества.

В качестве дополнительного результата проведенных опытов была получена оценка зависимости средних абсолютных значений зарядов капелек  $|\bar{q}|$  от их радиуса  $r$ , представляющая интерес для исследования механизма заряжения капелек (рис. 2). Аналитически эта зависимость выражается формулой

$$|\bar{q}| \approx 9r^{1.7} \approx 3d^{1.7}, \quad (|\bar{q}| \sim Ad^n), \quad (4)$$

в которой величина  $q$  берется в элементарных зарядах, а радиус капли  $r$  (или диаметр  $d$ ) — в микронах. По данным, приведенным в книге Леба [5], зависимость  $|\bar{q}|$  от  $d$  подобного же типа

$$|\bar{q}| = Ad^{1.5}. \quad (5)$$

Она наблюдается для капелек, получаемых при пульверизации ряда других жидкостей.

Указанные в работе [5] примерные значения коэффициента  $A$  колеблются от 0,3 (парафиновое масло) до 4 (дибутилфталат). Для отдельных групп измерений, проведенных нами с водными растворами, имеющими фиксированную величину рН, значения коэффициента  $n$  в формуле (4) колебались от 1,4 до 2,7 вследствие значительного разброса точек и

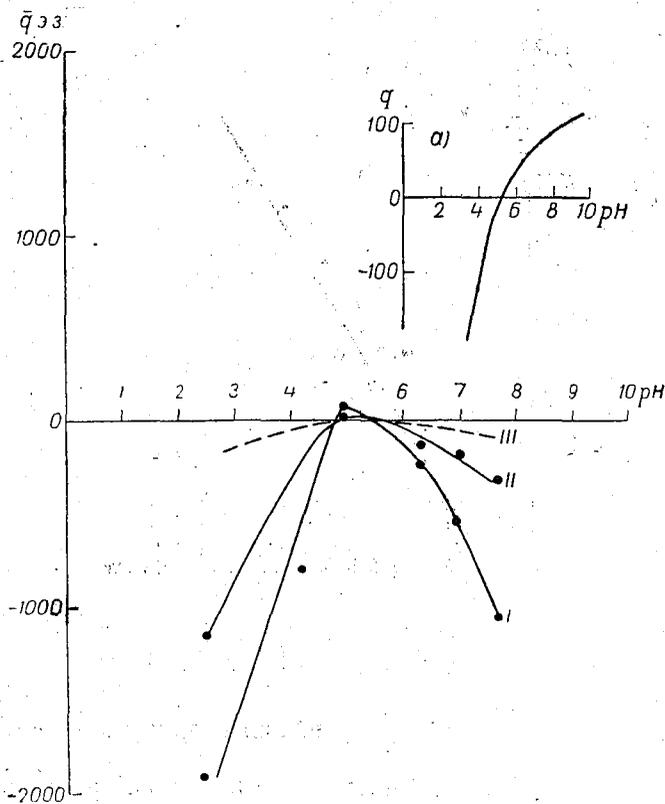


Рис. 1. Зависимость средних зарядов капель  $\bar{q}$  от величины водородного показателя рН.  
 I — для  $r = 15$  мк, II — для  $r = 10$  мк, III — для  $r = 5$  мк (ориентировочно). а — зависимость зарядов капель от величины рН, по данным статьи [2].

неравномерности распределения числа капель по размерам (мелкие и крупные капли встречались обычно значительно реже капель средних размеров), что особенно сказывалось при ограничении объема исходных данных.

Полученные в результате проведенных измерений средние абсолютные значения зарядов капель  $|\bar{q}|$  даются в табл. 1.

Значение коэффициента униполярности  $k$  (отношения числа капель с положительным зарядом  $n_+$  к числу капель с отрицательным зарядом  $n_-$ ), как показывает табл. 2, определенно изменяется с изменением рН, но практически для всех исследованных растворов величина  $k$  не превышает единицы. Значения  $k$ , вычисленные на основании сравни-

тельно небольшого числа измеренных капель, помещены в табл. 2 в скобках; отдельные величины  $k$ , несколько превышающие единицу, естественно, объясняются случайными флуктуациями исходных данных.

В заключение следует указать, что отрицательный результат, полученный при проверке обоснованности аэрозольной теории атмосферного электричества, говорит не о второстепенном значении аэрозолей для атмосферно-электрических процессов, а только о сложности имеющихся связей (не укладывающихся в рамки упрощенной схемы) и, конечно,

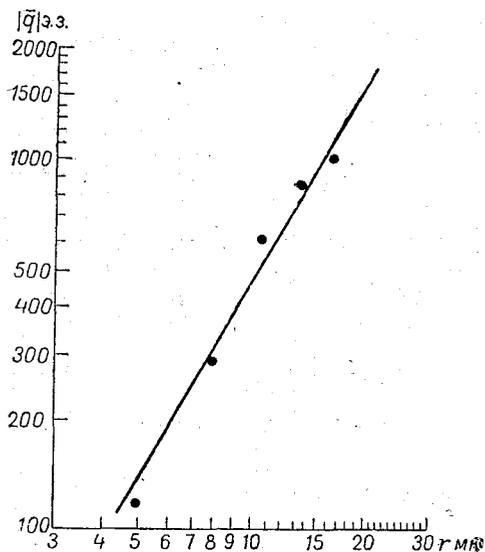


Рис. 2. Зависимость средних абсолютных значений зарядов капель  $|q|$  от их радиуса  $r$ .

не дающих основания для легкого решения главных проблем атмосферного электричества.

Использованные при проведении наших измерений растворы, а также многочисленные определения рН были сделаны в лаборатории химизма осадков (ГГО), руководимой В. М. Дроздовой, которой автор приносит глубокую благодарность.

Таблица 1

Зависимость абсолютных значений зарядов капель (в элементарных зарядах) от их радиуса и величины рН

| рН  | $\bar{r}$ мк |        |      |      |      |
|-----|--------------|--------|------|------|------|
|     | 5            | 8      | 11   | 14   | 17   |
| 2,5 | 250          | 840    | 1400 | 2000 | 2400 |
| 4,2 | 240          | (1000) | 1000 | 1600 | —    |
| 4,9 | 180          | 300    | 700  | 1200 | 2100 |
| 6,3 | 140          | 280    | 500  | 700  | 1000 |
| 7,0 | 120          | 240    | 500  | 900  | 1200 |
| 7,7 | 80           | 240    | 600  | 1300 | —    |

Таблица 2

Значения коэффициента униполярности  $k$  для различных групп капель

| pH  | $\bar{r}$ мк |     |       |       |       | $n_+$ | $n_-$ | $k$ |
|-----|--------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
|     | 5            | 8   | 11    | 14    | 17    |       |       |     |
| 2,5 | (0,2)        | 0,2 | 0,1   | 0,1   | 0,1   | 29    | 282   | 0,1 |
| 4,2 |              |     | (0,1) | (0,3) |       | 9     | 44    | 0,2 |
| 4,9 | (1,3)        | 1,0 | (1,0) | (0,6) |       | 53    | 53    | 1,0 |
| 6,0 | (1,3)        | 1,0 | 0,7   | 0,7   | 0,5   | 166   | 202   | 0,8 |
| 7,0 | (0,6)        | 0,7 | 0,4   | 0,3   | 0,3   | 91    | 187   | 0,5 |
| 7,7 | (0,2)        | 0,8 | (0,5) | (0,1) | (0,1) | 35    | 72    | 0,5 |

## ЛИТЕРАТУРА

1. Решетов В. Д. Проблема атмосферного электричества и аэрозоль. Труды ЦАО, вып. 30, 1959.
2. Решетов В. Д. Исследование униполярных зарядов аэрозолей. Труды ЦАО, вып. 30, 1959.
3. Соловьев В. А. Об одном методе измерений зарядов и размеров капель тумана. Труды ГГО, вып. 58, 1956.
4. Махоткин Л. Г., Соловьев В. А. Электрические заряды капель туманов и облаков. Труды ГГО, вып. 97, 1960.
5. Loebl L. B. Static electrification. Berlin, Springer, 1959.

**БИБЛИОТЕКА**  
 Ленинградского  
 Гидрометеорологического  
 Института

## СОДЕРЖАНИЕ

|  | Стр. |
|--|------|
| Н. Ф. Котов. Новый код для сети станций радиолокационного штормооповещения . . . . .   | 3    |
| Т. И. Смолкина. Грозовой режим в районе Ленинграда по радиолокационным наблюдениям ст. Воейково за 1958—1959 гг. . . . .           | 15   |
| ✓ Н. Ф. Котов. Определение радиолокационной характеристики грозового состояния ливней . . . . .                                    | 27   |
| Г. Б. Брылев, Е. М. Сальман. Радиоэхо диэлектрических неоднородностей термического характера . . . . .                             | 37   |
| ✓ Н. Ф. Котов, Хэ Жуй-цзюнь. Некоторые результаты радиолокационного исследования характера движения очагов ливней и гроз . . . . . | 45   |
| ✓ К. Ф. Крамич, В. А. Соловьев. О некоторых различиях характеристик гроз и ливней . . . . .  | 52   |
| А. Я. Перельман. Зависимость времени и скорости диффузионной перегонки от физических характеристик облака . . . . .                | 60   |
| В. И. Краав. Об аэрозольной теории атмосферного электричества . . . . .  | 73   |

Редактор *В. С. Протопопов*

Техн. редактор *М. И. Брайнина*

Корректоры: *Ф. И. Межиковская* и *Н. И. Оршер*

Сдано в набор 14/II 1961 г.

Подписано к печати 27/V 1961 г.

Бумага 70 × 108<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бум. л. 2,5

Печ. л. 6,85

Уч.-изд. л. 6,5

Тираж 650 экз.

М-61610

Индекс МЛ-231

Гидрометеорологическое издательство.

Ленинград, В-53, 2-я линия, д. № 23.

Заказ № 109

Цена 46 коп.

Типография № 8 Управления полиграфической промышленности ЛСНХ  
Ленинград, Прачечный пер., д. № 6.

---

---

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО**

**Отдел распространения  
Ленинград, В-53, 2-я линия, 23**

**ИМЕЮТСЯ В ПРОДАЖЕ**

**Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова**

- Вып. 68 под ред. Гаевского В. Л. и Шифрина К. С. Вопросы актинометрии и атмосферной оптики. Ц. 1 р. 41 к.
- Вып. 73 под ред. Базилевича В. В. Физика атмосферы. Ц. 88 к.
- Вып. 74 под ред. Пастуха В. П. Грозы и град на территории СССР. Ц. 62 к.
- Вып. 76 под ред. Юдина М. И. Вопросы динамической метеорологии и теории климата. Ц. 87 к.
- Вып. 77 под ред. Лайхтмана Д. Л. Вопросы физики приземного слоя воздуха. Ц. 67 к.
- Вып. 78 под ред. Тимофеева М. П. Исследование процессов тепло- и влагообмена над водоемами. Ц. 90 к.
- Вып. 81 под ред. Юдина М. И. Вопросы динамической метеорологии. Ц. 61 к.
- Вып. 83 под ред. Стернзата М. С. Вопросы разработки метеорологических приборов. Ц. 26 к.
- Вып. 84 под ред. Дроздова О. А. Вопросы климатологии. Ц. 40 к.
- Вып. 88 под ред. Дроздова О. А. Вопросы общей и синоптической климатологии. Ц. 82 к.
- Вып. 89 под ред. Вительса Л. А. Вопросы синоптической климатологии и геофизики. Ц. 52 к.
- Вып. 91 под ред. Гольцберг И. А. Вопросы агроклиматологии. Ц. 61 к.
- Вып. 92 под ред. Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности. Ц. 75 к.
- Вып. 96 под ред. Пивоваровой З. И. Вопросы методики метеорологических наблюдений и их обработка. Ц. 67 к.
- Вып. 97 под ред. Имянитова И. М. Атмосферное электричество. Ц. 76 к.
- Вып. 98 под ред. Юдина М. И. Вопросы авиационной метеорологии. Ц. 36 к.
- Вып. 99 под ред. Швеца М. Е. и Юдина М. И. Вопросы численного прогноза и теории климата. Ц. 94 к.
- Вып. 103 под ред. Стернзата М. С. Вопросы разработки метеорологических приборов. Ц. 63 к.
- Вып. 104 под ред. Шишкина Н. С. Вопросы физики облаков и активных воздействий. Ц. 55 к.
- Вып. 108 под ред. Берлин И. А. и Копанева И. Д. Методика метеорологических наблюдений и обработки. Ц. 60 к.
- Вып. 109 под ред. Шифрина К. С. и Гаевского В. Л. Исследование радиационных процессов. Ц. 1 р. 16 к.
- Вып. 113 под ред. Лебедева А. Н. Вопросы климатологии. Ц. 72 к.
- Вып. 114 под ред. Юдина М. И. и Швеца М. Е. Вопросы динамической метеорологии. Ц. 73 к.

*Требуйте книги в магазинах книготоргов!*

**ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ**

---

---

---

---

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО**

**Отдел распространения**

**Ленинград, В-53, 2-я линия, 23**

**ИМЕЮТСЯ В ПРОДАЖЕ**

**МОНОГРАФИИ**

Актинометрия и атмосферная оптика. Под ред Ш и ф р и н а К. С. Ц. 2 р. 02 к.

Берлянд М. Е. Предсказание и регулирование теплового режима приземного слоя атмосферы. Ц. 1 р. 80 к.

Будько М. И. Тепловой баланс земной поверхности. Ц. 1 р. 10 к.

Кондратьев К. Я. Лучистый теплообмен в атмосфере. Ц. 1 р. 70 к.

Кондратьев К. Я., Филиппович О. А. Тепловой режим верхней атмосферы. Ц. 1 р. 41 к.

Никандров В. Д. Искусственные воздействия на облака и туманы. Ц. 82 к.

Погосян Х. П. Общая циркуляция атмосферы. Ц. 1 р. 05 к.

*Требуйте книги в магазинах книготоргов!*

**ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ**

---

---