

Федеральная служба  
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова»

А. А. Синькевич, Ю. А. Довгалюк, Н. Е. Веремей,  
Ю. П. Михайловский

## Слияние конвективных облаков

*Под редакцией  
канд. геогр. наук Е. Л. Махоткиной*

Санкт-Петербург  
2018

УДК 551.508.85:551.576

ББК 26.233

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук А. М. Абшаев (ФГБУ «ВГИ»)  
д-р физ.-мат. наук М. А. Струнин (ФГБУ «ЦАО»)

**Синькевич Андрей Александрович, Довгалоук Юлия Александровна, Веремей Николай Евгеньевич, Михайловский Юрий Павлович.** Слияние конвективных облаков — Санкт-Петербург: ООО «Амирит», 2018 — 280 с.

ISBN 978-5-9500883-5-3

Обобщены экспериментальные и теоретические данные о процессе слияния конвективных облаков. Рассматривается, при каких атмосферных условиях происходит слияние облаков. Представлена характерная структура радиоэха облака в процессе слияния. Обсуждается, как меняются характеристики облаков в результате указанного процесса. Обсуждаются вопросы контроля электрического состояния сливающихся облаков, исследуется влияние слияния на их электрическую активность. Приводятся новые данные о характеристиках грозных облаков. Рассматриваются вопросы, связанные с особенностями и эффективностью активных воздействий на сливающиеся облака. Исследуются возможности и приводятся результаты численного моделирования процесса слияния облаков, а также характеристики используемых моделей.

Книга рассчитана на метеорологов, авиационных специалистов и других лиц, интересующихся физикой облаков и осадков.

**УДК 551.508.85:551.576**

**ББК 26.233**

In the monograph "Cu merging" by A. A. Sinkevich, Yu. A. Dovgaluk, N. E. Veremei and Yu. P. Michailovsky the experimental and theoretical data on the process of Cu merging are summarized. Atmospheric conditions, when merging takes place, are considered. Typical radar echoes of merging clouds are presented. The changes in Cu characteristics due to the mentioned process are discussed. Problems of the control of electrical state of merging clouds are discussed, the impact of merging on electrical activity of the clouds is investigated. New thunderstorm characteristics are presented. Problems to seed merging clouds and seeding efficiency are considered. The methods and the results of numerical simulation of Cu merging and characteristics of the used models are presented. The book is helpful to meteorologists, cloud physicists and persons associated with aircraft operations.

ISBN 978-5-9500883-5-3

© Федеральное государственное  
бюджетное учреждение  
«Главная геофизическая обсерватория  
им. А. И. Воейкова»

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	7
Введение.....	12
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	14
1.1. Механизмы слияния .....	14
1.2. Влияние движения конвективных облаков на их слияние.....	23
1.3. Облачный мост.....	27
1.4. Изменение физических характеристик облаков после слияния .....	28
1.5. Осадкообразование и другие микрофизические процессы в сливающихся облаках.....	30
1.6. Влияние слияния облаков на возникновение опасных явлений погоды .....	32
1.7. Слияние облаков и активные воздействия на них .....	34
ГЛАВА 2 РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	38
2.1. Определения и выбор облаков для анализа ..	38
2.2. Энергия неустойчивости атмосферы в дни со слиянием облаков.....	40
2.3. Структура радиоэха облака.....	43
2.4. Высота верхней границы .....	48
2.5. Максимальное значение радиолокационной отражаемости .....	51
2.6. Площадь, объем и масса облака .....	55

2.7. Интенсивность и поток осадков .....	57
2.8 Движение облаков .....	60
2.9. Взаимодействие ячеек в многоячейковом кучево-дождевом облаке.....	70
<b>ГЛАВА 3 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЛАКОВ И ИХ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИ СЛИЯНИИ ....</b>	<b>76</b>
3.1. О контроле электрического состояния конвективных облаков .....	77
3.1.1. Восстановление электрической структуры облака по результатам самолетных измерений напряженности электрического поля .....	78
3.1.2. Восстановление электрической структуры облаков по наземным измерениям напряженности электрического поля .....	85
3.1.3. Контроль электрического генератора облака по результатам измерений параметров молниевой активности .....	87
3.1.4. Контроль электрического генератора облака по результатам измерений радиолокационных параметров .....	90
3.2. Формирование грозового облака и выявление связей между радиолокационными характеристиками и параметрами грозовых разрядов .....	91
3.3. Изменение электрических и радиолокационных характеристик облаков при самолетном воздействии на фидерное облако с последующим слиянием в Саудовской Аравии .....	92

3.4. Электрические характеристики облаков при слиянии на Северо-Западе России .....	97
3.5. Электрические характеристики облаков при слиянии в Северо-Кавказском регионе России .....	102
<b>ГЛАВА 4 СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАКОВ ПРИ СЛИЯНИИ .....</b>	<b>112</b>
4.1. Облака Саудовской Аравии .....	112
4.1.1. Зависимость характеристик кучево-дождевых облаков от времени .....	114
4.1.2. Электрические характеристики облаков .....	118
4.2. Облака Северо-Запада России .....	120
<b>ГЛАВА 5 АКТИВНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ФИДЕРНЫЕ ОБЛАКА .....</b>	<b>128</b>
5.1. Влияние активных воздействий на движение кучево-дождевых облаков .....	128
5.1.1. Эксперимент в Канаде .....	129
5.1.2. Эксперимент в Индии .....	134
5.2. Изменения характеристик кучево-дождевых облаков при слиянии с фидерными, подвергнутыми воздействиям .....	137
5.2.1. Эксперимент в Саудовской Аравии .....	137
5.2.2. Эксперимент в Индии .....	144
5.3. Статистический анализ изменений характеристик кучево-дождевых облаков Саудовской Аравии при воздействиях на фидерные облака .....	148

ГЛАВА 6 ИССЛЕДОВАНИЕ СЛИЯНИЯ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ .....	155
6.1. Описание численной трехмерной модели конвективного облака.....	157
6.2. Методика задания возмущений поля температуры в трехмерной модели.....	171
6.3. Результаты моделирования слияния облаков с помощью трехмерной модели .....	173
6.3.1. Эксперимент в Индии .....	173
6.3.2. Эксперимент в Северо-Кавказском регионе России .....	189
6.4. Описание численной нестационарной модели облака малой размерности .....	200
6.5. Результаты моделирования слияния облаков с помощью модели малой размерности.....	207
6.5.1. Эксперимент на Северо-Западе России (2015 г.) .....	207
6.5.2. Эксперимент на Северо-Западе СССР (1985 г.) .....	213
6.5.3. Эксперимент в центральной части Индии (2004 г.) .....	219
Заключение .....	222
Приложение 1 .....	227
Литература .....	260

## Предисловие

Повышенный интерес авторов к процессу слияния конвективных облаков возник не случайно и имеет значительную предысторию.

В 1985 г. мы выполняли работы на самолете-лаборатории Ил-14 на Северо-Западе СССР (в Ленинградской, Псковской, Новгородской и Вологодской областях). Целью работ было определение реакции конвективных облаков на воздействия кристаллизующим реагентом. Комплекс аппаратуры на самолете позволял фиксировать основные облачные характеристики. В одном из экспериментов конвективное облако стало стремительно развиваться после воздействий, оно слилось с соседним и быстро перешло в кучево-дождевую стадию. При этом подобные изменения не наблюдались в находящихся рядом облаках. Этот случай нас заинтересовал, и мы выполнили численное моделирование развития облака, исследуя эффект слияния. Результаты показали, что слияние должно стимулировать развитие облака, способствовать усилению осадков.

Прошло почти 20 лет, и в 2004 г. нам посчастливилось принимать участие в проведении и анализе экспериментов по активным воздействиям на облака в Индии. Во время одного из экспериментов происходило слияние облаков, которые подвергались воздействиям с самолета. Результатом этого явилось изменение направления движения кучево-дождевого облака (Cb) и его интенсивное развитие по вертикали, верхняя граница облака превосходила 18 км, а температура вершины была ниже  $-100^{\circ}\text{C}$ . Численное моделирование вновь показало, что слияние облаков существенно сказывается на их динамических свойствах, стимулируя их развитие.

Спустя 2 года мы провели анализ экспериментов по воздействиям на облака в Канаде (провинция Альберта), где воздействия с самолета осуществлялись с целью подавления града. В некоторых экспериментах мы обнаружили, что воздействия не только меняют динамические и микрофизические характеристики облака, но и изменяют направление движения кучево-дождевых облаков. Это происходило тогда, когда имело место их слияние с фидерными облаками.

Всё это привело к тому, что мы обратили пристальное внимание на данное физическое явление. Принимая участие в крупном эксперименте по воздействиям на облака в Саудовской Аравии в 2008—2009 гг., мы уже целенаправленно стали изучать влияние слияния облаков на их характеристики. Анализ отдельных экспериментов и выполненное численное моделирование в очередной раз подтвердили наши выводы о существенном влиянии процесса слияния облаков на их характеристики. Появление опасных явлений погоды, связанных с облаками, определялось, в том числе, и процессами их слияния. Впервые был выполнен статистический анализ, позволивший оценить степень изменения характеристик облаков вследствие рассматриваемого явления.

В 2016 г. Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ) поддержал нашу заявку на изучение рассматриваемого явления. При выполнении гранта к анализу были привлечены результаты наблюдений за слиянием облаков на Северо-Западе России. При этом созданная уникальная сеть осадкомеров в Санкт-Петербурге и его окрестностях позволила оценить изменения интенсивности осадков при слиянии облаков. Измерения на Северном Кавказе показали, как слияние влияет на изменение формирования града. Появление грозопеленгаторов в России обеспечило возможность оценки изменений в грозовой активности облаков при их слиянии.

Существенные изменения имели место в возможностях численного моделирования. Если наши первые работы по моделированию базировались на использовании полуторамерной модели конвективного облака, то появление трехмерной модели обеспечило существенный прогресс. С помощью такой модели появилась возможность не просто оценивать изменения в характеристиках облаков, но и заглянуть внутрь, исследуя физические механизмы, приводящие к слиянию.

В настоящей монографии мы приводим результаты наших исследований за достаточно большой промежуток лет, указанный выше. При этом совершенно очевидно, что данное явление очень важное: оно в значительной степени определяет формирование мощных облаков вертикального развития, с которыми связаны опасные явления погоды. Исследования в этом направлении необходимо продолжать.

Отдельно рассматривается вопрос об эффективности воздействий на облака и последствиях таких воздействий, когда наблюдается их слияние. Забегая вперед, отметим, что, как и во всей проблеме оценки эффективности воздействий на облака, существенные сложности возникают при использовании методов математической статистики. Это связано с тем, что облака крайне изменчивы, а объем экспериментальных данных обычно невелик и, как правило, является недостаточным для строго статистического анализа.

Авторы считают важным подчеркнуть, что получение экспериментальных данных об облаках России и возможности моделирования были связаны с финансированием работ Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидрометом).

Данные об облаках Индии, Канады и Саудовской Аравии были получены благодаря сотрудничеству с компанией Weather Modification, Inc (WMI). Эта компания проводила эксперименты

по воздействиям на облака в указанных странах. Считаем своим долгом подчеркнуть, что значительная часть данных была получена при совместной работе с доктором Терри Крауссом — одним из лучших специалистов в мире в области воздействий на облака, который долгое время работал в WMI. Помимо Краусса, нам посчастливилось работать со многими замечательными учеными в России и за рубежом, которые внесли свой вклад в изучение рассматриваемого явления. Многие из них являлись соавторами статей, которые легли в основу настоящей монографии.

Настоящая монография включает 6 глав и Приложение. В первой главе выполнен обзор литературы, который включает обсуждение следующих вопросов: механизмы слияния, влияние движения конвективных облаков на их слияние, появление облачного моста, изучение физических характеристик облаков после слияния, изменения в осадкообразовании и других микрофизических процессах в сливающихся облаках, влияние слияния облаков на возникновение опасных явлений погоды, изменения характеристик облаков при активных воздействиях на них.

Во второй главе приводятся данные наших измерений. Здесь рассматривается, при каких атмосферных условиях наблюдается слияние облаков, приводится характерная структура радиоэха облака в процессе слияния, на отдельных примерах обсуждается, как меняются характеристики облаков в результате указанного процесса.

В третьей главе обсуждаются вопросы контроля электрического состояния облаков, исследуется влияние слияния облаков на их электрическую активность, а именно — на формирование электрических разрядов. Рассматривается изменение частоты разрядов облаков при их слиянии для экспериментов на Северо-Западе России, Северном Кавказе и в Саудовской Аравии.

Четвертая глава посвящена статистическому анализу изменений характеристик облаков при слиянии. Приводятся данные для Северо-Запада России и для Саудовской Аравии.

В пятой главе рассматриваются вопросы, связанные с эффективностью активных воздействий на сливающиеся облака. Рассматриваются отдельные эксперименты в Канаде, Индии, Саудовской Аравии. Представлены данные статистического анализа изменений характеристик облаков после воздействий.

Шестая глава посвящена исследованию слияния конвективных облаков методом численного моделирования. Здесь приводится описание двух моделей конвективного облака (полуторамерной и трехмерной), которые использовались в настоящем исследовании. Приводятся результаты моделирования облаков, которые наблюдались в экспериментах, описанных выше.

В приложении обсуждается один из комплексных экспериментов по исследованию грозо-градового облака, который позволил получить новые данные о развитии грозового облака, верифицировать существующие и установить регрессионные связи между радиолокационной информацией и параметрами молниевых разрядов.

## Введение

Конвективные облака, развивающиеся в атмосфере, редко бывают обособленными. Характерной их особенностью является то, что они, как правило, образуют поля, состоящие как из отдельных облаков, так и из их групп.

Облака, в общем случае, взаимодействуют между собой. Это взаимодействие тем сильнее, чем меньше расстояние между ними. Их взаимное влияние может проявляться как в динамике воздушных потоков (взаимодействие околооблачных конвективных течений), так и в облачной микрофизике (например, попадание капель и кристаллов из одних облаков в другие). В случае грозных облаков может быть значительным и их электрическое взаимодействие (суперпозиция электрических полей, а также попадание заряженных частиц из одних облаков в другие). Следует учитывать, что каждое облако влияет на состояние окружающей атмосферы, которая, в свою очередь, также оказывает влияние на эволюцию самих облаков (вовлечение, перемешивание и др.).

Особый интерес представляет такой вид взаимодействия, как слияние конвективных облаков. Указанный процесс, как правило, способствует усилению конвекции, росту облаков и увеличению осадков, а, следовательно, возникновению и (или) усилению таких опасных явлений погоды, как ливни, грозы, град, шквалы, смерчи. В связи с этим исследование слияния облаков является важной актуальной задачей.

Учеными выполнен значительный объем исследований в данном направлении. Проводились самолетные опыты, использовались дистанционные средства изучения облаков, а также выполнялось численное моделирование. Однако на сегодняшний день не было проведено обобщение имеющихся результатов.

Основной целью настоящей монографии является обсуждение состояния вопроса в данной области и обобщение результатов, полученных разными авторами. Здесь также изложены результаты комплексных работ (натурные исследования и численное моделирование), в которых принимали участие авторы монографии.

Работы по исследованию слияния конвективных облаков ведутся с начала 1970-х гг. В главе 1 приведен обзор опубликованных к настоящему времени работ в указанной области.

# ГЛАВА 1

## СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

### 1.1. Механизмы слияния

Слияние облаков оказывает сильное воздействие на их последующую эволюцию. За счет больших размеров объединенное облако слабее взаимодействует с окружающим безоблачным воздухом (вовлечение, перемешивание), что способствует его более интенсивному развитию [Lopez, 1978]. Как радиолокационные исследования, так и данные численного моделирования показали существенное увеличение площади, высоты верхней границы и радиолокационной отражаемости объединенного облака по сравнению с облаками первоначальными [Changnon, 1976; Simpson, et al., 1971; Turpeinen, 1982; Wiggert et al., 1981; Woodley et al., 1982]. В результате слияния формируется более интенсивный восходящий поток. Это, в свою очередь, приводит к появлению (усилению) таких опасных явлений погоды, как грозы, сильные ливни, град, шквалы и смерчи [Шишкин, 1964; Абшаев, 1984; Синькевич, 2001; Lopez, 1978; Malkus, Riehl, 1964; Simpson et al., 1980; Westcott, 1984; Turpeinen, 1982; Sinkevich, Krauss, 2014; Краус и др., 2011*a*; Краус и др., 2012; Krauss et al., 2011; Simpson et al., 1971; Simpson 1980]. Установлено, что наиболее мощные и долгоживущие кучево-дождевые облака формируются путем слияния двух или нескольких конвективных облаков [Шишкин, 1964; Абшаев, 1984; Chin, Wilhelmson, 1998; Malkus, Riehl, 1969].

В частности, слияние облаков может приводить к формированию суперячейковых облаков из мультячейковых [Foote Brant, Wade, 1982; Vasiloff et al., 1986]. С суперячейковыми же облаками обычно бывают связаны наиболее опасные явления погоды (град, грозы,

катастрофические ливни, разрушительные шквалы, смерчи и др.).

В радиолокационной литературе ячейки, которые сливаются с более мощным и долгоживущим облаком, получили название фидерных. В работе [Dennis et al., 1970] показано, что у наиболее мощных Сб фидерные облака развиваются в непосредственной близости от них в области восходящего потока, затем происходит их слияние с Сб, которые благодаря этому развиваются особо интенсивно.

Важной проблемой при исследовании слияния конвективных облаков является понимание механизмов, которые обуславливают данный процесс и (или) способствуют его протеканию.

Выполняя эксперименты по динамическому засеву облаков, Симпсон [Simpson, 1980] предположила, что компенсирующий восходящий поток, появляющийся вследствие взаимодействия нисходящих потоков, формируемых сливающимися облаками, является причиной, которая приводит к появлению рассматриваемого эффекта. Тао и Симпсон [Тао, Simpson, 1984] с помощью двумерной многоячейковой модели выполнили 48 численных экспериментов по моделированию слияния облаков. Результаты расчетов показали, что нисходящий поток из разрушающегося кучево-дождевого облака приводит к формированию нескольких новых ячеек. Авторы также указывают на наличие зоны конвергенции под облаками, способствующей слиянию облаков. Случаи слияния также зависят от неустойчивости атмосферы и динамического подъема воздушных масс, их количество уменьшается при уменьшении неустойчивости атмосферы и крупномасштабного подъема воздушной массы. Эти же авторы опубликовали статью в 1989 г. [Тао, Simpson, 1989], где для моделирования слияния использовали уже трехмерную модель. Согласно полученным результатам слияние было связано с появлением между

сливающимися облаками нового облака, возникновение которого стимулировалось нисходящим потоком из наиболее быстро движущегося облака.

В работе [Wilkins et al., 1976] описано слияние как коагуляция термиков и суммирование энергии в едином элементе. Авторы нашли, что термики в облаке перекрываются; таким образом, они могут слиться. Используя двухмерную модель, авторы показали, что сливающаяся пара термиков формирует термик, который обладает подъемной силой вдвое большей, чем каждый из них. Автор работы [Hill, 1974], в свою очередь, описал слияние как причину образования мультячейкового облака, где основная осадкообразующая ячейка «втягивает» более мелкие термики.

Уникальный эксперимент был выполнен в США, когда с использованием трех доплеровских радиолокаторов удалось восстановить поле вертикальных скоростей в сливающихся облаках [Westcott, Kennedy, 1989]. На рис. 1.1 приводится иллюстрация из указанной работы, на которой показан вертикальный радиолокационный разрез сливающихся облаков с полем скоростей за три момента времени. Авторы указывают, что в первый момент времени доминирующей в облачной системе была ячейка В. Начиная с 17 ч 54 мин, в облаке на низких уровнях появился нисходящий поток, что привело к возникновению конвергенции на высоте 250 м и появлению облачного моста между ячейками С и В. Одновременно зафиксирована область конвергенции на высоте около 6 км, связанная с восходящим потоком в ячейке В. Далее, в 17 ч 54 мин, в месте, где образовался облачный мост, начинает развиваться новая ячейка D. К 18 ч 00 мин скорость восходящего потока в ячейке D уже достигает 10 м/с. Происходит объединение восходящих потоков ячеек D и В.

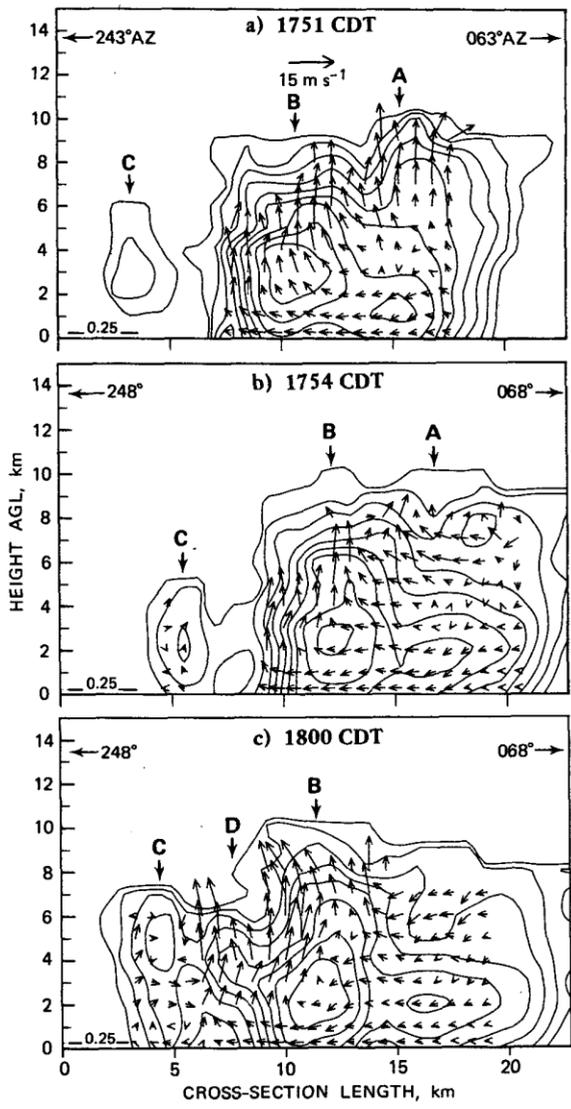


Рис. 1.1. Вертикальный радиолокационный разрез облаков с полем вертикальных движений за три момента времени [Westcott, Kennedy, 1989].

Ячейка С по-прежнему сохраняет свой индивидуальный восходящий поток. Далее, в 18 ч 09 мин — 18 ч 15 мин, ячейка С становится доминирующей, происходит объединение облаков.

В данной работе приводятся горизонтальные радиолокационные разрезы облаков, которые позволяют в деталях судить о структуре воздушных потоков при их слиянии. На их основе авторы отмечают, что существенную роль в объединении облаков играет конвергенция на низких уровнях; на средних же уровнях в атмосфере поток воздуха облака при его взаимодействии с полем ветра приводит к формированию облачного моста. При этом происходит перенос облачных частиц в горизонтальном направлении. Облачные частицы переносятся в район, расположенный между облаками, формируя облачный мост, и они ответственны за появление радиолокационной отражаемости от этой области.

Численные эксперименты, выполненные разными авторами, показали, что главным механизмом, приводящим к слиянию облаков является градиент давления и подъем воздуха за счет конвергенции из-за нисходящих движений от близлежащих облаков [Orville, 1977; Orville et al., 1980; Turpeinen, 1982; Tao, Simpson, 1984; Tao, Simpson, 1989; Meiyuan et al., 1987a; Meiyuan et al., 1987b; Kogan, 1996; Lin, Joyce 2001].

В работе [Orville et al., 1980] моделировалось слияние конвективных облаков с помощью двумерной модели. В результате расчетов получено слияние областей двух конвективных ячеек, а также объединение их восходящих потоков. Слияние происходило, когда устанавливался достаточный градиент давления между двумя облаками. Это проявлялось в горизонтальном ускорении движения меньшей ячейки по направлению к большей. Авторы заключили, что слияние происходит, когда облака имеют разные размеры или находятся на разной стадии эволюции, и при этом находятся близко друг к другу. Модель слияния напоминает слияние

фидерных облаков с материнским. Ключевую роль в слиянии облаков играет формирование ложбины давления под облаками.

Аналогичные выводы были сделаны Турпейнен [Turpeinen, Уау, 1981; Turpeinen, 1982] по результатам трехмерного численного моделирования. В используемой модели слияние было определено как объединение двух радиоэхо с контуром радиолокационной отражаемости в 23 дБЗ (данный критерий использовался для сравнения с радиолокационными измерениями и фиксированными метеоусловиями в конкретном натурном эксперименте). При этом Турпейнен считала, что основным фактором, способствовавшим сближению облаков и приводящим к слиянию, были именно градиенты горизонтального давления, а не нисходящие движения. Турпейнен, проводя численные эксперименты с двумя восходящими потоками, расположенными вблизи друг от друга, показала, что имеет место некоторое «притяжение» между ними, что приводит к их объединению вблизи нижней границы облаков. В зоне между сливающимися облаками наблюдалось возмущение температурного градиента, что в итоге способствовало конвергенции потоков и слиянию радиоэха. Франк и Лермитте [Frank, Lhermitte, 1976] указывали на важность мезомасштабной конвергенции, которая способствует слиянию.

Позо и др. [Pozo et al., 2006a; Pozo et al., 2006b] выполнили численное моделирование слияния облаков над Кубой с использованием модели ARPS (Advanced Regional Predicting System), при этом для задания начальных и граничных условий применялась модель MM5. Авторы выполнили сравнение данных моделирования с реально наблюдаемым процессом слияния облаков над Кубой. Исследовалось слияние двух облаков. Результаты сравнения продемонстрировали весьма близкие значения характеристик, полученных как в натуральных исследованиях, так и в численных экспериментах. Анализ поля

ветра показал, что слияние облаков было связано с компенсирующим восходящим потоком вследствие наличия сильного нисходящего потока из облака A1, являвшегося более старым (рис. 1.2).

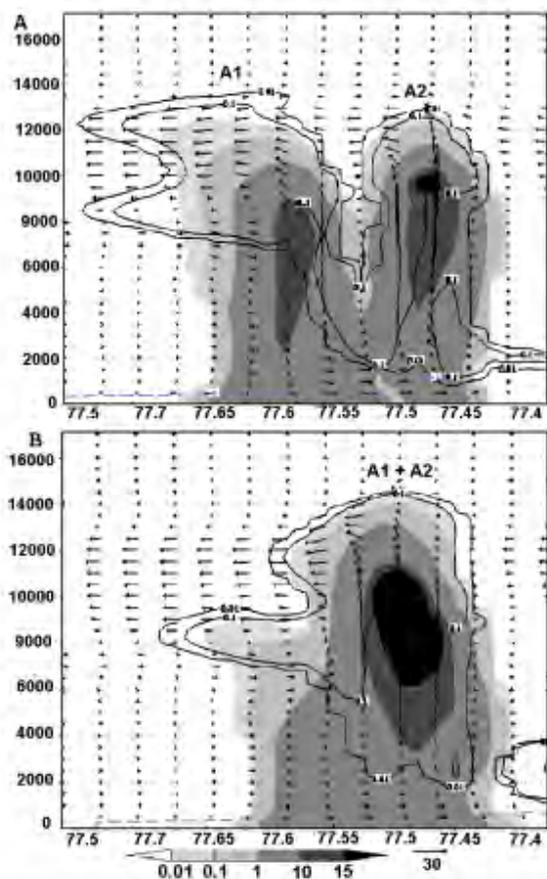


Рис. 1.2. Вертикальное сечение промоделированных облаков в моменты времени перед и после их слияния [Pozo, 2006a].

Закрашенная область — сумма отношения смеси дождя, снега и града, линии соответствуют значениям отношения смеси облачной воды и льда, стрелки обозначают скорость и направление ветра, синяя линия — нисходящий холодный поток воздуха объединенного облака A1+A2.

При этом важнейшим фактором являлось взаимодействие ветра, создаваемого нисходящими движениями из облаков, с фоновым полем ветра. Это взаимодействие привело к появлению зоны конвергенции на низких уровнях в атмосфере и способствовало слиянию облаков.

На рис. 1.2 показано вертикальное радиолокационное сечение промоделированных облаков на 10800 с и 11400 с модельных расчетов (рис. 1.2А и 1.2В соответственно) [Pozo, 2006a]. Из облака А1 выпадают интенсивные осадки, имеет место сильный нисходящий поток. Облако А2 находится на стадии развития, восходящий поток превышает 30 м/с. В это же время происходит объединение областей с суммарным отношением смеси дождя, снега и града более 1,0 г/кг, на средних уровнях. Пока потоки не объединились в один, это позволяет идентифицировать сливающиеся облака. Из рисунка видно, что часть опускающегося воздуха из облака А1 попадает в облако А2, усиливая конвергенцию и, тем самым, способствуя его развитию. Облако А1 начинает разрушаться (рис 1.2b), при этом новое облако возникает в результате слияния. Оно интенсивно растет по вертикали, и его верхняя граница достигает высоты 14 км.

Формирование ложбины давления между сливающимися облаками при наличии сдвига ветра по высоте и его отсутствии исследовалось путем численного моделирования в работе Когана и Шапиро [Kogan, Shapiro, 1996]. Численные эксперименты проводились как при учете, так и без учета наличия сдвига ветра по высоте. Авторы подчеркивают важность этого динамического фактора для процесса слияния облаков.

В работе [Cheng, 1989] двумерная плоско-симметричная модель конвективного облака использовалась для исследования образования фидерных облаков вблизи градовых кучево-дождевых облаков. Модель воспроизводит отток воздуха от

градового облака в нижней его части, генерируемый в результате испарения осадков, и периодические волнообразные линии фидерных облаков. Получено, что фидерные облака порождаются гравитационными волнами, которые образуются при взаимодействии втока с оттоком холодного воздуха. Эти волны инициируют конвекцию вплоть до расстояния 20 км с наветренной стороны от зоны оттока. Эта концепция вызывает определенные вопросы в связи с тем, что интенсивность гравитационных волн мала. По данным исследователей, влажность под облаком играет важную роль в образовании волнообразных линий фидерных облаков. Авторами отмечается, что двумерность модели ограничивает ее возможности.

Еще один механизм слияния предложила Весткотт [Westcott, 1994]. Ею было установлено, что в исследуемых случаях слияния облаков (всего 90), основной механизм слияния был связан с горизонтальным увеличением размеров облаков в процессе их развития.

В работе [Пушистов и др., 1980] взаимодействие конвективных облаков моделировалось с помощью простой численной двумерной модели ансамбля влажной конвекции. Возникновение ансамбля термиков, порождающих облака, моделировалось заданием на земле некоторых значений отклонений потенциальной температуры с использованием генератора случайных чисел. В результате одного из численных экспериментов было получено, что одно облако, более крупное, поглотило более мелкое через нижнюю границу, получив дополнительную энергию для своего дальнейшего развития. Моделируемые облака находились на стадии  $Cu\ hum$  —  $Cu\ med$ .

Аналогичный эффект был получен для термиков с помощью аналитической осесимметричной двумерной модели [Мальбахов, 1978]. Термик, расположенный выше, может поглощать нижний путем вовлечения через свою нижнюю границу. Объединенный термик обладает большей плавучестью

и достигает большей высоты по сравнению с первоначальным. Чем больше термиков сливаются между собой, тем большей высоты достигает образованная ими конвективная ячейка.

Коагуляция термиков, по данным [Андреев, Панчев, 1975], имеет место преимущественно в тыловой части больших термиков, где наблюдается локальное понижение давления и повышение температуры по сравнению с фоновой атмосферой. Отмечается, что общая масса мелких термиков, захваченных крупным, может многократно превышать первоначальную массу последнего. Слияние термиков повышает их плавучесть и дает возможность объединенному термику подняться до значительных высот.

Сталкер и Кнап [Stalker, Knapp, 2003] с помощью трехмерной численной модели исследовали влияние толщины приземного слоя на эффективность слияния ячеек в многоячейковом Сб. Эффективность этого процесса оказывается наибольшей при расстоянии между ячейками, равном 0,75 толщины приземного слоя.

## **1.2. Влияние движения конвективных облаков на их слияние**

Облака в атмосфере перемещаются под действием сил в результате сложного взаимодействия между ведущим воздушным потоком в атмосфере и воздушными течениями внутри самих облаков. Поэтому, скорость и направление перемещения разных облаков в поле ветра могут быть различны, что может приводить к их сближению и последующему слиянию.

В ряде работ представлены результаты исследований движения конвективных облаков [Абшаев и др., 1984; Абшаев и др., 2000; Имамджанов, 1984; Имамджанов, 1990; Шметер, 1987; Marwitz, 1972; Mather et al, 1996]. Было показано, что в Северном полушарии мощная внутриоблачная восходящая

струя, являющаяся основным динамическим фактором грозоградового облака, расположена, как правило, в правой его части относительно ведущего потока в атмосфере. При этом отклонение в перемещении мультячейковых кучево-дождевых облаков достигает 10—90° вправо от ведущего потока, в то время как отдельные конвективные ячейки могут отклоняться на угол до -90° влево от ведущего потока.

Отметим, что возможности проведения воздействий на конвективные облака с целью изменения направления их движения рассматривал в своей монографии Качурин [Качурин, 1990]. Это, безусловно, представляет большой практический интерес.

Кратко рассмотрим, какие физические факторы приводят к отклонению в движении кучево-дождевых облаков от прямолинейного. Этот вопрос слабо исследован теоретически в связи с его высокой сложностью. Облака имеют сложную динамическую структуру, что существенно затрудняет решение задачи об их движении в поле ветра. Расчет движения облаков значительно осложняется в связи с их большой вертикальной протяженностью при наличии вертикального сдвига ветра, а также с необходимостью учитывать вертикальный перенос количества движения, боковой вток (отток) воздуха, образование и распад ячеек и др.

Известно, что тела, движущиеся в атмосфере Земли, испытывают ускорение Кориолиса, вызванное вращением Земли. Не останавливаясь на теории этого вопроса, отметим, что в Северном полушарии эта сила направлена вправо от направления движения, соответствующим образом влияя на перемещение кучево-дождевых облаков.

Шметер в своей монографии [Шметер, 1987] указывает на то, что одной из причин несовпадения направления движения облака с направлением ветра является эффект Магнуса. Он состоит в появлении поперечной силы, возникающей из-за

вращения  $S_b$  вокруг вертикальной оси. Там, где линейная скорость вращения облака складывается со скоростью его перемещения, происходит локальное уменьшение давления, а в противоположной точке — его увеличение. В результате при циклоническом вращении, что наблюдается обычно в Северном полушарии, облака смещаются вправо, а при антициклоническом — влево относительно ветра.

В работе [Каплан, 1990] рассматривается движение одиночной конвективной ячейки в условиях атмосферы со сдвигом ветра. Показано, что силы, связанные со втоком (оттоком) воздуха во вращающуюся восходящую струю, приводят к появлению поперечной составляющей  $V_{\text{поп}}$  скорости ячейки, которая может быть вычислена по следующей формуле:

$$V_{\text{поп}} \approx -\frac{2\pi M}{q_{\text{пр}}},$$

где  $V_{\text{пр}}$  — продольная составляющая скорости облака, примерно равная скорости ветра на уровне максимального втока в облако (то есть, на уровне нижней границы),  $M$  — суммарный момент количества движения в зоне втока,  $q$  — скорость втока массы воздуха в воздушную струю. Таким образом, имеется составляющая скорости, смещающая облако вправо при вращении воздуха против часовой стрелки. Абсолютная величина этой составляющей зависит от суммарного момента количества движения и скорости втока.

Факторы, влияющие на угол между направлением движения конвективного облака и направлением ведущего потока, также детально рассмотрены в работе [Абшаев и др., 2000]. Авторы приводят соотношение, позволяющее вычислять данный угол, показывая, что он увеличивается при уменьшении высоты конвергенции. Подчеркивается, что в большинстве случаев в Северном полушарии наблюдается смещение облака вправо от

ведущего потока, однако, когда в облаке имеет место антициклональная циркуляция, происходит смещение облака влево.

Вращение облаков исследовалось в работе [Lee et al., 2006]. Авторы отмечали, что вращение меняет траекторию движения облака и может приводить к слиянию облаков. Авторы публикации обнаружили, что в 58 % случаев, когда облака сливались, они вращались и, соответственно, имели разное направление движения.

Следующим фактором, определяющим отклонение облака от прямолинейного движения, является рост и развитие новых ячеек, которые в дальнейшем сливаются с основным облаком. Известно, что обычно развитие таких ячеек идет сбоку от основного облака, которое в результате слияния с ними имеет тенденцию смещения вправо [Абшаев, 1984].

В упоминавшейся выше работе [Тао, Simpson, 1989] показано, что существенную роль в процессе слияния играет расположение сливающихся облаков. В ходе трехмерного численного моделирования рассмотрено десять случаев слияния с участием осадкообразующих облаков. В восьми из них сливались два облака. Из них в семи случаях они располагались приблизительно вдоль линии, параллельной вектору сдвига ветра (параллельные ячейки), в одном — перпендикулярно данной линии (перпендикулярные ячейки). В случае параллельных ячеек сливающиеся облака находились приблизительно вдвое дальше друг от друга (до 10 км), чем в случае перпендикулярных. В двух оставшихся случаях происходило слияние трех облаков, при этом наблюдалась комбинация параллельных и перпендикулярных ячеек. Таким образом, эффективность слияния зависит от расположения облаков по отношению к сдвигу ветра в слое конвекции.

### 1.3. Облачный мост

Достаточно часто перед слиянием облаков наблюдается появление перемычки между облаками, которую в литературе называют облачным мостом. Он представляет собой облака нижнего или среднего ярусов, которые соединяют между собой сливающиеся облака [Orville et al., 1980; Simpson 1980; Fu, Xueliang, 2006; Westcott, 1984]. Причиной появления облачного моста, по мнению Симпсон и др., как было отмечено ранее, является взаимодействие холодных нисходящих потоков, формируемых сливающимися облаками [Simpson et al., 1980]. При столкновении указанных потоков из сливающихся облаков имеет место их конвергенция, что приводит к появлению облачного моста в промежутке между облаками (рис. 1.3).

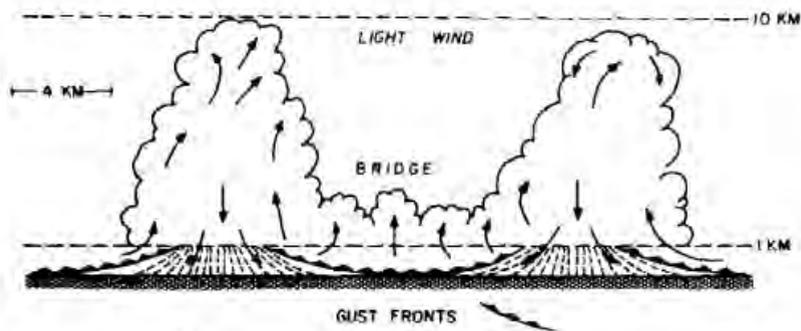


Рис. 1.3. Схема формирования облачного моста [Simpson et al., 1980].

Тао и Симпсон в своем исследовании [Tao, Simpson, 1984; Tao, Simpson, 1989] показали, что в месте существования облачного моста происходит развитие нового облака. Его появление связано также с областью конвергенции на низких уровнях в атмосфере. В этом месте происходит образование одного или нескольких облаков. Появление радиоэха в этом

месте обычно объясняется переносом облачных частиц соответствующими потоками в промежуток между сливающимися облаками [Simpson et al., 1971].

Изучению процесса слияния облаков в Китае с использованием мезомасштабной модели MM5 посвящена работа Фу и др [Fu, Xueliang, 2006]. Показано, что слияние часто начинается с формирования облачного моста на среднем уровне между двумя облаками за счет нисходящего движения из облаков. Взаимодействие компенсирующего восходящего потока с внешним потоком может усилить процесс слияния.

Каннинг и др. [Cunning et al., 1982] выполнили самолетные эксперименты и радиолокационные измерения, где было зафиксировано слияние облаков. При этом непосредственно с самолета наблюдалось появление облачного моста между сливающимися облаками. В этих исследованиях облачный мост, образовавшийся на низких уровнях в атмосфере, постепенно развивался по вертикали, соединив сливающиеся облака.

#### **1.4. Изменение физических характеристик облаков после слияния**

Слияние облаков оказывает сильное влияние на их последующее развитие. Как радиолокационные исследования, так и данные численного моделирования показали, что после слияния обычно происходит увеличение основных характеристик облака (площади образовавшегося облака, высоты верхней границы, радиолокационной метеорологической отражаемости, площади восходящего потока, скорости потоков, влажности, интенсивности торнадо и количества положительных молний) [Carey, Rutledge, 1998; Carey et al., 2000; Carey et al., 2003; Lang, Rutledge, 2002; Sinkevich, Krauss, 2014; Krauss et al., 2010; Синькевич, Краус, 2010]. Вместе с тем, увеличение площади объединенного облака наблюдается не во всех случаях. По данным Лопеза [Lopez,

1976], изменение площади в результате слияния зависит от размера сливающихся облаков: если они небольшие, площадь увеличивается; при слиянии же больших Сб, напротив, в некоторых экспериментах отмечалось уменьшение площади.

В работе Турпейнен [Turpeinen, 1982] выполнены численные эксперименты, в которых моделировалось слияние облаков и осуществлялось сравнение с натурными экспериментами. Аналогично данным натурных экспериментов, в модели происходило заметное увеличение всех радиолокационных характеристик после слияния. Наибольшее влияние этот процесс оказывал на площадь облака. Если перед слиянием площадь облаков была равна 1—4 км<sup>2</sup>, то после него она увеличилась до 13—16 км<sup>2</sup>. Увеличение отражаемости от слившихся облаков составило 18%.

Весткотт [Westcott, 1977] провела детальные исследования последствий слияния. Она рассматривала отдельно характеристики облаков после первого и последующих слияний. Установлена заметная разница в характеристиках таких облаков. После первого слияния облака имели площадь в 6 раз больше, чем до него, и существовали в среднем 1 ч, последующее (второе) слияние облаков приводило к тому, что продолжительность их жизни увеличивалась до 2 ч, а площадь возрастала в 10 раз. Во столько же раз увеличивалась интенсивность осадков и их количество. Более позднее исследование Весткотт [Westcott, 1994] показало, что слияние облаков может просто являться следствием их горизонтального расширения.

В работе [Тараненко, 1989] с помощью трехмерной модели в цилиндрической системе координат моделировалась эволюция мультячейковых конвективных облаков. Исследовалось взаимодействие конвективных ячеек между собой, а также образование дочерних ячеек, являющихся следствием разрушения предшествующих. Показано, что геометрическое

расположение импульсов начальных возмущений температуры играет определяющую роль при формировании геометрии мультячейкового облака. При задании близко расположенных перегревов у поверхности развивающиеся над ними восходящие потоки постепенно объединяются в единый поток. При этом горизонтальное распределение вертикальной скорости имеет несколько максимумов. По сравнению с эквивалентным однородным перегревом, охватывающим всю область, получается бóльшая вертикальная мощность облака и бóльший абсолютный максимум скорости восходящего потока. Таким образом, слияние ячеек способствует усилению конвекции и увеличению вертикальной мощности облаков.

По-видимому, единственной работой, в которой изучалось поведение нижней границы облаков при их слиянии, является работа [Westcott, 1994]. В общей сложности, в данном исследовании изучалось 90 случаев слияния. Нижняя граница облачного моста оказалась ниже, чем у сливающихся облаков. Причину автор работы видит в том, что дождевые капли переносятся в пространство между облаками, а воздух в подоблачном слое увлажняется за счет нисходящих потоков из сливающихся облаков.

### **1.5. Осадкообразование и другие микрофизические процессы в сливающихся облаках**

Динамические и микрофизические процессы в облаках неразрывно связаны между собой. Воздушные потоки, образование облачных частиц, фазовые переходы, коагуляция и осадкообразование оказывают влияние друг на друга посредством множества прямых и обратных связей. Подчеркнем важность процесса образования и выпадения осадков. Во-первых, осадкообразование оказывает огромное влияние на эволюцию облака, во-вторых, с выпадением осадков прямо или косвенно связаны все опасные явления погоды.

В результате слияния в облаке формируется более интенсивный восходящий поток и, соответственно, можно ожидать увеличения осадков по сравнению с изолированным облаком. Изменение динамики движения объемов облачного воздуха может приводить к тому, что они будут подвержены как процессам вовлечения, так и обратным, что в дальнейшем может привести к формированию многомодального спектра облачных частиц за счет взаимодействия новых появляющихся капель и остатков крупных облачных частиц [Kogan, Shapiro, 1996].

Симпсон [Simpson et al., 1971] указывает на то, что процесс слияния приводит к появлению более долгоживущих облаков, из которых выпадают осадки.

Количество и интенсивность осадков могут изменяться в результате этих процессов. Пока выполнено весьма ограниченное количество натурных экспериментов, где исследовалось изменение осадков вследствие слияния облаков. Здесь можно отметить работы американских специалистов. По их данным, полученным с помощью радиолокатора, слияние двух облаков средних размеров приводит к увеличению осадков в 10—20 раз [Orville et al., 1980]. Было также показано, что в южной Флориде 86 % осадков формируется из облаков, которые сливались, хотя на соответствующей площади 90 % облаков не участвовали в процессе слияния. Увеличение осадков в основном связано с увеличением площади облака, из которого они выпадают, а также времени существования облака. Интенсивность же осадков в слившихся облаках превосходит интенсивность в облаках перед слиянием только в 2 раза [Simpson et al., 1993].

В работе [Carey et al, 2000] исследовались характеристики облаков над тропическими островами вблизи Австралии с использованием радиолокатора и грозопеленгатора. Изучая Сб над островами, расположенными в тропиках, он показал, что результатом слияния облаков явилось существенное (на порядок

величины) увеличение количества ледяных кристаллов и жидких осадков. Все это сказалось на увеличении грозовой активности. В данном эксперименте только те облака, которые образовались в результате слияния, формировали грозовые разряды.

Образование и выпадение осадков определяется фазовыми и микрофизическими преобразованиями воды в облаках. В связи с этим важной задачей является исследование спектров капель и ледяных частиц.

В работе [Kogan, 1996] показано, что в результате попадания объемов воздуха из кучево-дождевого облака, находящегося в стадии зрелости или диссипации, в сливающуюся с ним новую ячейку часть крупных капель не успевает испариться. При этом появляющиеся новые капли растут в присутствии этих крупных капель, что существенно деформирует спектр облачных частиц. Этот спектр имеет трехмодальный вид, чего обычно не наблюдается в отдельных облаках. Автор подчеркивает, что капли осадков разных размеров имеют разные траектории движения в облаке. Исследования [Takahashi et al., 2001] показали, что в таких облаках происходит ускоренный рост крупы, и появляется большое количество замерзших капель.

### **1.6. Влияние слияния облаков на возникновение опасных явлений погоды**

Слияние облаков способствует усилению конвекции, и, соответственно, может приводить к появлению опасных явлений погоды, связанных с облаками — шквалов, гроз, катастрофических ливней, града и др.

В работе [Fu et al., 2006] моделировался процесс слияния облаков для случая мезомасштабной конвективной системы, сформировавшейся в окрестностях Пекина (Китай) и дававшей интенсивные грозы, ливни, град и шквалы. Использовалась мезомасштабная модель MM5. Наблюдалось поэтапное

объединение конвективных облаков: сначала происходило образование отдельных ячеек, затем их объединение в конвективные кластеры, а далее последние объединялись в суперячейковое кучево-дождевое облако. Слияние приводило к интенсификации нисходящих и восходящих потоков, создавая благоприятные условия для формирования большого количества ледяных частиц, за счет этого процесса происходило усиление осадков. Также усиливалась грозовая активность за счет формирования более интенсивных и мощных ячеек, где образуется больше частиц крупы. При этом процессе отмечался взрывной рост конвекции и более поздний пик молниевой активности.

Наличие сливающихся облаков нередко приводит к формированию изогнутого радиоэха [Klimowski et al., 2004], наблюдаемого при возникновении торнадо. В работе [Finley et al., 2001] было выполнено моделирование суперячейки (модель RAMS), породившей два слабых торнадо. Использование вложенных сеток позволяло моделировать процессы всех масштабов, начиная от синоптического и заканчивая масштабом смерчей. Моделируемое суперячейковое Сб поглощало другие конвективные облака и, в конечном итоге, приобрело форму изогнутого радиоэха с вращающейся структурой. Анализ результатов расчетов показал, что процессы, связанные с возникновением изогнутого радиоэха, порождены слиянием облаков, причем, слияние играло в этом определяющую роль.

Непосредственно наблюдения за слиянием облаков при формировании торнадо были выполнены в работе [Lee et al., 2006]. Анализировалось развитие кучево-дождевого облака и связанного с ним торнадо. Авторы показали, что слияние ячеек сыграло важнейшую роль в развитии кучево-дождевого облака. Всего было зафиксировано 26 слияний. Вращение ячеек приводило к изменению направления их движения и способствовало слиянию в 58 % случаев. Кроме того, различия в

вертикальной мощности при наличии сдвига ветра также сказывались на скорости перемещения ячеек. Как и в более ранних исследованиях, авторы отмечают усиление конвекции после слияния, что приводит к увеличению отражаемости. В данном эксперименте возникновение торнадо было, в основном, связано с появлением суперячейки в кучево-дождевом облаке. В эксперименте было зафиксировано 39 торнадо. Примерно в половине наблюдаемых случаев торнадо появлялись тогда, когда происходило слияние облаков, или во время, непосредственно предшествующее слиянию. Авторы объясняют эту закономерность влиянием нисходящих потоков от сливающихся облаков на процесс формирования торнадо.

### **1.7. Слияние облаков и активные воздействия на них**

Важнейшим прикладным направлением физики облаков является разработка и усовершенствование методов активных воздействий на облака и осадки с различными целями (вызывание дождя в засушливых районах, предотвращение ливней и градобитий, грозозащита различных объектов и др.).

Разработка методов воздействий на процесс слияния облаков может существенно расширить возможности активных воздействий.

Результаты исследований, приведенные выше, показывают, что слияние облаков является исключительно важным фактором, влияющим на их эволюцию. Естественно, что столь мощный механизм не остался в стороне от попыток его искусственного использования для увеличения осадков [Беляев и др, 1992; Берюлев и др., 1995; Довгалюк и др, 1990; Синькевич, 2001; Changnon et al., 1995; Czys et al., 1995; Levy, Cotton, 1984; Rosenfeld, Woodley, 1989; Rosenfeld, Woodley, 1993]. Полученные результаты позволяют предположить, что это является перспективным путем развития активных

воздействий с целью увеличения осадков. Сливающиеся облака формируют более интенсивный восходящий поток и, видимо, могут формировать осадки в большем количестве, чем сливающиеся облака в отдельности [Levy, Cotton 1984; Rosenfeld, Woodley, 1989; Rosenfeld, Woodley, 1993; Changnon et al., 1995; Czys et al., 1995].

Часто воздействия проводятся на фидерные облака, которые в дальнейшем сливаются с материнским облаком [Довгалюк и др., 1990]. Можно выделить исследование, выполненное в Греции, когда самолетные воздействия йодистым серебром проводились на сливающиеся облака [Karacostas et al., 2016]. Целью работ было предотвращение града. Воздействия в натурном эксперименте выполнялись до и после того, как облака слились.

Далее было выполнено численное моделирование этого случая. Применялась трехмерная модель облака. В модели использовалось двухмоментное описание микрофизических процессов (уравнения баланса записаны как для массы облачных частиц, так и для их счетной концентрации). Основной задачей исследования было определение наиболее подходящего времени для проведения воздействий. В частности, с использованием моделирования сравнивались результаты воздействий для двух случаев: 1) воздействия проводятся перед слиянием на сливающиеся облака; 2) воздействия проводятся на уже объединенное облако. В результате такого сравнения было получено, что в первом случае количество града уменьшается на 21 %, а во втором случае — только на 9 %. Воздействия приводят к появлению осадков раньше, чем в естественном цикле развития; наблюдается динамический эффект, проявляющийся в небольшом увеличении скорости восходящего потока. Моделирование также показало значительное взаимное влияние динамических и микрофизических процессов в облаке. Для иллюстрации этого ниже приведен рис. 1.4, где

представлено поле радиолокационной отражаемости в районе сливающихся облаков. Верхние три рисунка представляют собой данные радиолокационных измерений, полученные с использованием программы вторичной обработки информации TITAN [Dixon, Wiener, 1993], нижние — результаты моделирования. В целом, процесс слияния облаков в модели оказывается идентичным тому, который наблюдался в натуральных условиях. Результаты моделирования хорошо совпали с данными натурных измерений, что видно из рис. 1.4.

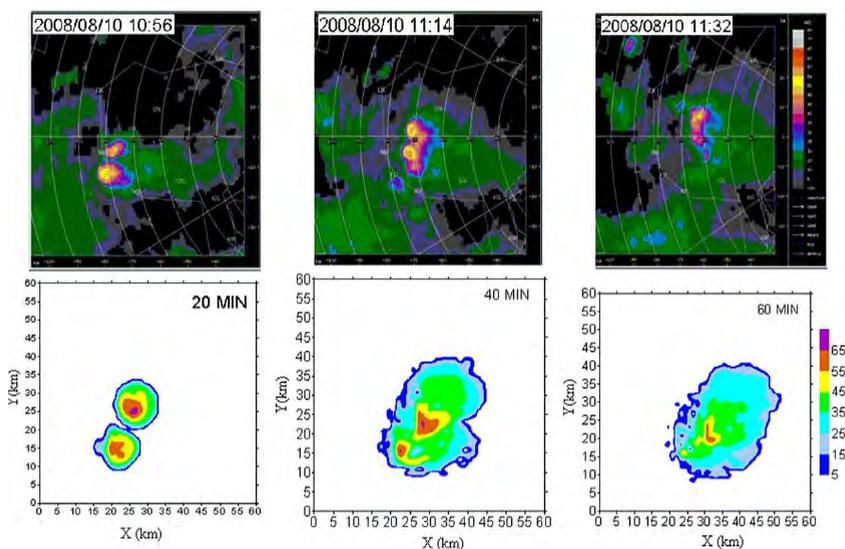


Рис. 1.4. Радиолокационное сечение облаков в три момента времени (вверху);  
 результаты моделирования отражаемости облаков  
 для трех моментов времени (внизу).  
 Высота — 5,2 км [Karacostas et al., 2016].

Суммируя опубликованные данные, можно утверждать, что качественный эффект влияния слияния на характеристики облака, который проявляется в существенном усилении конвекции и особенно осадкообразующей способности облаков,

не вызывает сомнения, однако количественный эффект был получен лишь для отдельных наблюдаемых случаев.

Практически отсутствуют исследования, которые позволяют по состоянию атмосферы (вертикальные профили температуры, влажности, вектора скорости ветра и др.) прогнозировать вероятность возникновения рассматриваемого явления.

Отметим также, что изучение слияния облаков в основном выполнялось в тропических районах, это явление мало изучено при развитии конвективных облаков в высоких широтах.

## ГЛАВА 2 РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1. Определения и выбор облаков для анализа

В монографии мы используем следующие определения. Кучево-дождевое облако — это облако, которое существовало длительное время (обычно более 1 часа), для которого программа вторичной обработки радиолокационной информации выделяла соответствующую ячейку, и отражаемость этой ячейки превышала заданный порог. Иногда в тексте оно называется материнским. Далее рассматриваемое облако сливалось с новой появившейся ячейкой — фидерным облаком. Это – обычно *Cu cong* (в ряде случаев — *Cb*), которое развивается рядом с кучево-дождевым облаком и существует меньшее время, чем *Cb*. Программа вторичной обработки радиолокационной информации формирует ячейку, соответствующую фидерному облаку, она сливается с кучево-дождевым облаком. В данном исследовании мы анализировали случаи слияния только тогда, когда программа вторичной обработки информации формировала ячейки как от основного кучево-дождевого, так и от фидерного облака, и когда только одно фидерное облако сливалось с *Cb*.

На рис. 2.1 приведена схема сливающихся облаков. Развивающиеся фидерные облака, находящиеся справа от кучево-дождевого, последовательно сливаются с ним. Линией 1 показана трасса полета самолета, который осуществляет воздействие на фидерное облако в его верхнюю переохлажденную часть. Представлена также фотография кучево-дождевого облака *Cb cap inc*. Облако сформировало обширную наковальню. В правой части рисунка видны развивающиеся фидерные облака, примыкающие к кучево-дождевому.

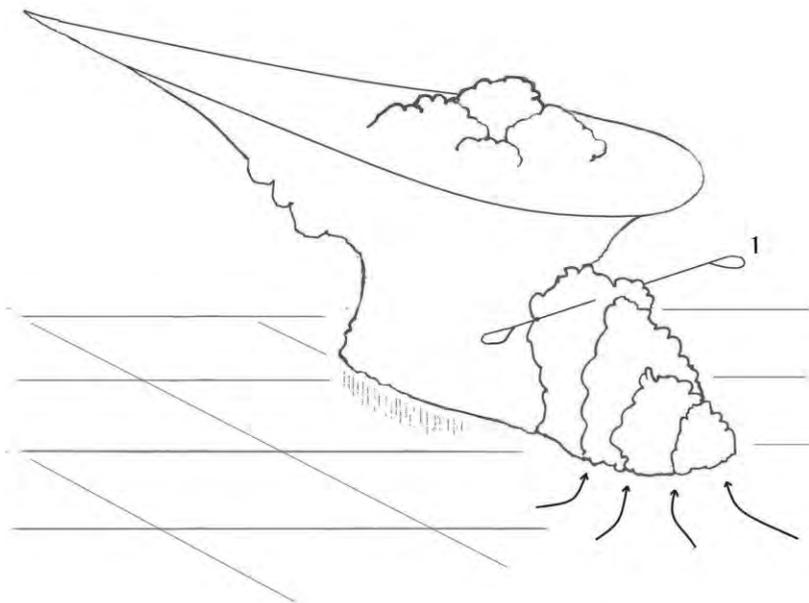


Рис. 2.1. Схема и фотография сливающихся облаков.

В большинстве случаев при анализе экспериментов по слиянию облаков их характеристики были получены для нескольких периодов времени. Они включали время «0», то есть, время, соответствующее скану радиолокатора перед процессом слияния;  $-5$  и  $-10$  мин — время, соответствующее предыдущим сканам радиолокатора;  $+5$ ,  $+10$ ,  $+15$ ,  $+20$  мин — время, соответствующее последующим сканам радиолокатора. Отметим, что  $+5$  мин — время сразу после слияния облаков. Такой анализ позволил получить характеристики кучево-дождевого облака в динамике. Если наблюдались процессы слияния с другими ячейками кучево-дождевого облака или его деление на несколько ячеек, то данные, полученные для соответствующих времен, не использовались при анализе.

## **2.2. Энергия неустойчивости атмосферы в дни со слиянием облаков**

Для задач прогноза опасных явлений очень важно знать, при каких атмосферных условиях может происходить слияние облаков. Для характеристики атмосферы обычно используют физическую величину — энергию неустойчивости атмосферы (CAPE). Более высокие значения энергии неустойчивости указывают на более интенсивную конвекцию в атмосфере, то есть, на более высокую вероятность возникновения опасных явлений погоды. Общий запас энергии неустойчивости в атмосфере находится как алгебраическая сумма энергий неустойчивости отдельных слоёв  $E_i$ . Параметр  $E_i$  — это работа, совершаемая силой плавучести при адиабатическом подъеме единичной массы воздуха от нижней ( $z_0$ ) до верхней ( $z_1$ ) границы слоя:

$$E_i = g \int_{z_0}^{z_1} (T_i - T_e) dz / p^{0,286}, \text{ [Дж/кг]},$$

где  $T_i$  — температура частицы воздуха,  $T_e$  — температура окружающего воздуха,  $g$  — ускорение свободного падения.

Распределение температуры и температуры точки росы с высотой для одного из исследованных дней приведено на рис. 2.2.

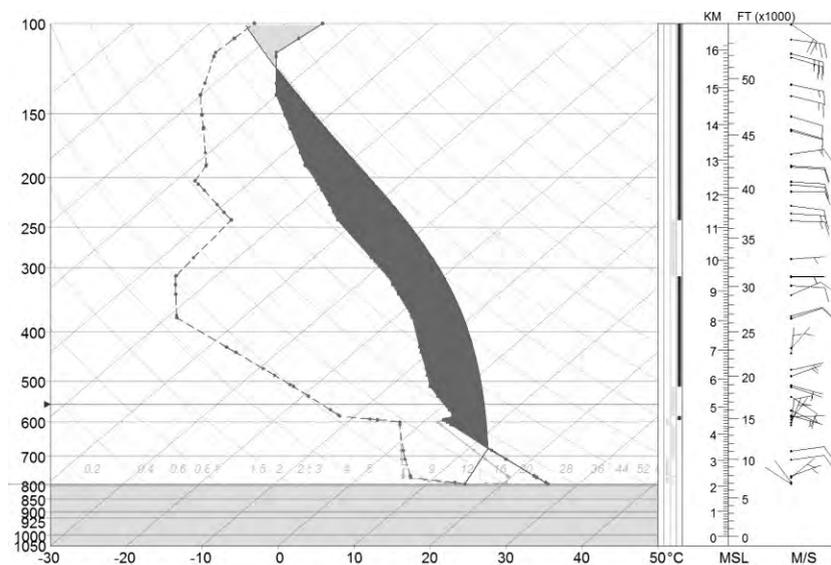


Рис. 2.2. Распределение температуры и температуры точки росы с высотой, кривая состояния (6 сентября 2008 г., г. Абха).

В атмосфере наблюдалась значительная вертикальная термическая неустойчивость. При построении траектории движения влажной частицы за приземную температуру принято значение  $+26\text{ }^{\circ}\text{C}$  — максимальное значение температуры в г. Абха (Саудовская Аравия) в период развития облака, температура точки росы равнялась  $+16\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Анализ данных радиозондирования показал, что влажность в облакообразующем слое, начиная с высоты 4,4 км, очень низкая. В большей части этого слоя относительная влажность не превосходит 20 %, что характерно для атмосферы в данном

районе. Высота верхней границы облаков, полученная из расчетов методом частицы, была равна 15,9 км, а высота нижней границы — 3,4 км. Запас энергии неустойчивости в слое развития конвекции составлял 3720 Дж/кг. Заметный сдвиг ветра отмечался на низких уровнях вблизи земной поверхности, где приземный ветер северо-западного направления изменялся на восточный. Такое распределение ветра с высотой, когда наблюдается его изменение от западного у земной поверхности до восточного на больших высотах (при этом изменение направления сопровождается изменением скорости), также типично для данного района. Наличие сдвига ветра способствует более длительному жизненному циклу облаков и формированию града.

Ниже представлены результаты расчетов энергии неустойчивости для дней со слиянием облаков, развивавшихся в юго-западной части Саудовской Аравии в провинции Асир в период июнь – сентябрь 2008 г [Краус и др., 2012]. В общей сложности слияние облаков наблюдалось в течение 31 дня. Полученные значения энергии неустойчивости весьма велики. Среднее и медианное значения в распределении приближаются к 5000 Дж/кг (4969 и 4864 Дж/кг соответственно) — рис. 2.3.

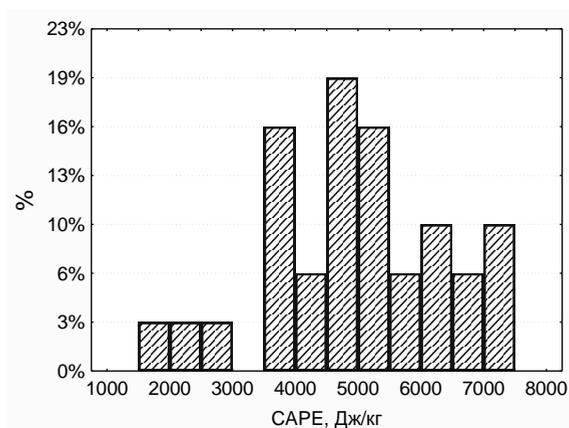


Рис. 2.3. Гистограмма распределения значений энергии неустойчивости.

Только в 10 % случаев значения энергии неустойчивости были меньше 3000 Дж/кг. Максимальное значение было равно 7264 Дж/кг. Эти результаты свидетельствуют о том, что слияние облаков в тропиках обычно происходит в условиях очень нестабильной атмосферы, характеризуемой большой энергией неустойчивости. Этот вывод нельзя распространять на все регионы: например, на Северо-Западе России мы наблюдали слияние облаков при небольшой энергии неустойчивости, равной 628 Дж/кг.

### 2.3. Структура радиоэха облака

В связи с тем, что наибольшее количество исследований слияния облаков выполнено с использованием радиолокаторов, здесь мы рассмотрим характерные изменения в структуре радиоэха в процессе слияния. В качестве примера рассмотрим слияние облаков, которое наблюдалось в Саудовской Аравии [Краус и др., 2012].

Горизонтальные и вертикальные радиолокационные сечения облаков, развивавшихся вблизи города Абха 6 сентября 2008 г. для 7 моментов времени, характеризующих разные стадии этого процесса, приведены на рис. 2.4.

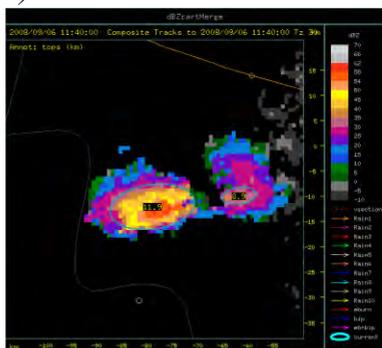
Исследуемые облака (обозначим левое «1», а правое — «2») находились на расстоянии примерно 5 км друг от друга в 11 ч 15 мин (BCB). Из радиолокационного вертикального сечения видно, что облако 1 находится в кучево-дождевой стадии развития. Оно достаточно хорошо развито по вертикали, его верхняя граница располагается вблизи 13 км. Из облака выпадают интенсивные осадки, отражаемость в зоне осадков составляет 50—55 дБZ. Ширина зоны осадков составляет 5—7 км. Облако 2 значительно меньше по размерам, чем 1, его верхняя граница располагается вблизи 8 км, а отражаемость в нем не превосходит 30 дБZ. Оба облака развиваются, наблюдается увеличение высоты их верхней границы

(к 11 ч 50 мин верхняя граница облака 1 достигает 15 км, а облака 2—11 км). В облаке 2 происходит значительное увеличение отражаемости, которая достигает 45 дБZ, формируется зона осадков, которая хорошо видна на представленном вертикальном разрезе. Облака сближаются за счет увеличения горизонтальных размеров, начинает формироваться облачный мост (область повышенной отражаемости между облаками). Через 5 мин (11 ч 55 мин) начинается фактическое слияние облаков. На горизонтальном и вертикальном сечениях видно, что происходит увеличение отражаемости в зоне между облаками, ее значение составляет 15—30 дБZ. Горизонтальный размер этой зоны пока незначителен и равен 1—2 км.

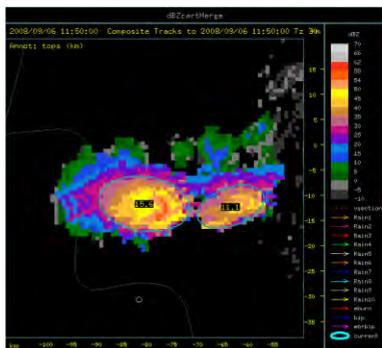
Продолжается вертикальное развитие облаков, их верхняя граница увеличивается еще примерно на 1 км. К 12 ч 00 мин происходит фактическое слияние облаков, верхняя граница в зоне формирования облачного моста достигает 8 км. Резко возрастает отражаемость в верхней части облачного моста, составляя 55 дБZ, указывая на то, что крупные облачные частицы были вынесены из облаков в зону формирования облачного моста. Можно предположить, что эти частицы попали туда из облака 1, так как зона его повышенной отражаемости непосредственно примыкает к облачному мосту.

Последний значительно увеличился в своих горизонтальных размерах: его протяженность приблизительно равна 10 км, он полностью заполнил пространство между облаками. Происходит развитие облака по вертикали в зоне облачного моста. К 12 ч 05 мин верхняя граница облака здесь уже достигает 13 км. Однако, по-прежнему на радиолокационном сечении отчетливо видно наличие двух ячеек, соответствующих исследуемым облакам 1 и 2. Через 5 мин появляется зона осадков в районе облачного моста.

a)



11 ч 40 мин



11 ч 50 мин

б)

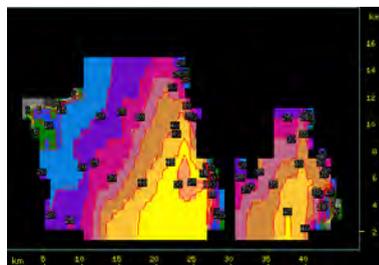
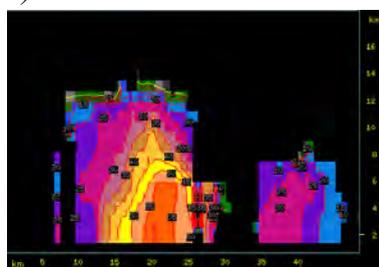


Рис. 2.4. Горизонтальное (а) и вертикальное (б) радиолокационные сечения исследуемых облаков (направление сечения запад – восток) для 5-минутных периодов времени, соответствующих сканам радиолокатора с 11 ч 40 мин до 12 ч 20 мин.

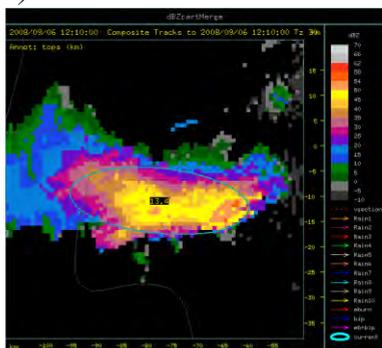
Цветом выделены области отражаемости выше заданного порога, изолинии показывают пространственное расположение соответствующих зон отражаемости.

Горизонтальная ось — расстояние в км, вертикальная ось — высота над уровнем моря.

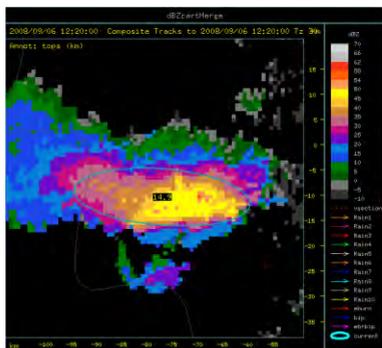
Облако аппроксимируется эллипсом на горизонтальном сечении, в центре указана высота верхней границы облака.



a)



12 ч 10 мин



12 ч 20 мин

б)

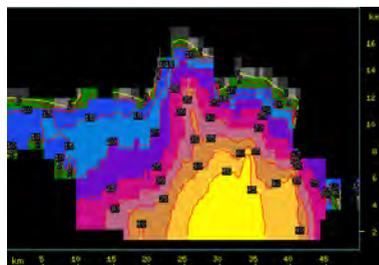
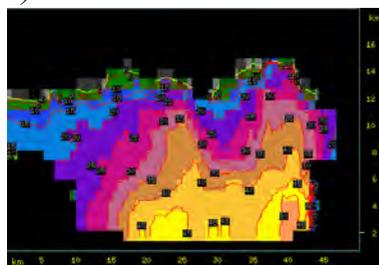


Рис. 2.4. (продолжение)

Фактическое объединение облаков завершается в 12 ч 20 мин, когда формируется единая зона осадков шириной более 10 км.

Объединенное облако превратилось в суперячейковое кучево-дождевое облако с верхней границей вблизи 16 км. Горизонтальная протяженность этого кучево-дождевого облака составляет к этому времени около 35 км. Весь процесс слияния облаков занял около 40 мин.

Совершенно очевидно, что часть относительно крупных облачных частиц, которые появились и не выпали в виде осадков из облака 1, попадает во вновь сформированное облако и имеет шансы вырасти до крупных частиц осадков или града. Видимо, этот механизм является достаточно важным, ответственным за формирование как крупных градовых частиц, так и очень интенсивных осадков, порой катастрофических, из таких облаков в этом районе.

## 2.4. Высота верхней границы

Рассмотрим характерную зависимость высоты верхней границы кучево-дождевых облаков от времени относительно момента слияния. Здесь мы приводим данные измерений характеристик двух облаков, развивавшихся в разных географических широтах — на Северо-Западе России и в Саудовской Аравии. Облака имели существенно разные характеристики.

На Северо-Западе России анализируется случай слияния облаков, который наблюдался 3 августа 2015 г. в районе Санкт-Петербурга [Синькевич и др, 2018a]. Было исследовано кучево-дождевое облако с максимальной высотой верхней границы 10 км (на рис. 2.5, вверху).

В Саудовской Аравии исследовано кучево-дождевое облако в провинции Асир, развитие которого наблюдалось 15 июля 2008 г. Облако было существенно больших размеров, его верхняя граница после слияния достигла 17 км (на рис. 2.5 внизу). Оба облака имели высоту верхней границы, которая была близка к высоте тропосферы, которая существенно уменьшается в высоких широтах. Ниже приводится радиолокационный разрез этих облаков, полученный непосредственно перед их слиянием.

Расстояние между обеими парами облаков непосредственно перед слиянием составляло около 5 км. При этом между

сливающимися облаками на Северо-Западе России в нижней части появилась область повышенной отражаемости (облачный мост).

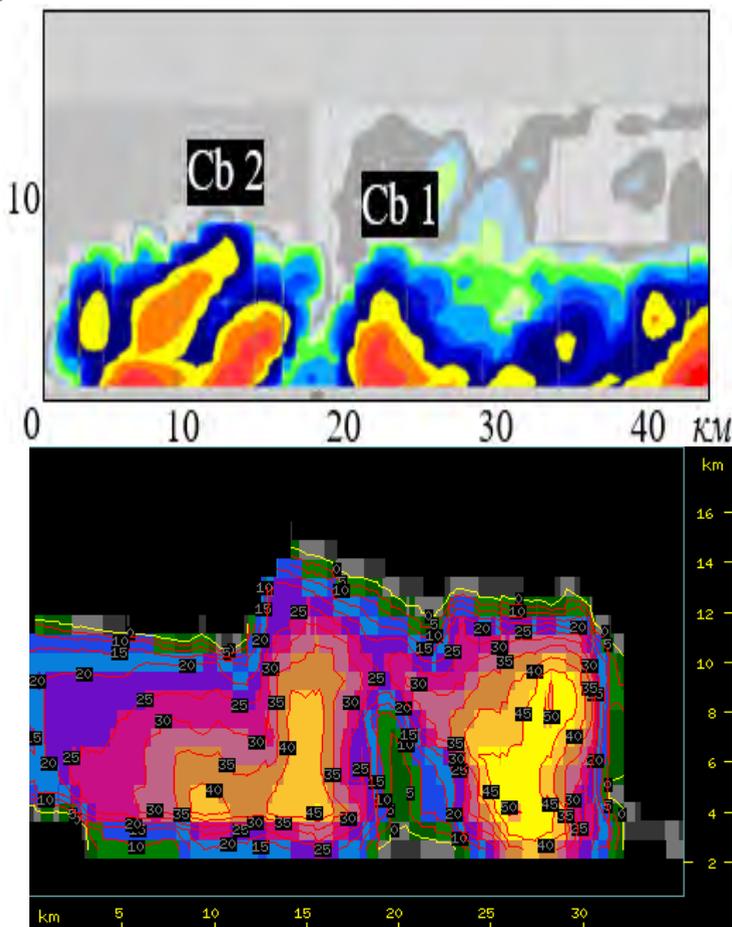


Рис. 2.5. Вертикальное радиолокационное сечение облаков, характеристики которых представлены ниже, перед слиянием.

Аналогичная зона повышенной отражаемости наблюдается и в облаках Саудовской Аравии, при этом в верхней части облака отражаемость достаточно велика и достигает 30 дБZ. Это указывает на то, что достаточно крупные частицы (можно

полагать, что это кристаллы) переносятся в пространство между сливающимися облаками, формируя зону повышенной отражаемости. Эти кристаллы в дальнейшем имеют шансы вырасти до частиц града. Учитывая, что их размер уже достаточно велик, они могут вырасти до крупных градовых частиц после слияния облаков.

На рисунке 2.6 приводятся значения высоты верхней границы для основного (материнского) и сливающегося (фидерного) облаков. Напомним, что «0»-время, согласно нашему определению, — это время до объединения облаков, а «+5 мин» — это время следующего измерения после произошедшего слияния (в этом случае представлены характеристики уже объединенного облака).

Высота верхней границы кучево-дождевого облака, развивавшегося на Северо-Западе России, уменьшилась к моменту слияния почти на 1 км (рис. 2.6), что свидетельствует о том, что облако находилось в стадии диссипации.

Сливающееся фидерное облако находилось в стадии стационарирования, когда высота верхней границы слабо изменялась во времени. Их слияние привело к существенному росту облака, верхняя граница достигла высоты 10 км уже через 10 мин после слияния. В дальнейшем происходило ее постепенное уменьшение.

Исследованное облако в Саудовской Аравии разрушалось до –5 мин. Затем начался рост верхней границы, при этом фидерное облако интенсивно развивалось. Его верхняя граница выросла на 2,2 км за 15 мин, скорость роста вершины составила 2,4 м/с. После слияния развитие облака по вертикали усилилось, при этом за 10 мин высота верхней границы увеличилась на 5,2 км. Скорость роста вершины была равна 8,8 м/с, что существенно больше, чем скорость роста высоты вершины фидерного облака.

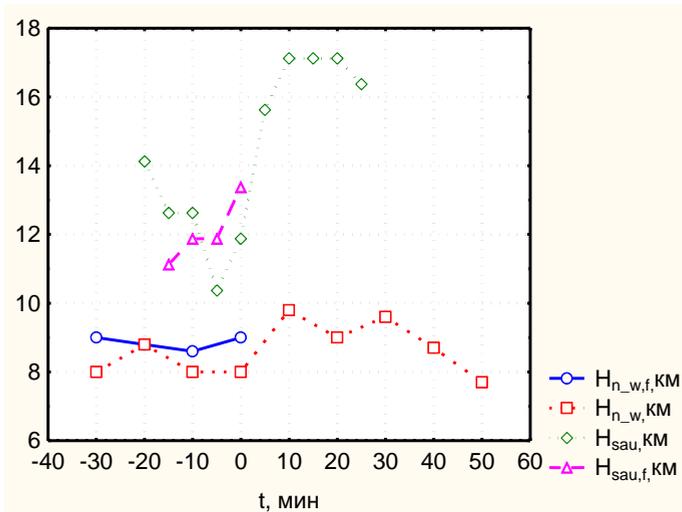


Рис. 2.6. Изменения во времени высоты верхней границы облаков.

$H_{n_w,f}$ ,  $H_{n_w}$ ,  $H_{sau,f}$ ,  $H_{sau}$  — высота верхней границы фидерного и материнского облаков Северо-Запада России и Саудовской Аравии соответственно.

## 2.5. Максимальное значение радиолокационной отражаемости

Максимальная отражаемость от облака  $Z_m$  является важной характеристикой при анализе данных измерений. Все применяемые программы вторичной обработки радиолокационной информации представляют этот параметр. Учитывая, что отражаемость зависит от размеров частиц в шестой или четвертой степени, а от концентрации частиц в первой степени, то она в значительной степени характеризует наличие крупных частиц. Напомним, что для случая смешанного облака и некогерентного рассеяния отражаемость определяется как сумма отражаемости от капель и кристаллов [Синькевич, Краус, 2012]:

$$Z = Z_w + Z_i$$

Для капель отражаемость  $Z_w$  ( $\text{мм}^6/\text{м}^3$ ) пропорциональна шестой степени их диаметра и определяется спектральным распределением по размерам в предположении рэлеевского рассеяния:

$$Z_w = \sum_b N_b D_{bw}^6$$

где  $N_b$  — концентрация частиц ( $\text{м}^{-3}$ ), а  $D_{bw}$  — диаметр капель в соответствующем бине ( $\text{мм}$ ).

Для кристаллических облаков отражаемость может быть найдена из уравнения [Степаненко, 1973]:

$$Z_i = 0,267 \sum_b N_b D_{bi}^6 \rho_i^2$$

при этом  $D_{bi} = (D_x + D_y) / 2$ ;  $D_x$ ,  $D_y$  — размеры кристалла во взаимно перпендикулярном направлении ( $\text{мм}$ ), обычно используется средний размер кристалла;  $\rho_i$  — плотность льда ( $\text{г}/\text{см}^3$ ). Как правило, плотность льда в кристаллах неизвестна, в этом случае применяют формулы, полученные эмпирическим путем [Matrosov et al., 2002]:

$$Z_i = 0,0013 \sum_b N_b D_{bi}^{3,8} \quad \text{— для } D > 100 \text{ мкм,}$$

$$Z_i = 0,2 \sum_b N_b D_{bi}^6 \quad \text{— для } D < 100 \text{ мкм.}$$

Возвращаясь к анализу изменений максимальной отражаемости от облаков в процессе их слияния, отметим следующие закономерности. К моменту слияния у обоих сливающихся облаков Северо-Запада России (рис. 2.7) наблюдалось уменьшение  $Z_m$ . При этом уменьшение отражаемости было достаточно значительным и составляло около 6 дБZ. После слияния происходит существенное увеличение  $Z_m$ , достигшего в данном случае 14 дБZ через 30 мин

после слияния. Это свидетельствует о появлении крупных облачных частиц, имеющих достаточно высокую концентрацию. Для облака, исследованного в Саудовской Аравии, изменения максимальной отражаемости до момента слияния происходили по другому. Наблюдалось уменьшение  $Z_m$  до момента слияния у материнского облака и существенное увеличение этой характеристики у фидерного облака. После слияния продолжается увеличение  $Z_m$  в уже объединенном облаке вплоть до 25 мин. Можно предположить, что увеличение отражаемости было связано с продолжавшимся развитием фидерного облака уже в составе объединенного кучево-дождевого.

Высота расположения уровня максимальной отражаемости также является важной характеристикой, которая показывает изменения в структуре облака. Для случая слияния облаков на северо-западе не было отмечено каких-либо существенных изменений в этой характеристике после слияния облаков.

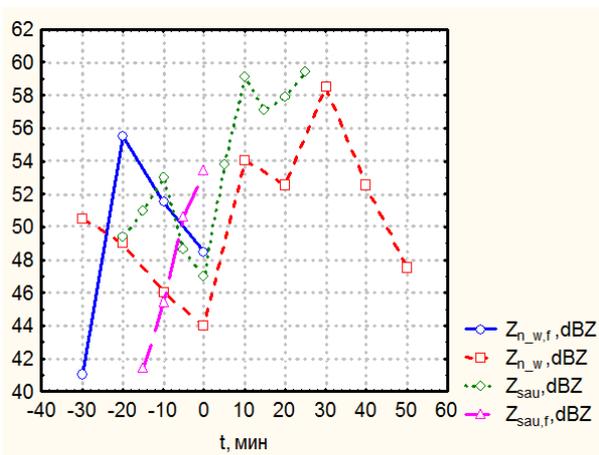


Рис. 2.7. Изменения во времени значений максимальной отражаемости от облаков.

$Z_{n_w,f}$ ,  $Z_{n_w}$ ,  $Z_{sau,f}$ ,  $Z_{sau}$  — отражаемость фидерного и материнского облаков Северо-Запада России и Саудовской Аравии соответственно.

Максимум отражаемости находился вблизи 1 км в обоих сливавшихся облаках и не изменился после слияния. Для облаков Саудовской Аравии после слияния прослеживается изменение в этой характеристике.

На рис. 2.8 представлен временной ход высоты, соответствующей положению максимальной отражаемости для материнского и фидерного облаков.

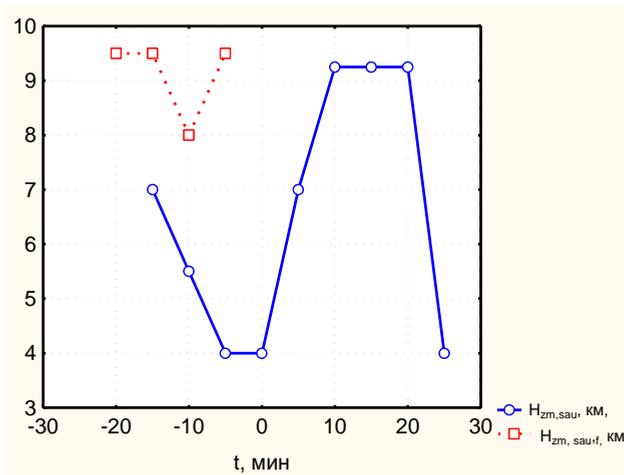


Рис. 2.8. Изменения во времени значений высоты расположения максимальной отражаемости от облаков.

$H_{zm, \text{sau},f}$ ,  $H_{zm,\text{sau}}$  — отражаемость от фидерного и материнского облаков в Саудовской Аравии соответственно.

Из рисунка видно, что уровень расположения максимального значения отражаемости в материнском облаке понижается перед слиянием облаков до 4 км, а после слияния происходит его существенное увеличение до 9,3 км. При этом уровень максимального значения отражаемости в фидерном облаке перед слиянием располагался вблизи этой высоты. Таким образом, после слияния максимум отражаемости наблюдался достаточно высоко и соответствовал высоте, наблюдавшейся в

фидерном облаке. Учитывая, что отражаемость была равна 59 дБZ, можно утверждать, что на этой высоте формировались частицы града. Повышение уровня расположения зоны максимальной отражаемости встречается достаточно часто при слиянии облаков, это свидетельствует о том, что слияние приводит к росту облачных частиц, часто формируя частицы града достаточно больших размеров.

## 2.6. Площадь, объем и масса облака

Геометрические размеры облака и его масса должны увеличиваться при слиянии облаков. Вопрос состоит в том: является ли это увеличение простым суммированием указанных характеристик, или вследствие динамических эффектов происходит их более сильное возрастание. Изменения площади радиолокационной отражаемости для рассматриваемых облаков в процессе слияния представлены на рис. 2.9.

Здесь приводятся данные об изменении площади фидерных облаков. Видно, что оба облака в процессе своего развития увеличивали площадь радиоэха до момента слияния. Кривые изменения площади материнского облака построены следующим образом: до слияния площадь вычислялась, как сумма площадей сливающихся облаков, после слияния это — площадь объединенного облака. Для облака, исследованного на Северо-Западе России, в период до слияния происходит уменьшение площади, после слияния наблюдается резкое увеличение площади объединенного облака, которая через 20 мин после слияния превосходит сумму площадей сливающихся облаков в 1,5 раза. Для облака, исследованного в Саудовской Аравии, также отмечается увеличение соответствующей площади в 1,7 раза.

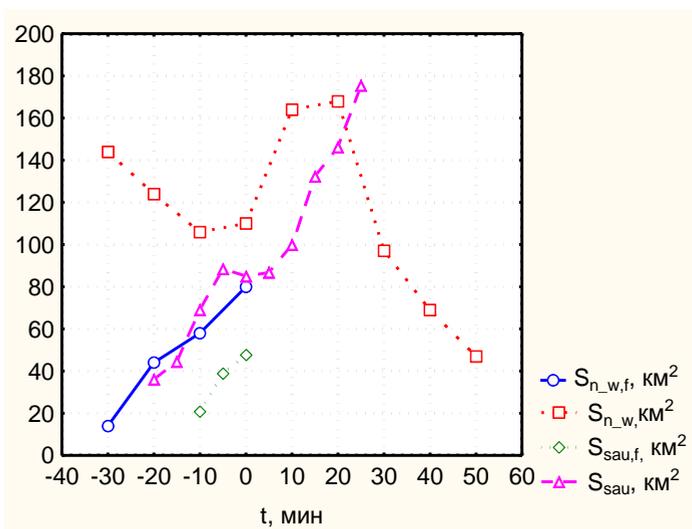


Рис. 2.9. Изменения во времени площади радиолокационной отражаемости от облаков.

$S_{n_w,f}$ ,  $S_{n_w}$ ,  $S_{sau,f}$ ,  $S_{sau}$  — отражаемость фидерного и материнского облаков Северо-Запада России и Саудовской Аравии соответственно.

Современные программы вторичной обработки радиолокационной информации позволяют получать также объем и массу облаков [Dixon, Wiener, 1989]. Аналогично анализу изменений площади облаков выполнен анализ изменения объема и массы облака в процессе слияния, наблюдавшегося в Саудовской Аравии. Результаты измерений представлены на рис. 2.10.

По мере развития фидерного и материнского облаков происходит увеличение их суммарной массы и объема до  $-10$  мин. Далее отмечается небольшое уменьшение объема. После слияния и объем, и масса облака начинают стремительно увеличиваться, на 20 мин объем облака превосходит объем, измеренный на 0 мин в 2,4 раза, а масса возрастает в 3,2 раза.

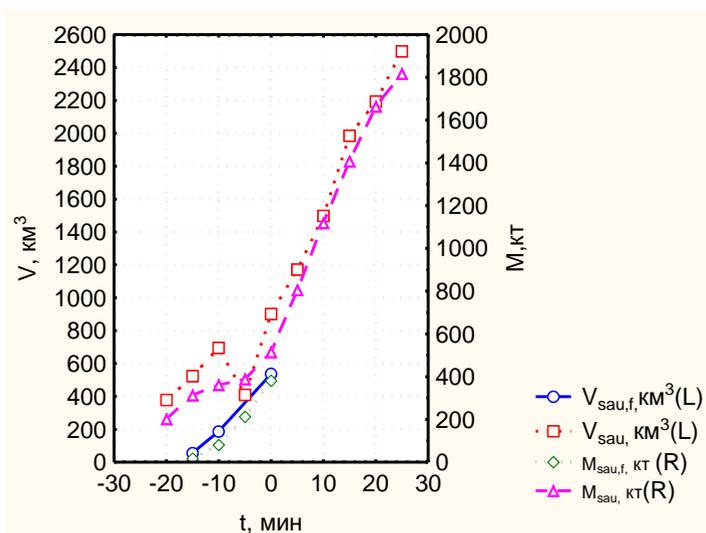


Рис. 2.10. Изменения во времени объема и массы облаков.

$V_{z\text{m, sau,f}}, V_{z\text{msau}}, M_{z\text{m, sau,f}}, M_{z\text{msau}}$  — объем и масса фидерного и материнского облаков в Саудовской Аравии соответственно.

## 2.7. Интенсивность и поток осадков

Рассмотрим влияние процесса слияния облаков на интенсивность осадков из них. Здесь приводится значение максимальной интенсивности, полученной из данных радиолокационных измерений для облака, развивавшегося на Северо-Западе России.

К моменту слияния облаков (материнского и фидерного) осадки из них ослабевали, максимальная интенсивность осадков уменьшилась по отношению к интенсивности на  $-20$  мин в 2—3 раза. Слияние облаков резко изменило ход кривой, отмечается существенное возрастание осадков, интенсивность которых достигла максимума на 30 мин развития, увеличившись в 7 раз (рис. 2.11).

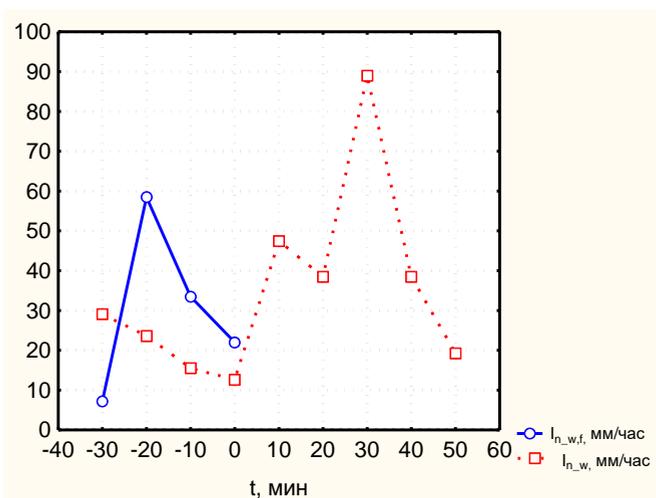


Рис. 2.11. Изменения во времени интенсивности осадков.

$I_{n_w.f}$ ,  $I_{n_w}$  — интенсивности осадков фидерного и материнского облаков Северо-Запада России.

Весьма информативным параметром является поток осадков из облаков. Поток осадков рассчитывается как интеграл от интенсивности осадков  $I(x, y)$  по площади облака ( $S$ ):

$$F = \int_S I(x, y) dx dy .$$

Здесь суммируются потоки осадков от двух облаков перед их слиянием и отдельно показывается поток осадков фидерного облака. Результаты измерений представлены на рис. 2.12.

Прежде всего, обратим внимание на величины потоков осадков в обоих регионах, которые превосходят  $200 \text{ м}^3/\text{с}$ . Из кучево-дождевых облаков выпадает громадное количество осадков, даже небольшие изменения в их потоке с помощью методов активных воздействий дают громадный экономический эффект. Сравнивая поток осадков, выпадающий из облака на

Северо-Западе России и в Саудовской Аравии (в тропическом районе), можно даже на этом примере отметить существенную разность. В данном случае поток осадков в Саудовской Аравии более, чем в 5 раз превосходит тот, который наблюдается на Северо-Западе России. При этом отметим, что вертикальная протяженность облака для Саудовской Аравии оказывается больше лишь в 2 раза.

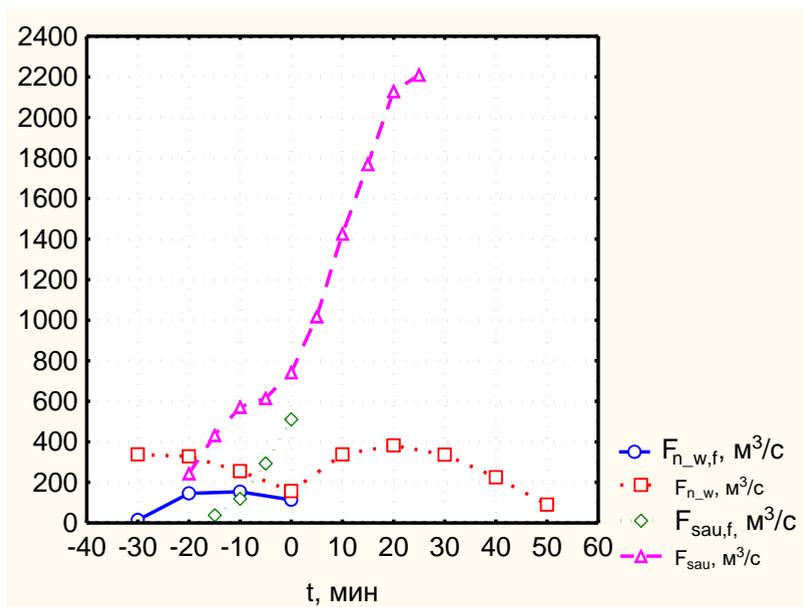


Рис. 2.12. Изменения во времени потока осадков, формируемых облаками.

$F_{n_w,f}$ ,  $F_{n_w}$ ,  $F_{sau,f}$ ,  $F_{sau}$  — поток осадков, формируемый фидерным и материнским облаками Северо-Запада России и Саудовской Аравии соответственно.

Возвращаясь к вопросу о слиянии облаков, отметим следующее. Для облаков, развивавшихся на Северо-Западе России, отмечается некоторое уменьшение потока осадков к

моменту слияния. На 20 мин зафиксирован максимальный поток осадков, который превосходит суммарный поток от сливающихся облаков на 0 мин развития в 2 раза. Поток осадков от фидерного облака в Саудовской Аравии увеличивался до момента слияния, а от материнского облака достиг максимума на –10 мин и далее уменьшался. Суммарный поток осадков от двух облаков возрастал до момента слияния, при этом скорость его увеличения возросла после слияния облаков. На 20 мин развития поток осадков, формируемый исследуемым облаком, превосходил поток осадков от сливающихся облаков в 0 мин в 2,9 раза. Таким образом, представленные примеры указывают на то, что после слияния происходит интенсификация процесса формирования осадков, поток осадков от объединенного облака возрастает в 2—3 раза.

## 2.8 Движение облаков

Траектория движения мощных кучевых и кучево-дождевых облаков отличается от прямолинейной. На нее существенно влияют процессы формирования новых фидерных облаков, которые сливаются с материнским облаком. Для выяснения изменения траектории движения кучево-дождевых облаков вследствие процесса слияния с фидерными сначала рассмотрим общие закономерности движения кучево-дождевых облаков. Здесь представлены результаты исследований, которые были выполнены в провинции Альберта (Канада) в рамках проекта по предотвращению града [Krauss, Santos, 2004; Gilbert et al., 2016; Краус, Синькевич, 2007].

Исследования движения облаков выполнялось с помощью радиолокатора. Важно подчеркнуть, что здесь и далее под движением (перемещением) облака понималось перемещение в пространстве радиоза. При работе радиолокатора применялось программное обеспечение Титан [Dixon, Wiener, 1993; Mather et al., 1996]. Для данного анализа программа Титан была настроена

таким образом, чтобы выделять радиоэхо со следующими параметрами: отражаемость более 40 дБZ, объем радиоэха более 10 км<sup>3</sup> на высоте более 3 км. Более того, только облака, которые существовали более 10 мин и верхняя граница которых превышала 7,5 км, являлись предметом исследования.

Обработка данных радиолокационных наблюдений включала построение автоматизированной системой Титан эллипса максимальной отражаемости от облака, который проецировался на поверхность Земли. Центр эллипса находился автоматически и принимался за положение облака. Далее осуществлялся анализ его перемещения. Координаты центра эллипса использовались в качестве координат облака.

Для анализа движения вычислялся вектор **L** между положением облака в двух соседних сканах и строилась траектория движения облака. При этом далее использовалась информация об относительном угле вектора  $\alpha$  (по отношению к направлению запад – восток) и длине вектора **L**.

Для изучения движения облаков были выбраны дни 20, 28, 29 и 30 июля 2005 г (здесь и далее указывается международное согласованное время). В табл. 2.1 представлены основные характеристики Сб, движение которых анализировалось. В общей сложности было выполнено исследование движения 14 Сб. Из таблицы видно, что анализировалось две группы облаков. Первая включает долгоживущие облака — 1105, 1324, 1387, 1498, 1073, 1331 и 2219. Это были главные ячейки долгоживущих облаков, чье время существования находилось в пределах от 1 ч 35 мин до 4 ч 23 мин. Вторая группа включала облака со сравнительно небольшой продолжительностью жизни — от 28 мин до 68 мин (1651, 1802, 1534, 1613, 1748, 1976, 2090). Это были либо ячейки больших долгоживущих облаков, либо отдельные облака с непродолжительным жизненным циклом.

## Основные характеристики исследованных Св

Номер облака	Дата	Время	N	Н <sub>вг</sub> , км	Z <sub>max</sub> , дБZ	T <sub>н</sub>	T <sub>ф</sub>
1105	20 ÷ 21.07.2005	20:35 – 00:58	58	10,5	61,5	23:00	00:23
1324	20 ÷ 21.07.2005	22:56 – 03:05	53	12,5	59	23:32	23:46
1387	28.07.2005	22:23 – 23:58	19	12,5	52,5	22:31	00:10
1498	28 ÷ 29.07.2005	23:22 – 02:01	35	13,5	56,5	00:34	02:13
1651	29.07.2005	00:48 – 01:56	15	13,5	57,5	00:53	02:18
1802	30.07.2005	01:45 – 02:44	13	9,5	52,5	—	—
1073	29.07.2005	19:15 – 21:59	36	12,5	58,5	21:10	21:59
1331	29 ÷ 30.07.2005	22:26 – 02:26	53	14,5	59,5	22:26	00:41
1534	29 ÷ 30.07.2005	23:47 – 00:15	7	12,5	53,5	23:47	23:57
1613	29 ÷ 30.07.2005	00:46 – 01:54	12	11,5	58,5	01:00	01:57
1748	30.07.2005	01:32 – 02:12	10	11,5	54,5	01:32	02:12
1976	30.07.2005	02:35 – 07:07	8	10,5	53,5	—	—
2219	29 ÷ 30.07.2005	02:03 – 04:01	26	12,5	53,5	—	—
2090	29 ÷ 30.07.2005	03:07 – 03:34	7	8,5	52,5	—	—

Н<sub>вг</sub> — максимальная высота верхней границы радиозоха, T<sub>н</sub> — время начала воздействий, T<sub>ф</sub> — время окончания воздействий, N — число сканов, в течение которых проводился анализ движения облака.

Все облака были достаточно мощными; максимальная отражаемость превышала 52 дБЗ и даже составила 61,5 дБЗ для облака 1105. Верхняя граница облаков во всех случаях превосходила 8 км и достигала 14,5 км для облака 1331.

Воздействия были проведены на 10 облаков из 14. Все облака, исследованные в естественном цикле развития, принадлежали ко второй группе (короткоживущих облаков).

*Обобщенные характеристики движения облаков.* Для обобщения данных, характеризующих движение облаков, была вычислена разность между углом  $\alpha$  для каждого скана и  $\alpha_{\text{mean}}$  — осредненным углом, полученным для всего пути облака, то есть, был получен некоторый нормированный угол  $\alpha_n = (\alpha - \alpha_{\text{mean}})$ . Далее полученные разницы были объединены в один ряд, который включал 348 измерений, и получены статистические характеристики такого нормированного угла  $\alpha_n$ .

Представленная гистограмма (рис. 2.13) показывает, что 77 % значений  $\alpha_n$  заключены в пределах  $-20$  —  $+20^\circ$ .

Это означает, что в большинстве случаев движение облаков происходит относительно прямолинейно без существенных колебаний в направлении движения. Максимальные отклонения от прямолинейного движения достигают  $-80 \div +100^\circ$ . Далее будет показано, что такие отклонения во многих случаях являются следствием процессов слияния ячеек или их дробления.

Для анализа изменений длины вектора, пропорционального скорости перемещения облака, была осуществлена процедура нормирования путем деления конкретных значений длины на среднее значение вектора для исследованного облака. Все эти отношения были объединены в один ряд. Гистограмма распределения такой нормированной длины вектора представлена на рис. 2.13б.

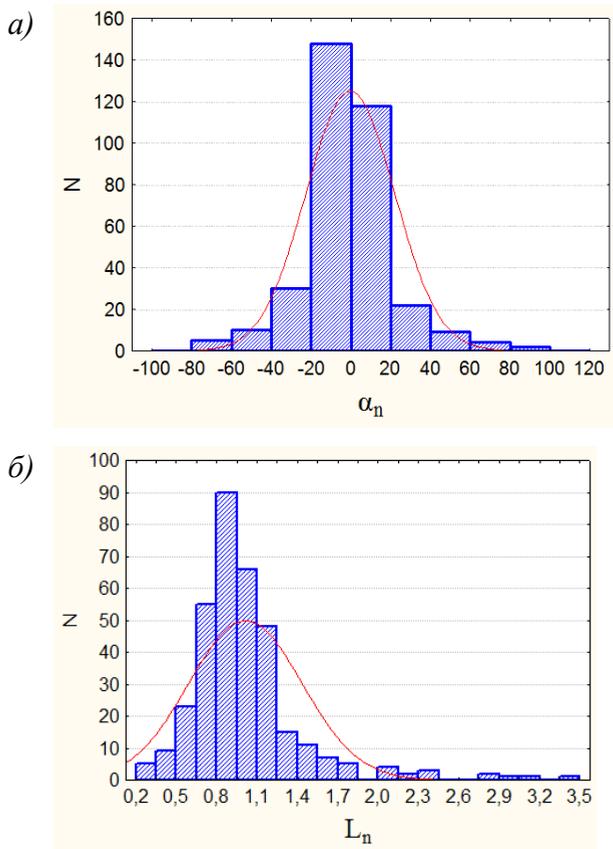


Рис. 2.13. Гистограммы распределения:

- а) нормированный угол  $\alpha_n$ ;  
 б) нормированная длина вектора  $L_n$ , пропорционального скорости перемещения облака.

Данное отношение находится в пределах 0,8—1,1 в 45 % случаев. Большие или меньшие значения были обусловлены, в большинстве случаев, слиянием ячеек или их дроблением. В тоже время, некоторый тренд в длине вектора регистрировался по мере развития облака.

*Движение долгоживущих Сб.* Известно, что в Северном полушарии наблюдается смещение кучево-дождевых облаков вправо относительно ведущего потока. [Абшаев, 1984; Chisholm, Renick, 1972]. Измерения угла вектора перемещения облака  $\alpha$  также указывают на соответствующее отклонение от прямолинейного движения. Флуктуация  $\alpha$  весьма значительна вследствие ряда факторов, поэтому для обнаружения подобного отклонения следует использовать статистические методы. Для изучения этого явления мы использовали 2 подхода. Оба они основываются на зависимости  $\alpha$  от времени (для жизненного цикла облака). Первый подход использует метод анализа тренда. Была построена линия тренда для зависимости  $\alpha = f(T)$ , где  $T$  — время от начала наблюдений за облаком до момента исчезновения радиоэха. Линия тренда аппроксимировалась квадратической зависимостью. Для анализа были использованы 2 угла:  $\alpha_s$  и  $\alpha_f$ . Это — углы в начале и конце линии тренда. Мы полагали, что разница этих углов указывает на изменения в угле движения Сб. Второй подход связан со сравнением средних значений  $\alpha$  во время первой половины пути облака  $\alpha_1$  и, соответственно, второй  $\alpha_2$ .

В общей сложности было проанализировано движение семи Сб. Разность  $\alpha_f - \alpha_s$  оказалась отрицательной в пяти и положительной в двух случаях, то есть, линия тренда указывает в пяти случаях на правый поворот в движении, а в двух — на левый. Аналогичные результаты были получены и при анализе средних углов для первой и второй половин пути облака. Таким образом, имеющиеся результаты подтверждают вывод о преимущественном смещении облаков вправо от прямолинейного движения, но имеются и случаи смещения влево. Критический анализ указанных двух случаев показал, что для этих облаков отмечалось деление ячеек на несколько, а также слияние с другими ячейками примерно на середине их пути. В связи с этим в обоих случаях произошло скачкообразное

смещение облаков в направлении на север (при преимущественном движении с запада на восток), хотя в целом направление движения было достаточно стабильным.

Длина вектора  $L$  представляет также несомненный интерес для анализа, так как она характеризует путь облака за фиксированное время, то есть, по существу, скорость движения радиоэха. Аналогично углу вектора были проанализированы изменения в длине вектора, которые характеризуют стабильность в скорости движения облака. Линия тренда для  $L$  была построена для каждого из исследованных облаков, соответственно были получены длина вектора —  $L_s$  в начале линии тренда и в конце —  $L_f$ . Кроме того, были вычислены осредненные  $L$  для первой  $L_1$  и второй  $L_2$  половины пути для каждого из рассматриваемых облаков. Результаты такого анализа показали, что имеет место увеличение длины вектора со временем в 5 случаях из 7. Максимальное увеличение в длине вектора и соответственно скорости перемещения облака достигало 50—100 %. Подобное увеличение в скорости может объясняться тем, что к концу наблюдений облако постепенно кристаллизуется и располагается на больших высотах, где обычно скорость ветра заметно больше.

Ниже приводится пример результатов наблюдений за долгоживущим Сб.

*Пример наблюдений за кучево-дождевым облаком.* В качестве примера рассмотрим случай движения облака (Сб 2219), когда отмечались существенные изменения в направлении его движения вследствие процессов деления ячеек, а также слияния с фидерными облаками.

Наблюдения за кучево-дождевым облаком выполнялись в течение примерно 2 часов. Облако было весьма мощным, его верхняя граница в процессе развития достигала 12,5 км, а отражаемость — 53,5 дБЗ. Развитие облака шло в естественном цикле, воздействия на него не проводились.

Движение Св происходило практически в направлении запад — восток. В этом направлении оно прошло путь в 90 км, было также небольшое смещение на юг, которое составило всего 12 км за период наблюдений.

На перемещение облака существенное влияние оказали процессы слияния с фидерными ячейками. Так, слияние с ячейкой в 2 ч 49 мин привело к значительному смещению облака в южном направлении. В 2 ч 44 мин южнее главной ячейки Св отмечалось интенсивное развитие нового фидерного облака. Их слияние произошло в 2 ч 49 мин. В 2 ч 53 мин образовалось многоячейковое облако, в 2 ч 58 мин ячейки объединились в одну.

Все эти процессы нашли свое отражение в траектории облака. Из рис. 2.14 хорошо видно, что слияние ячеек в 2 ч 49 мин привело к скачкообразному смещению облака в южном направлении (здесь целесообразно напомнить, что речь идет о смещении центра эллипса отражаемости).

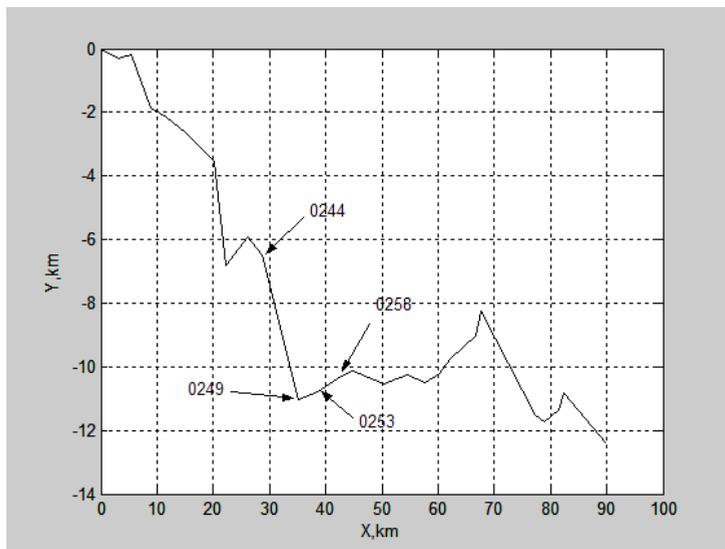


Рис. 2.14. Траектория движения кучево-дождевого облака.

Таким образом, процессы слияния и деления ячеек могут весьма существенно влиять на траекторию движения облака.

*Движение Св с короткими жизненными циклами.* Кучево-дождевые облака с короткими жизненными циклами могут иметь некоторые отличия в движении от тех, которые существуют длительное время. В настоящем разделе рассмотрим достаточно важную особенность в их движении. В частности, проанализируем движение ячеек внутри одного кучево-дождевого облака.

Наши наблюдения показывают, что в некоторых случаях движения ячеек внутри одного кучево-дождевого облака могут существенно отличаться от движения главной ячейки.

Это очень важно, так как разница в их перемещении может приводить к объединению ячеек, а также стимулировать процессы деления ячеек. Хотя мы не имеем достаточного количества данных для проведения какого-либо статистического анализа, но отдельные примеры подтверждают высказанные предположения. Ниже приводится пример развития кучево-дождевого облака, где иллюстрируется разница в направлении движения основной и фидерной ячейки внутри одного кучево-дождевого облака.

Исследуемая ячейка 1534 (рис. 2.15) являлась частью мощного кучево-дождевого облака 1331. Наблюдения за ней выполнялись в период 23 ч 47 мин — 00 ч 15 мин ВСВ. Верхняя граница этой ячейки достигала 12,5 км, а максимальная отражаемость составила 53,5 дБZ. На эту ячейку проводились воздействия в период 23 ч 47 мин — 23 ч 57 мин.

Зона высокой отражаемости имела вид дуги, исследуемая ячейка 1534 располагалась на ее северном крае. Она двигалась в северо-восточном направлении, в то время как основная ячейка 1331, расположенная в южной части зоны высокой отражаемости, двигалась в юго-восточном направлении (рис. 2.15).

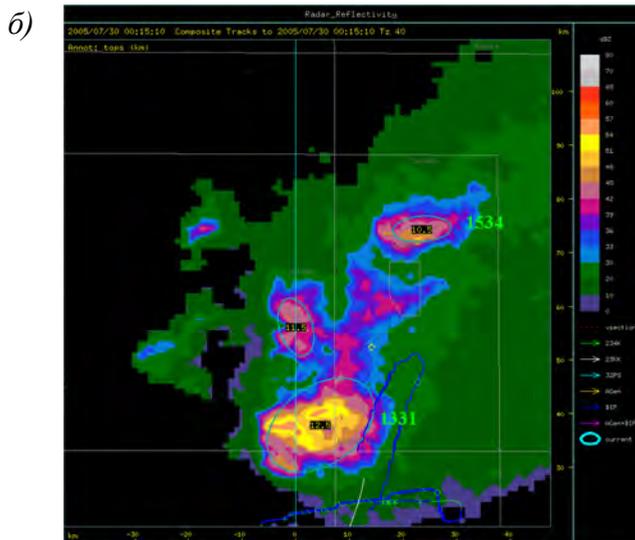
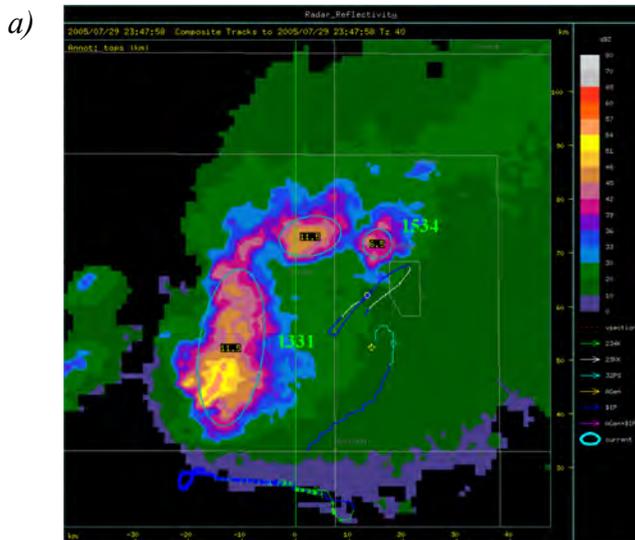


Рис. 2.15. Радиоэхо исследуемых облаков (1534 и 1331):  
а — 23 ч 47 мин, б — 00 ч 15 мин.

Более того, за анализируемый период ячейки прошли разные расстояния, то есть, они имели разные скорости движения. Скорость движения основной ячейки была примерно в 2 раза выше, чем исследуемой. Все это привело к тому, что к 00 ч 15 мин радиоэхо трансформировалось и приняло форму полосы.

Средний угол вектора движения основной ячейки (1331) составлял  $-35^\circ$ , в то время как для ячейки 1534 он равен  $24^\circ$ .

Может быть предложено несколько гипотез, объясняющих такое движение. Обе ячейки подвергались воздействию за время наблюдений. Воздействия на основную ячейку осуществлялись в течение всего времени наблюдений, в то время как на ячейку 1534 воздействовали только в начале наблюдений. Разница в их движении может быть обусловлена скоростью кристаллизации новых растущих  $Cu$  song около этих ячеек, и, следовательно, процессы слияния с этими новыми  $Cu$  могут отличаться, что может сказываться на их движении.

Другим объяснением этой разницы может быть следующее. Обе ячейки оказывают воздействие на поле ветра вблизи них и особенно на поле ветра под облаком. В связи с тем, что вток в основную ячейку значительно больше, чем в ячейку 1534, это может привести к некоторому уменьшению поступления новых влажных масс воздуха в ячейку 1534, и, соответственно, развитие новых  $Cu$  вблизи основной ячейки оказывается более интенсивным, что сказывается на скорости перемещения облака из-за процессов слияния. Разница в углах вектора перемещения облака может быть также объяснена с этих позиций.

## **2.9. Взаимодействие ячеек в многоячейковом кучево-дождевом облаке**

Особым случаем является взаимодействие конвективных облаков (обычно их называют ячейками) внутри многоячейкового кучево-дождевого облака. Рассмотрим это

взаимодействие на примере кучево-дождевого облака, которое развивалось в районе г. Кисловодск [Абшаев и др., 2017]. Развитие Св началось примерно в 11 ч 00 мин. Наиболее мощные ячейки стали формироваться после полудня, а весь процесс продолжался вплоть до окончания дня. Здесь анализируется временной период с 12 ч 48 мин до 14 ч 00 мин и пространственный квадрат размером 30 км, включающий в себя г. Кисловодск. Структура радиоэха облака в 13 ч 37 мин приведена на рис. 2.16.

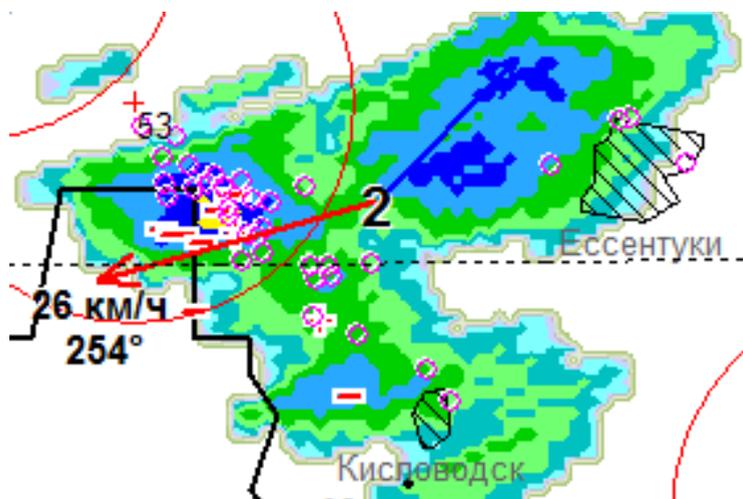


Рис. 2.16. Структура радиоэха облака в 13 ч 37 мин.

Красными кружками отмечены места электрических разрядов, зафиксированных грозопеленгационной системой LS-8000. Облако состоит из нескольких ячеек, развитие которых, как показали результаты анализа, связаны между собой.

За рассматриваемый период (12 ч 48 мин – 14 ч 00 мин) в облаке можно было выделить 8 конвективных ячеек. Временной ход основных параметров этих ячеек представлен на рис. 2.17.

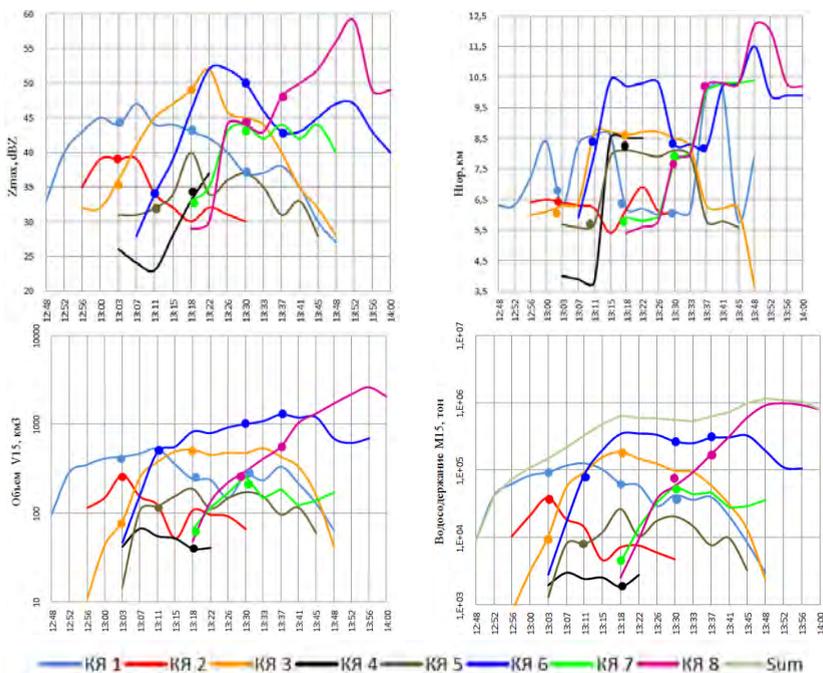


Рис. 2.17. Временной ход:  
 максимальной отражаемости  $Z_{\text{max}}$  (дБЗ),  
 высоты верхней границы  $H_{\text{top}}$  (км) по уровню отражаемости  
 10 дБЗ (б),  
 объема облака  $V_{15}$  (км<sup>3</sup>),  
 водосодержания  $M_{15}$  (тонны),  
 вертикально интегрированной водности  $V_{\text{IL}}$  (кг/м<sup>2</sup>),  
 интенсивности осадков  $I$ , мм/час,  
 частоты грозových разрядов типа LF облако-земля (разряд/мин) и  
 разрядов типа VHF.  
 Кривая “Sum” показывает суммарное значение параметра по всем  
 конвективным ячейкам.

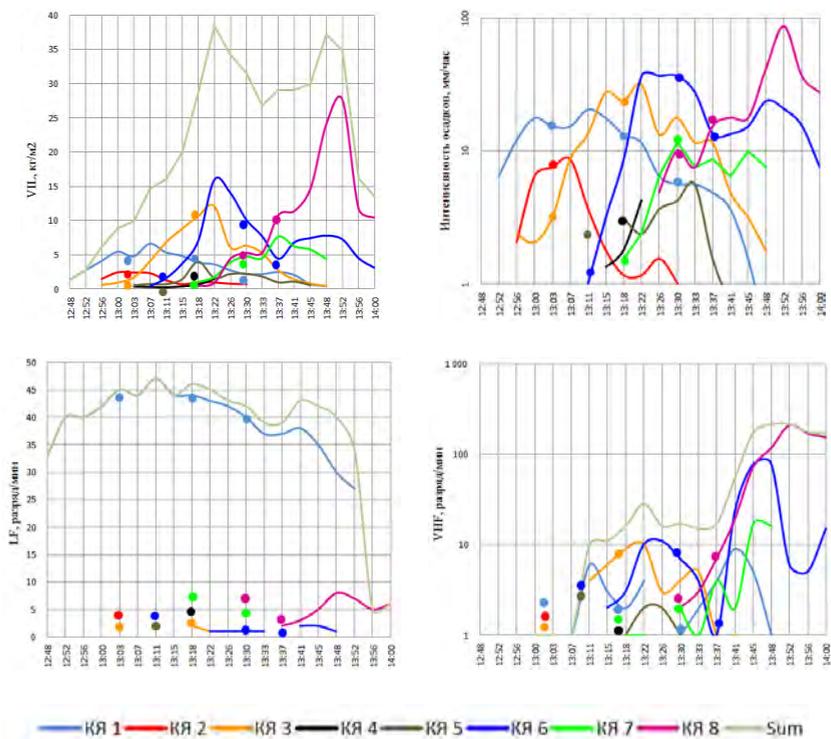


Рис. 2.17 (продолжение)

Результаты анализа структуры радиоэха показали, что во всех наблюдаемых случаях слияния радиоэха каждая ячейка сохраняла атрибуты отдельной ячейки: индивидуальные области  $Z_{\max}$ , вокруг которых имеются замкнутые изолинии отражаемости, а также отдельные куполообразные вершины вплоть до стадии диссипации более слабой ячейки. Расстояние между положениями  $Z_{\max}$  в процессе слияния ячеек практически не изменяется.

В большинстве рассмотренных случаев после слияния радиоэха наблюдалось быстрое (за 1—5 мин) усиление ячеек (объем, водосодержание, приведенная водность, отражаемость и другие параметры), в некоторых случаях усиливалась одна из

них и ослабевала другая (рис. 2.17), и лишь в отдельных случаях ослабевали обе ячейки.

Грозовая активность облака заметно усиливалась после слияния ячеек. Частота разрядов типа облако — земля (LF разряды) увеличивалась в 1—5 раз, а увеличение частоты разрядов VHF диапазона составляло 3—15 раз. Отношение количества разрядов, зарегистрированных в диапазоне VHF, к разрядам, зарегистрированным в диапазоне LF, находилось в диапазоне значений 5—10.

В среднем максимальная радиолокационная отражаемость облака за 3,5-минутный период (время между последовательными радиолокационными обзорами) после слияния увеличивалась на 2—7 дБZ, общее водосодержание, объем облака и интенсивность осадков увеличивались в 1—3 раза, приведенная водность — в 1—2 раза, верхняя граница облака увеличивалась незначительно.

Из анализа графиков видно, что процессы усиления и ослабления близко расположенных ячеек достаточно сложны, кривые эволюции параметров имеют многомодальные распределения, указывая на то, что рост и ослабление могут меняться по несколько раз вплоть до полной диссипации ячеек.

Внутри одного и того же Сб некоторые ячейки могут сближаться и даже сливаться своим радиоэхом, другие же ячейки могут развиваться, лишь незначительно взаимодействуя с соседними. Сближение или смыкание двух близкорасположенных ячеек не обязательно приводит к их обоюдному усилению. Чаще одна из них усиливается, усиление второй значительно меньше, во многих случаях радиолокационные параметры этой ячейки уменьшаются.

Проведенный анализ не позволяет связать увеличение радиолокационных параметров ячеек с процессом их слияния или смыкания радиоэха. Возможно, что слияние происходило в результате собственного развития ячеек, при котором площадь

радиоэха одной или обеих из них значительно расширялась. Косвенным подтверждением этому является сохранение изолированности очагов радиоэха и зон восходящего потока, что особенно заметно проявлялось при диссипации ячеек.

Максимальная частота разрядов всех типов и максимальные токи разрядов [Абшаев и др., 2017] отмечались в период кратковременного выпадения града размером до 1 см из ячейки №8 (с 13 ч 48 мин до 13 ч 52 мин), когда  $Z_{\max} = 57$  дБZ,  $V_{IL} = 27,6$  кг/м<sup>2</sup>,  $V_{IL}$  переохлажденного облачного слоя (выше изотермы 0°C) — 14,0 кг/м<sup>2</sup>, а слоя облака выше изотермы -6°C, где происходит активный рост ледяных кристаллов, крупы и града — 11,3 кг/м<sup>2</sup>. В этот период интенсивность осадков составляла 86,6 мм/ч. Верхняя граница радиоэха достигла 12,2 км.

### ГЛАВА 3

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЛАКОВ И ИХ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИ СЛИЯНИИ

Слияние облаков, как было показано выше, приводит к усилению конвекции, что должно неизбежно сказываться на усилении электризации облаков, в частности, способствуя формированию более интенсивных гроз. Пока в литературе практически отсутствуют данные о влиянии процессов слияния на электрические характеристики облака. Данный раздел направлен на освещение данного вопроса. Имеется очень мало случаев, когда в исследованиях слияния облаков использовались грозопеленгационные системы. Большая часть исследований выполнялась с помощью радиолокаторов. Известно, что радиолокационная информация может применяться для оценки грозовой активности на основании регрессионных связей, полученных на основе данных комплексных экспериментов. В данном разделе рассматриваются вопросы контроля различных характеристик электрического состояния конвективных облаков и обсуждается один из комплексных экспериментов, который позволил верифицировать существующие и установить новые регрессионные связи между радиолокационной информацией и параметрами молниевых разрядов (подробная информация об эксперименте представлена в прил. 1). Анализируются результаты исследований изменений электрического состояния конвективных облаков при слиянии. Изменения электрической активности облаков оцениваются как по результатам прямых измерений параметров грозовых разрядов, так и по косвенным критериям, рассчитанным по радиолокационным параметрам.

### **3.1. О контроле электрического состояния конвективных облаков**

Вопросы контроля электрического состояния конвективных облаков являются актуальными и практически значимыми. Электрические явления в облаках принадлежат к числу наиболее опасных явлений погоды как для наземных объектов, так и для самолетов и других летательных аппаратов, размеры и насыщенность электронными системами которых непрерывно увеличиваются. Опасность представляют как токи молний, так и их мощное электромагнитное излучение. Для изучения электрических процессов в облаках в настоящее время используются как прямые, так и косвенные дистанционные радиофизические методы и средства: самолеты, специальные зонды, метеорологические радиолокаторы, различные грозопеленгаторы и грозорегистраторы [Синькевич и др., 2016; Михайловский и др., 2017; Абшаев, 1984; Аджиев и др., 2013; Михайловский, Кашлева, 2012; Снегуров, Снегуров, 2012; Степаненко, Гальперин, 1983; Battan, 1973; Carey, Rutledge, 2000; Deierling, Petersen, 2008; Futyan, Del Genio, 2007; Liu et al., 2012; Petersen et al., 2005]. С их помощью диагностируется и прогнозируется электрическое состояние облака, определяется перемещение грозовых очагов.

Разработаны и косвенные методы оценки грозоопасности кучево-дождевых облаков с использованием радиолокационной информации. Здесь применяются вероятностно-статистические критерии грозоопасности [Степаненко, Гальперин, 1983; Михайловский и др., 2017; Михайловский и др., 2017a; Михайловский и др., 2013; Wong et al., 2013]. Однако выполненный в 1980-х годах анализ показал, что более чем в 80 % случаев поражение самолетов молниями происходило в облаках, которые не классифицировались как грозовые [Имянитов, 1970; Имянитов и др., 1971; Mazur, 1988]. Позднее

выяснилось, что собственный электрический заряд самолета [Торгунаков и др, 2015], искажение самолетом электрического поля облака, сильно ионизованные струи двигателей или разрядников самолета могут спровоцировать появление электрических разрядов облако — самолет в облаках, которые вообще не дали бы разряда в отсутствие самолета [Михайловский и др., 1990; Мазур, 1988]. В то же время, электрическое состояние облака (плотность объемных зарядов, напряженность электрического поля) должно быть таким, чтобы спровоцированный разряд мог развиваться.

Обнаружение таких облаков, потенциально готовых к разряду молний, но еще не грозящих, с помощью стандартных технических средств, регистрирующих радиоизлучение молний, невозможно. Существующие вероятностно-статистические радиолокационные критерии грозоопасности также малопригодны для этих целей, так как они построены на экспериментальных исследованиях мощных грозовых облаков [Степаненко, Гальперин, 1983; Михайловский и др., 2013]. Таким образом, существует практическая необходимость совершенствования технологий диагноза и сверхкраткосрочного прогноза электрического состояния облаков как на грозовой, так и на предгрозовой стадии развития с помощью дистанционных радиофизических методов. Проведение этой работы невозможно без совершенствования методов прямого контроля электрического состояния облаков на всех стадиях их развития.

### **3.1.1. Восстановление электрической структуры облака по результатам самолетных измерений напряженности электрического поля**

Электрическое состояние облаков однозначно характеризуется распределением зарядов или токов в облаке и вокруг него и вариациями этого распределения во времени и пространстве. Это распределение зарядов определяет вектор

напряженности электрического поля ( $E$ ) в том же объеме, который является интегральной характеристикой всей совокупности заряженных частиц в облаке и вблизи его. Очевидно, получение указанных характеристик с достаточной полнотой практически нереально. Более того, отдельные фрагменты этих распределений могут оказаться малоинформативными с точки зрения обобщенной характеристики электрического состояния облака и его электрического генератора. При этом сложности получения такой информации весьма значительны. Дело не только в возможности значительных погрешностей при внутриоблачных измерениях  $E$  [Михайловский, 2013; Михайловский, 2014], а также в том, что сильная зависимость получаемой информации от расположения траектории полета самолета, выполняющего измерение, может затруднить выделение на этом фоне общих закономерностей изменения электрического состояния облака. С учетом вышесказанного, более точными и информативными являются измерения  $E$  вне облака [Михайловский, 2013; Михайловский, 2014; Торгунаков и др., 2015].

На рис. 3.1 представлен пример типичного изменения ортогональных составляющих напряженности электрического поля ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ ) при пролете самолета вблизи электризованного облака по прямолинейной траектории.

Напряженность электрического поля вне облака в каждой точке пространства является суперпозицией электрических полей всех зарядов в облаке и вне его с учетом проводимостей в атмосфере и облаке. Измеряемые значения напряженности электрического поля зависят от взаиморасположения облака и траектории пролета самолета. Было бы полезно иметь возможность характеризовать пространственно-временные изменения структуры объемных зарядов в облаке конечным количеством переменных, например, суммарными объемными зарядами и координатами их центров.

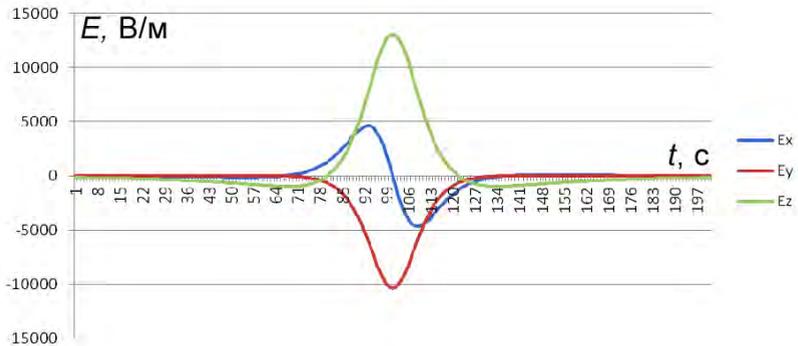


Рис. 3.1. Изменение ортогональных составляющих напряженности электрического поля ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ ) в системе координат самолета ( $E_x$  — продольная,  $E_y$  — поперечная,  $E_z$  — вертикальная) при пролете самолета со скоростью 250 км/ч вблизи электризованного облака по прямолинейной траектории.

Были предприняты попытки решения обратной задачи и получения искомых переменных, характеризующих распределения объемных зарядов облака, на основе измеренных значений напряженности электрического поля [Пачин, 1984; Анискина и др., 1990]. Они показали, что задача восстановления реальной структуры зарядов, формирующих вектор  $E$  вне облака, в общем случае некорректна. Однако существующее упрощенное представление о распределении зарядов в облаках в виде 2—3 однородно заряженных сфероидов, расположенных один над другим, позволяет надеяться на успешное решение. Ответ на вопрос о возможности восстановления электрической структуры облака по измерениям  $E$  вне его может быть получен в результате апробации метода и программ параметризации на реальных облаках. В любом случае получаемые значения зарядов и их координат параметризуют измеряемое электрическое поле. При параметризации вся совокупность измеренных значений  $E$  заменяется несколькими переменными.

При этом также исключается зависимость получаемых параметров от взаиморасположения облака и траектории полета самолета. Получаемым характеристикам можно пытаться придавать определенный физический смысл. В частности, можно считать, что дипольный момент характеризует мощность эквивалентного электрического генератора облака. Эта характеристика является важнейшей для прогноза и диагноза электрического состояния облака.

Под электрическим генератором понимается вся совокупность физических процессов в облаке, приводящих к возникновению (генерации) электрических зарядов, разделению их в пространстве, увеличению электрического поля и разрядам молний. Под мощностью электрического генератора понимается генерируемый в облаке заряд в единицу времени. Количество физических процессов, генерирующих электрические заряды, и роль каждого могут меняться в зависимости от стадии развития облака. Например, механизмы связанные с коронированием и не играющие существенной роли на начальной стадии развития процессов электризации облака, могут начинать превалировать на грозовой стадии [Шишкин, 1964; Чалмерс, 1974; Синькевич, Довгалюк, 2013].

Рассмотрим алгоритм параметризации самолетных измерений вектора напряженности электрического поля  $E$  более подробно. Во время каждого пролета самолета над или рядом с облаком измеряются значения вектора  $E(l)$  вдоль траектории полета ( $l$  — траектория полета самолета). Распределение значений  $E$  вдоль указанной траектории определяется структурой зарядов в облаке и окрестности, взаиморасположением зарядов и траектории полета в предположении, что структура зарядов существенно не меняется за время пролета над облаком (2—4 мин) (рис. 3.1). При этом обычно используется электростатическое приближение, но

возможно сформулировать задачу и в терминах токовых источников с учетом проводимости в облаке и его окрестности.

В рамках электростатических представлений электрическое состояние облака и его окрестности полностью характеризуется распределениями вектора напряженности электростатического поля —  $E(r)$  и плотности заряда —  $\rho(r)$ , где  $r$  — радиус-вектор точки пространства. При условии ограниченности в пространстве области  $\Omega$  между  $E(r)$  и  $\rho(r)$  существует связь в виде интеграла Пуассона, которая позволяет однозначно вычислить  $E(r)$  в произвольной точке пространства при известной  $\rho(r)$  в  $\Omega$ . Обратное оказывается неверным — знание распределения  $E(r)$  вне области  $\Omega$  не позволяет однозначно определить  $\rho(r)$  внутри  $\Omega$ . Другими словами, существует множество различных распределений плотности заряда  $\rho(r)$  в области  $\Omega$ , которые создают одинаковое электростатическое поле  $E(r)$  вне этой области. Несмотря на это, все распределения имеют близкие первые мультипольные моменты (эквивалентный заряд, диполь, квадруполь) относительно некоторой фиксированной точки  $r_0$ . С учетом зеркального отражения от поверхности земли система зарядов является нейтральной в целом, вследствие чего дипольный момент системы не зависит от выбора  $r_0$  и имеет только вертикальную составляющую. Это обстоятельство делает дипольный момент наиболее важной и практически единственной надежно определяемой характеристикой системы зарядов при отсутствии дополнительной информации о  $\rho(r)$ . Таким образом, дипольный момент может служить устойчивой числовой характеристикой электрического состояния облака и мощности электрического генератора облака [Пачин, 1984; Анискина и др., 1990].

Сформулируем задачу определения параметров системы зарядов, создающих электрическое поле, мало отличающееся от поля, измеренного самолетом. Под синтезом системы источников будет подразумеваться построение системы

точечных зарядов, приближающих измеренное поле в смысле минимизации функционала (3.1):

$$\min F(\vec{r}_i, Q_i) = \min \int_l \left| \vec{E}(l) - \sum_{i=1}^n Q_i \frac{\vec{r}(l) - \vec{r}_i}{|\vec{r}(l) - \vec{r}_i|^3} \right|^2 dl, \quad (3.1)$$

где  $\vec{r}_i$  — радиус-вектор координат  $i$ -го точечного заряда  $Q_i$ ;  $\vec{r}(l)$  — радиус-вектор координат точки на траектории полета самолета, в которой был измерен вектор напряженности электрического поля  $\vec{E}(l)$ ,  $n$  — количество точечных зарядов.

Минимизируется интеграл квадратов разностей измеренных и рассчитанных значений вектора  $E$  на траектории полета. Таким образом, синтез сводится к минимизации  $F(\vec{r}_i, Q_i)$  по переменным  $\vec{r}_i, Q_i$ . Функция квадратична по переменным  $Q_i$ , что позволяет уменьшить число переменных с  $4n$  до  $3n$ ; тем не менее, задача минимизации даже для сравнительно небольших  $n$  хотя и разрешима в принципе, но трудна для численного решения. Проблема заключается как в выборе начальных значений  $\vec{r}_i, Q_i$ , так и в выборе эффективного алгоритма для их уточнения. Представляется интересным подход, предложенный в статье [Пачин, 1984], где последовательно решается несколько более простых задач, приближающих нас к решению (3.1). Этими задачами соответственно являются:

1. Синтез центрально-симметричной системы, то есть, вся совокупность объемных зарядов представляется эквивалентным точечным зарядом  $Q$  с координатами  $r_0$ .

В данном случае (3.1) примет вид:

$$\min F(\vec{r}_i, Q_i) = \min \int_l \left| \vec{E}(l) - Q \frac{\vec{r}(l) - \vec{r}_0}{|\vec{r}(l) - \vec{r}_0|^3} \right|^2 dl, \quad (3.2)$$

где  $Q$  — эквивалентный электрический заряд с координатами  $r_0$ .

2. Синтез системы, обладающей осевой симметрией, то есть, измеренные значения  $E$  распределены в пространстве таким

образом, что могут быть представлены полем зарядов, расположенных на прямой (оси).

Для системы, «мало» отличающейся от осесимметричной, естественно потребовать определения «наилучшей» оси в смысле

$$\min F(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \min \int_l (\vec{E}(l), [\vec{r}(l) - \vec{r}_1, \vec{r}(l) - \vec{r}_2])^2 dl, \quad (3.3)$$

где:  $\vec{r}_1, \vec{r}_2$  — радиус-векторы произвольных точек на оси системы.

3. Синтез точечного диполя, то есть, размещение точечного диполя на оси, заданной условием (3.3) и определение величины его дипольного момента из условия (3.5) (см. ниже). Координаты местоположения точечного диполя на оси рассчитываются из следующего уравнения с использованием характерных для диполя точек на траектории измерения  $E$ , в которых поле диполя меняет знак.

Окончательно для центра диполя  $\vec{r}_d$ :

$$\vec{r}_d = \vec{r}_0 + \vec{p} \frac{\int_l (\vec{r}(l) - \vec{r}_0, [\vec{p}, \vec{n}(l)]) dl}{\int_l [|\vec{n}(l), \vec{p}|]^2 dl}, \quad (3.4)$$

где:  $\vec{r}_d$  — радиус-вектор центра диполя,  $\vec{p}$  — вектор дипольного момента точечного диполя;  $\vec{n}(l)$  — единичный радиус-вектор, направленный из центра диполя в точки измерения  $E$  на траектории измерения.

Осталось определить последний неизвестный параметр диполя — величину дипольного момента  $P$  из условия минимума интеграла квадратов разностей измеренных и рассчитанных по формуле для точечного диполя значений вектора  $E$  на траектории полета.

$$\min_{\{P\}} \int_l \bar{E}(l) - P \frac{3(\bar{p}, \bar{n}(l), \bar{n}(l) - \bar{p})}{|\bar{r}_d - \bar{r}(l)|^3}, \quad (3.5)$$

Представленный метод и алгоритм параметризации был исследован на численной модели, в которой по заданным распределениям зарядов в облаке рассчитывалась  $E$  на траектории полета. К рассчитанным значениям добавлялись погрешности, близкие к реально существующим при измерениях, и по этим, квази-реальным значениям  $E$  восстанавливалась электрическая структура облака [Анискина и др., 1990]. Проведенные исследования показали высокую устойчивость дипольного момента, как к вариации зарядовой структуры, так и к вносимым погрешностям. Для достаточно простых, в частности, осесимметричных, распределений хорошо восстанавливалась и сама структура зарядов [Анискина и др., 1990].

### **3.1.2. Восстановление электрической структуры облаков по наземным измерениям напряженности электрического поля**

Первые попытки получения информации о структуре зарядов в облаке по данным о напряженности электрического поля предпринимались на основе наземных измерений  $E$  под облаком. Именно на основе таких измерений было выдвинуто предположение, что облако является диполем. Принципиально возможно размещение наземных систем контроля напряженности поля и восстановление электрической структуры проходящих над системой датчиков облаков. Достоинством метода по сравнению с самолетными измерениями является относительная простота и дешевизна. Наиболее серьезным недостатком подобных систем является тот факт, что при прохождении развитого в электрическом смысле облака на

земле начинают коронировать различные острия, создающие локальные объемные заряды, в том числе и вблизи датчиков [Богачук, Михайловский, 1986]. Быстро меняющееся и значительное по величине электрическое поле образующихся локальных объемных зарядов может «экранировать» поле зарядов облака. Кроме того, облако перемещается над датчиками с относительно небольшой скоростью, и его электрическая структура может существенно измениться за время перемещения. Модернизацией подобной системы является система контроля, основанная на измерениях изменений (скачков) напряженности электрического поля ( $dE$ ) при разрядах молний [Богачук, Михайловский, 1986]. В этом случае устраняется экранирующее действие объемных зарядов коронирующих острий и появляется возможность временной идентификации молний и даже отдельных компонент. В алгоритме могут быть заложены различные варианты расчетной модели разряда, как для разрядов «облако — земля», так и для разрядов «облако — облако» и внутриоблачных. В зависимости от вида разряда меняется количество неизвестных нейтрализуемых в молниях зарядов и их координат ( $Q_i, r_i$ ) и, соответственно, минимальное количество пунктов, в которых должны измеряться скачки напряженности электрического поля ( $dE$ ).

$$dE_j = F_i(Q_i, r_i), \quad (3.6)$$

где  $F_i$  — функция, зависящая от вида разряда,  $dE_j$  — величина скачка (изменения) напряженности электрического поля при разряде молнии, измеренная  $j$ -м датчиком с координатами  $r_j$ ,  $Q_i$  — нейтрализованный в молнии облачный заряд, расположенный в точке с координатами  $r_i$ .

Учитывая погрешности измерения  $dE_j$  и их влияние на устойчивость решения системы уравнений (3.6), можно сформулировать задачу расчета  $Q_j$  и  $r_i$  как:

$$\Phi(\vec{r}_i, Q_i) = \min \sum_j \left| dE_j - \sum_{i=1}^n Q_i \frac{\vec{r}_j - \vec{r}_i}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^3} \right|^2, \quad (3.7)$$

где  $dE_j$  — изменение (скачок) поля в  $j$ -м пункте (остальные обозначения см. выше).

В этом случае представляется целесообразным использовать принципы и методы решения так называемых, «некорректных» задач, предлагаемые в [Пачин, 1984; Богачук, Михайловский, 1986; Анискина и др., 1990].

### **3.1.3. Контроль электрического генератора облака по результатам измерений параметров молниевой активности**

В настоящее время наблюдается бурное развитие систем контроля молниевой активности грозовых облаков [Снегуров, 2010; Снегуров, Снегуров, 2012; Аджиев и др., 2013; Ushio et al., 2001, Leonibus et al., 2007]. Наиболее широко распространены так называемые гиперболические системы, использующие для расчета координат молниевых разрядов разность времен прихода электромагнитного излучения в различные пункты регистрации. К таковым относятся, например, развертываемая в Росгидромете система «Алвес», длинноволновая часть системы LS8000 и Всемирная система WWLLN (World Wide Lightning Location Network). Специфика этих систем такова, что наиболее надежно, с минимальными погрешностями, положение молнии определяется при регистрации разрядов, имеющих максимальный градиент и минимальную длительность изменения тока в канале молнии. Эти условия наблюдаются

обычно во время главной стадии (возвратный удар) первой компоненты молнии облако — земля.

Гронопеленгатор LS8000 позволяет [Аджиев и др., 2013, Михайловский и др., 2017] определять координаты и другие параметры молний на основании радиоизлучения от электрических разрядов в двух диапазонах длин волн: VHF (Very High Frequency range) (110—118 МГц) и LF (Low Frequency range) (1—350 кГц). В LF диапазоне используется комбинированная технология, включающая использование данных магнитной пеленгации и разности времен прихода электромагнитного излучения в различные пункты (time-of-arrival technology, гиперболический метод). В VHF диапазоне используется технология УКВ интерферометрии. Согласно частотным диапазонам и используемым технологиям, при интерпретации результатов измерений считается, что в LF диапазоне регистрируется около 30% молний (flashes) типа облако — облако и молнии типа облако — земля, а в VHF диапазоне — все разряды (strokes), включая внутриоблачные [Аджиев и др., 2013, Михайловский и др., 2017].

Под молнией мы понимаем совокупность последовательных разрядов (компонент) (от 1 до 15, среднее значение около 3), объединяемых общим ионизованным каналом. Таким образом, часто наблюдаемое существенное превышение числа разрядов в VHF диапазоне по сравнению с LF диапазоном может объясняться регистрацией не только всех разрядов типа облако — облако и внутриоблачных разрядов, но и регистрацией отдельных сильноточных компонент одной и той же молнии типа облако — земля, особенно если грозовое облако расположено вблизи системы датчиков. Кроме того, для близко расположенных облаков в VHF диапазоне возможна, на наш взгляд, регистрация так называемых стримерных процессов, которые предшествуют молниевой активности.

Мощность электрического генератора облака, понимаемая как величина генерируемых облачных зарядов в единицу времени, и создаваемое зарядами электрическое поле ограничиваются процессами диссипации зарядов облака, основными из которых, по-видимому, являются разряды молний различной мощности и протяженности [Имянитов и др., 1971; Чалмерс, 1974; Шишкин, 1964; MacGorman, Rust, 1999; Williams, 1985]. Другие возможные механизмы диссипации (токи проводимости в атмосфере и в облаке, турбулентное перемешивание, токи коронирования на земле и внутри облаков и другие) почти не исследованы. Имянитов на основании времен восстановления  $E$  внутри облаков считал, что электрический генератор в существенной степени короткозамкнут, то есть, значительная часть генерируемой энергии расходуется на внутренние потери, не связанные с разрядами [Имянитов и др., 1971; MacGorman, Rust, 1999]. На данном этапе мы считаем, что эти механизмы (электрическая и турбулентная проводимость) не играют решающей роли в балансе токов внутри грозового облака, и частоты и токи молний являются репрезентативными характеристиками электрического генератора облака. При этом необходимо осознавать, что получение тока в канале молнии на основании тока в антенне — это, в определенном смысле, некорректная обратная задача, возможные погрешности решения которой не рассматриваются в данной работе. К сожалению, используемая модель грозопеленгатора LS8000 не позволяет получать оценки токов межоблачных разрядов. Нами было получено, что токи молний и частота молний облако — земля в длинноволновом диапазоне (LF) линейно связаны с коэффициентом корреляции выше 0,9 [Михайловский и др., 2017]. Можно предположить, что подобная связь существует и для разрядов облако — облако и внутриоблачных. Мощность генератора в этом случае можно оценивать по току или

переносимому заряду молний облако — земля плюс частота молний облако — облако и внутриоблачных.

### **3.1.4. Контроль электрического генератора облака по результатам измерений радиолокационных параметров**

При отсутствии систем регистрации молниевой активности исследователями рассматривается возможность контроля электрического генератора косвенными радиолокационными методами. Одним из достоинств этих методов является возможность их использования для контроля электрического генератора на предгрозовой стадии. В соответствии с этим значительные усилия были направлены на определение связей между параметрами электрического генератора (напряженностью электрического поля или частотой и токами разрядов) с различными радиолокационными параметрами, в частности, с высотой верхней границы облака, критериями грозоопасности и целым рядом других [Абшаев и др., 2015; Михайловский, 2002; Михайловский, 2015; Михайловский и др., 2017; Baker et al., 1995; Cecil, Zipser, 2002; Pessi, Businger, 2009; Yair et al., 2010]. В последнее время появляются работы, в которых предлагаются новые косвенные радиолокационные критерии электрического состояния облаков, зависящие от количества и размера ледяных частиц в облаке [Михайловский и др., 1990; Михайловский и др., 2013; Михайловский и др., 2017; Михайловский и др., 2017*a*]. В значительной степени это связано с лидирующей в настоящее время теорией о том, что основным механизмом генерации зарядов в облаках является взаимодействие ледяных частиц [Пономарев, Синькевич, 1997; Михайловский, 2016; Pruppacher, Klett 1997; Williams, 1985; Zipser, Lutz, 1994]. В результате анализа данных комплексных натуральных экспериментов были получены регрессионные связи частот молний с различными радиолокационными параметрами

[Степаненко, Гальперин, 1983; Михайловский и др., 2017; Михайловский и др., 2017*a*; Fehr et al., 2005; Price et al., 2011]. Методика экспериментов и полученные результаты подробно представлены в последующих разделах. Представляется перспективным использование новых радиолокационных параметров, характеризующих количество и размеры крупных ледяных частиц [Михайловский, 2002; Михайловский, 2015; Михайловский и др., 2013; Михайловский и др., 2017; Михайловский и др., 2017*a*].

### **3.2. Формирование грозового облака и выявление связей между радиолокационными характеристиками и параметрами грозовых разрядов**

Тесная связь электрических процессов в облаке с микрофизическими и динамическими позволяет использовать электрические характеристики для диагноза и прогноза его состояния [Михайловский, 2002; Михайловский, 2015; Михайловский и др., 2013; Михайловский и др., 2017]. При развитии многоячеековых грозоградовых облаков имеет место процесс взаимодействия и слияния отдельных ячеек. Представляет интерес изменение электрических характеристик, в частности, характеристик молниевой активности отдельных ячеек и всего облака в целом при этих процессах. В подобных экспериментах зачастую возникает необходимость использования косвенных методов определения грозовой активности по радиолокационным или радиометрическим параметрам облаков. Эти косвенные методы основаны на физико-статистических связях электрических, радиолокационных и радиометрических параметров, получаемых в процессе комплексных экспериментов.

Одним из таких уникальных комплексных экспериментов, на основе результатов которого были исследованы предлагавшиеся ранее и новые косвенные радиолокационные критерии, был

эксперимент 29 мая 2012 г. с мощным грозоградовым облаком, развивавшемся в районе Пятигорска. В результате анализа данных эксперимента были получены различные физико-статистические связи электрических, радиолокационных и радиометрических параметров, которые мы теперь широко используем в проводимых исследованиях [Синькевич и др., 2016; Михайловский и др., 2017]. Вследствие важности и значительного объема проведенных исследований и полученных результатов, мы сочли необходимым привести описание эксперимента и результатов его анализа в данной монографии (прил. 1).

### **3.3. Изменение электрических и радиолокационных характеристик облаков при самолетном воздействии на фидерное облако с последующим слиянием в Саудовской Аравии**

Рассмотрим результаты эксперимента по изучению влияния процесса слияния облаков на электрические и радиолокационные характеристики, полученные в рамках проекта по воздействиям на конвективные облака с целью вызывания осадков в Саудовской Аравии. Технология воздействий предусматривала засев с самолетов фидерного облака, слившегося впоследствии с материнским облаком. Прямых измерений электрических характеристик исследуемых облаков в данном эксперименте не проводилось.

Для контроля электрических характеристик использовались косвенные радиолокационные критерии, широко используемые как в России [Степаненко, Гальперин, 1983, Михайловский и др., 2017], так и за рубежом [Price, Rind, 1992; Price, Rind, 1993; Demetriades, Holle, 2006]. На сети МРЛ в нашей стране используются критерии  $Y = H \lg Z_3$  и  $Y_2 = HZ_{\max} / (\lg Z_{\max} - \lg Z_i)$  [Степаненко, Гальперин, 1983]. Также были рассчитаны

предложенные в литературе критерии грозоопасности  $Y_3 = H \cdot H_{Z_{\max}} \lg Z_{\max} / H_0^2$  [Зимин, 1978] и частоты молний исследуемого облака  $F_Y$  и  $F_{\lg Z}$  ( $\text{мин}^{-1}$ ), полученные на основании двух радиолокационных параметров  $Y$  и  $\lg Z_{\max}$  [Степаненко, Гальперин, 1983]. В данной работе использовались линейные регрессионные связи с указанными радиолокационными параметрами на стадии развития облака [Михайловский и др., 2017].

Вычисленные значения частот молниевых разрядов во время эксперимента представлены на рис. 3.2. Вертикальные стрелки указывают на моменты воздействий, горизонтальная — значение  $Y$  и  $Y_3$ , при превышении которых вероятность грозы достигает соответственно 0,95 (для  $Y$ ) и 0,8 (для  $Y_3$ ).

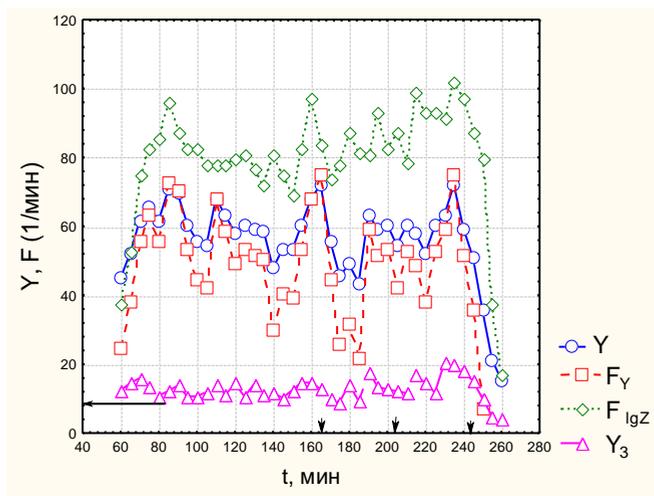


Рис. 3.2. Изменение во времени критериев грозоопасности ( $Y$  и  $Y_3$ ) и расчетных частот молниевых разрядов ( $F_Y$  и  $F_{\lg Z}$ ).

Из рис. 3.2 видно, что расчетная частота молний  $F_Y$  и критерий грозоопасности  $Y$  по данным оценкам менялись после воздействия на фидерное облако на 165 мин и последующего

слияния последнего с материнским. На 165 мин частота молний  $F_Y$  и  $F_{lgZ}$  была соответственно равна 75 и 85 мин<sup>-1</sup>. Отмечалось уменьшение рассматриваемых параметров. Через 15 минут произошло слияние фидерного облака с материнским. Это привело к тому, что изменился знак градиента частоты молний с отрицательного (то есть, уменьшения частоты молний) на положительный (то есть, увеличение частоты), менее чем через 10 мин был достигнут локальный максимум частоты молний. При этом она увеличилась с 20 до 60 мин<sup>-1</sup>. Необходимо заметить, что получаемые частоты молний характеризуются большими значениями, редко фиксируемыми в полевых экспериментах. Высокая частота молний объясняется либо особенностями облака, либо погрешностями используемых методик определения искомым частот [Степаненко, Гальперин, 1983], на которые уже обращалось внимание в работе [Михайловский и др., 2017].

В работах [Михайловский и др., 2013; Михайловский и др., 1990, Гальперин и др., 2005; Михайловский, 2002; Михайловский, 2015; Михайловский, 2016], основываясь на результатах самолетных экспериментов с синхронным измерением радиолокационных характеристик и напряженности электрического поля, авторы предлагали использовать интегральные радиолокационные параметры, характеризующие количество в облаке крупных ледяных частиц. К таким параметрам, в частности, относится объем переохлажденной части облака с отражаемостью более 35 дБZ ( $dV_{35}$ ). Выбор этого критерия основан на принятой в настоящее время гипотезе об определяющей роли ледяных частиц в электризации облаков [Михайловский, Кашлева, 2012; Кашлева и др., 2016; Pruppacher, Klett, 1997; Gungle, Krider, 2006; Cecil et al., 2005]. Этот подход был апробирован при анализе результатов комплексного эксперимента с грозоградовым облаком (прил. 1) [Синькевич и др., 2016; Михайловский и др., 2017]. Были получены

обнадеживающие результаты при исследовании связей этого параметра с частотой молний. Представляет интерес использование этого подхода при анализе данного эксперимента.

На рис. 3.3 представлены изменения объемов облака, находящихся выше нулевой изотермы и имеющих отражаемость, превышающую соответственно 30, 40, 50 и 60 дБZ в относительных единицах (индекс соответствует отражаемости). Учитывая результаты работ [Синькевич и др., 2016; Михайловский и др., 2017] можно полагать, что увеличение этих объемов должно приводить к увеличению частоты молний.

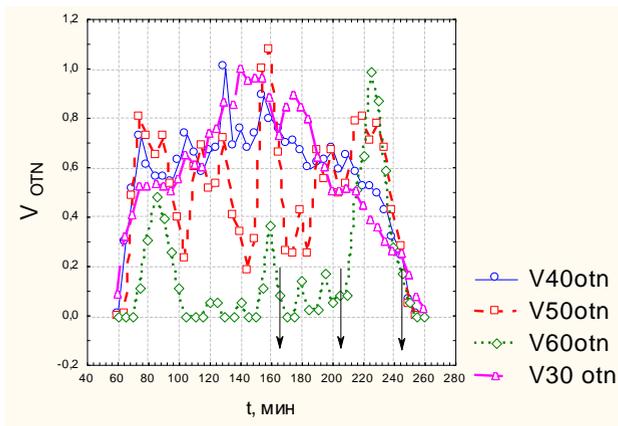


Рис. 3.3. Изменение во времени нормированных объемов облака  $V_{отн}$ , имеющих радиолокационную отражаемость более 30, 40, 50, 60 дБZ и расположенных выше нулевой изотермы,

$$V_{40отн} = V_{40}(t) / V_{40max},$$

где  $V_{40}(t)$  — значение  $V_{40}$  в данный момент времени,  
 $V_{40max}$  — максимальное значение  $V_{40}$  за время развития облака.  
 Аналогично для других значений отражаемости.

Из представленного рисунка видно, что объемы с малыми уровнями отражаемости (30, 40 дБZ) меняются относительно плавно от нуля до максимальных значений, наблюдавшихся в период 130 – 150 мин, и плавно уменьшаются к 260 мин. Изменения  $V_{50}$  и  $V_{60}$  имеют несколько ярко выраженных локальных максимумов и минимумов за время наблюдения.

Воздействие на фидерное облако с последующим его слиянием, как видно из рис. 3.3, было проведено на стадии начала уменьшения всех представленных характеристик. После этого наблюдалась частичная регенерация исследуемого облака. Эта регенерация выражалась в появлении локальных максимумов исследуемых объемов. Причем сначала наблюдался локальный максимум  $V_{30}$ , затем  $V_{40}$ ,  $V_{50}$  и  $V_{60}$ . Локальные максимумы каждого из параметров хотя и не превосходили своих абсолютных значений за все время развития облака, но были близки к ним, за исключением  $V_{60}$ , который достиг абсолютного максимума после воздействия и слияния. Величины отношений рассматриваемых объемов к их максимальным значениям возрастали с увеличением радиолокационной отражаемости. То есть относительные изменения  $V_{60}$  превышали изменения  $V_{50}$ ,  $V_{40}$ ,  $V_{30}$ .

Таким образом, слияние фидерного облака с материнским и воздействие на него привели к восстановлению наблюдавшихся величин объемов ( $V_{60}$ ,  $V_{50}$ ,  $V_{40}$ ,  $V_{30}$ ).

Анализ связей электрических и радиолокационных характеристик, проведенный для района Северного Кавказа, показал, что между частотой молний и объемом переохлажденной части с отражаемостью более 35 дБZ ( $dV_{35}$ ) существует устойчивая статистическая линейная связь (см. прил. 1):

$$F_{dV_{35}} = -0,04 + 0,03dV_{35}.$$

Мы полагаем, что наблюдаемое на рис. 3.3 характерное изменение хода  $V_{30}$  после воздействия и слияния фидерного облака с материнским на 165 мин эксперимента соответствует аналогичному изменению  $F_{dV_{35}}$ , и, следовательно, по изменению  $V_{30}$  можно судить об относительном изменении частоты молний. Изменение  $V_{30}$  достигает локального максимума приблизительно через 10 мин. Таким образом, после слияния и 1-го воздействия, в соответствии с установленной линейной связью, можно ожидать увеличения частоты молниевых разрядов на 20 % по сравнению со значением во время воздействия (165 мин). Подобных изменений после 2-го и 3-го воздействия не наблюдалось.

Следовательно, молниевая активность исследуемого облака, определяемая по косвенным радиолокационным критериям, после воздействия на фидерное облако и последующего слияния его с материнским увеличилась через 10 мин как минимум на 20 %. Этот результат подтверждается и по частотам молний  $F_Y$  и  $F_{lgZ}$ , рассчитываемых по радиолокационным параметрам  $Y$  и  $lg Z_{max}$ . По этим параметрам наблюдалось, что через 15 мин после воздействия на фидерное облако, то есть после завершения слияния, изменился знак градиента частоты молний с отрицательного на положительный, и менее чем через 10 мин был достигнут локальный максимум частоты молний (рис. 3.2).

### **3.4. Электрические характеристики облаков при слиянии на Северо-Западе России**

Рассмотрим изменение электрических характеристик облаков, развивавшихся 3 июня 2015 г. в Ленинградской области, этот эксперимент подробно описан в разделе 2. В качестве электрических характеристик анализируемых облаков «1» и «2» используем количество молниевых разрядов в этих облаках, зарегистрированных грозопеленгационной

системой «Алвес» за соответствующий 10-минутный радиолокационный обзор пространства ( $F_{ALV}$ ), и три частоты молниевых разрядов ( $F_H$ ,  $F_Y$ ,  $F_{dV35}$ ), рассчитанные по радиолокационным характеристикам исследуемых облаков на каждом обзоре.

Частота  $F_H$  определялась по регрессионному соотношению, широко используемому в зарубежной литературе [Price, Rind, 1992; Price, Rind, 1993; Demetriades, Holle, 2003]. Как показано в прил. 1, параметризация частоты молниевых разрядов только по верхней границе облака обладает большой неопределенностью и может использоваться только как начальная оценка [Михайловский и др., 2017].

Более надежной является частота  $F_Y$ , которая вычислялась при использовании в качестве предиктора частоты молниевых разрядов так называемого критерия грозоопасности  $Y$ , применяемого в России на радиолокационной сети штормоповещения [Степаненко, Гальперин, 1983]. Соотношение между  $F_Y$  и  $Y$  было получено по результатам экспериментов с грозowymi облаками Северного Кавказа с использованием радиолокатора МРЛ-5, работающего в диапазоне 10 см, и системы LS8000 в длинноволновом диапазоне (LF) [Синькевич и др., 2016; Михайловский и др., 2017].

$$F_Y = -0,9 - 0,0003 Y + 0,0046 Y^2. \quad (3.8)$$

Частота  $F_{dV35}$  была получена на основании тех же экспериментальных данных, что и уравнение (3.8) [Михайловский и др., 2017]:

$$F_{dV35} = -0,04 + 0,03 dV_{35}. \quad (3.9)$$

В табл. 3.1 представлено изменение во времени используемых для анализа электрических ( $F_{ALV}$ ,  $F_H$ ,  $F_Y$ ,  $F_{dV_{35}}$ ) и радиолокационных параметров ( $dV_{35}$ ,  $Y$ ) в ходе эксперимента по слиянию облаков 03.06.2015 г.

Отмечается низкая молниевая активность, фиксируемая гронопеленгационной системой «Алвес» ( $F_{ALV}$ ) по сравнению с расчетными значениями ( $F_H$ ,  $F_Y$ ,  $F_{dV_{35}}$ ). Она оказывается более чем в 10 раз ниже расчетных значений  $F_H$ ,  $F_Y$ ,  $F_{dV_{35}}$ , полученных нами из регрессионных соотношений (3.8), (3.9) [Михайловский и др., 2017]. Судя по литературе [Аджиев и др., 2013, Снегуров, 2010], системами «Алвес» и LS8000 в LF диапазоне используются одинаковые методы местоопределения молниевых разрядов, основанные на разности времен регистрации электромагнитного излучения в различных пунктах [Аджиев и др., 2013; Снегуров, 2010; Снегуров, Снегуров, 2012]. Причинами столь существенных различий значений измеренных и расчетных частот молний (табл. 3.1) могут являться:

- 1) различие технических характеристик систем местоопределения молний «Алвес» и LS8000;
- 2) различие технических характеристик метеорологических локаторов МРЛ-5 и ДМРЛ-С;
- 3) различие процессов электризации конвективных облаков Северного Кавказа и Северо-Запада, участвующих в данном сравнении.

Оставляя выяснение причин расхождения абсолютных частот молний на будущие исследования, рассмотрим их относительные изменения после слияния. Как все три расчетные характеристики, так и одна измеренная указывают на усиление молниевой активности облака, образовавшегося после слияния облаков 1 и 2 (табл. 3.1). Но увеличение частоты молний отчетливо наблюдается только при сравнении образовавшегося облака с облаками 1 и 2 по отдельности. Если же сравнивать

суммы частот молний облаков 1 и 2 с частотами после слияния, ситуация выглядит уже не столь однозначно. Максимальные значения всех рассматриваемых частот после слияния не превышают соответствующие суммы до слияния (табл. 3.1), за исключением  $F_{dV_{35}}$ , значение которой на 10 мин (60 за 10 мин) на 20% превышает суммы значений, наблюдавшихся до слияния (50 за 10 мин) на  $-30$  и  $-20$  мин.

Таблица 3.1

**Частота молний (1/10мин)  
по данным радиолокационных и грозопеленгационных  
измерений в зависимости от времени относительно  
момента слияния ( $t = 0$ )**

$t$ , мин	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
$F_{ALV}$ , 1/10 мин	3/0	1/1	0/0	0/0	2	2	3	1	1
$F_H$ , 1/10 мин	10/20	10/10	10/10	10/20	20	20	20	10	10
$F_Y$ , 1/10 мин	40/40	50/60	30/40	30/60	70	70	80	40	30
$F_{dV_{35}}$ , 1/10 мин	50/0	30/20	10/10	10/30	60	50	50	20	10

Числитель — облако 1, знаменатель — облако 2,  $t = 0$  соответствует моменту слияния облаков.

Была проведена оценка интегральных изменений частот молний после слияния облаков 1 и 2. Для этого соответствующие частоты молний до и после слияния были последовательно просуммированы по интервалам в 10, 20, 30 и 40 мин от момента слияния. Для реально наблюдавшихся частот ( $F_{ALV}$ ) отношения сумм  $F_{ALV}$  до слияния к  $F_{ALV}$  после слияния для соответствующих времен составляют 0; 0; 0,3; 0,75. Т.е. для

всех времен интегрирования наблюдалось увеличение молниевой активности после слияния, особенно значимое для первых трех временных интервалов (10, 20, 30 мин). Эта тенденция отражена также в изменении  $F_{dV_{35}}$ . Значения отношений для  $F_{dV_{35}}$  равны 0,3; 0,55; 0,7; 0,9. Для частот  $F_H$  и  $F_Y$ , соответствующие отношения равны 1,5; 1,2; 1,2; 1,4 и 1,3; 1,1; 1,2; 1,3. То есть, для обоих параметров значения сумм частот молний после слияния оказываются меньше, чем до слияния. Этот результат свидетельствует о низкой надежности использования  $F_H$  и  $F_Y$  для оценок временного хода частоты молний отдельного облака и необходимости разработки для этих целей других радиолокационных предикторов, типа  $F_{dV_{35}}$ .

В то же время необходимо отметить, что в данном эксперименте не обнаружено значительных изменений электрических характеристик рассматриваемых облаков после слияния, которые можно было ожидать, основываясь на литературных данных, представленных во введении.

Прямые измерения частоты молний с использованием данных грозопеленгационной системы показывают, что после слияния облаков появляются молнии, хотя частота их невысокая (до 3 разрядов за 10 мин). В течение 20 мин до слияния молнии из исследуемых облаков не регистрировались. При расчете частоты молний с использованием предиктора  $dV_{35}$  также отмечается некоторое увеличение частоты молний после слияния облаков. Суммарная частота молний из двух облаков до слияния при использовании в качестве критериев  $F_H$  и  $F_Y$  оказалась больше, чем после слияния. Таким образом, прямые измерения показали усиление грозовой активности, расчетные частоты молний указывают как на усиление грозовой активности ( $F_{dV_{35}}$ ), так и на ее снижение ( $F_H$ ,  $F_Y$ ) в зависимости от используемого критерия.

### 3.5. Электрические характеристики облаков при слиянии в Северо-Кавказском регионе России

Рассматриваются результаты наблюдений за кучево-дождевым облаком, которое развивалось юго-восточнее г. Нальчика в период с 17 ч 42 мин до 20 ч 34 мин 07.06.2014 г. Анализ радиолокационной структуры этого облака позволил классифицировать его как многоячейковый упорядоченный градовый процесс с правосторонним развитием, согласно классификации, предложенной ВГИ [Абшаев, 1984].

На рис. 3.4 представлена трансформация радиолокационной структуры грозоградового кучево-дождевого облака. В 18 ч 15 мин зафиксировано слияние конвективных ячеек 2 и 3, приведшее в дальнейшем к существенному увеличению практически всех радиолокационных параметров вновь образовавшегося облака [Инюхин и др., 2017].

Рассмотрим изменение электрических характеристик исследуемого облака в процессе слияния. Используя данные грозопеленгационной системы LS8000, получены статистические характеристики молниевой активности в период с 17 ч 45 мин до 19 ч 22 мин (табл. 3.2). Оценка электрической активности исследуемого облака выполнялась по следующим характеристикам:

- 1) частота молниевых разрядов в LF диапазоне в мин ( $F$ );
- 2) максимальные токи молний ( $I$ );
- 3) суммарный ток молний за мин ( $I_s$ ) (сумма максимальных токов молний за мин);
- 4) электрический заряд, переносимый каждой отдельной молнией ( $Q$ );
- 5) суммарный электрический заряд, переносимый молниями за мин ( $Q_s$ ).

Индексы «+» и «-» указывают на знак заряда, переносимого молнией.

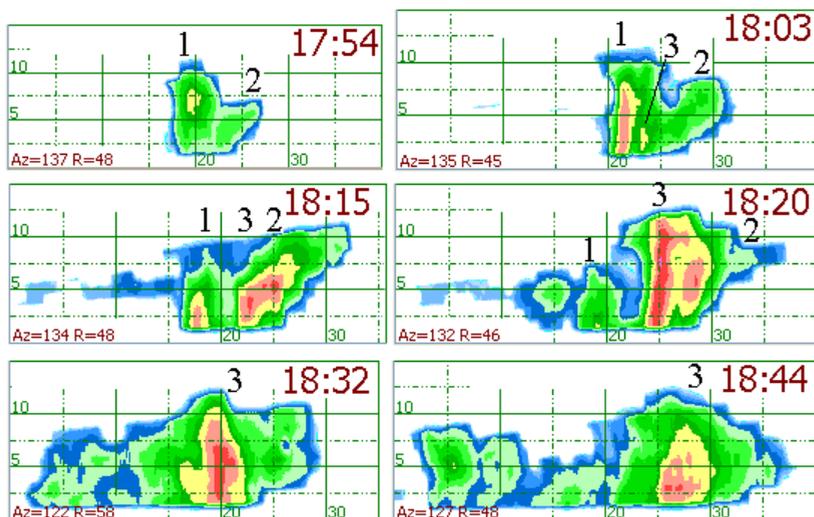


Рис. 3.4. Изменение во времени радиолокационной структуры грозоградового облака (вертикальные сечения).

1, 2, 3 — номера конвективных ячеек (расстояние на осях в км).

Вначале рассмотрим статистические характеристики облака в целом, без деления на ячейки (табл. 3.2).

Таблица 3.2

**Статистические характеристики молниевой активности облака**

Параметр	$F^+$ , мин <sup>-1</sup>	$F^-$ , мин <sup>-1</sup>	$I^+$ , кА	$I^-$ , кА	$I_S^+$ , кА	$I_S^-$ , кА
максимум	6	16	141	0	175	0
минимум	0	0	0	-31	0	-132
среднее	1,3	3,2	21,3	-8,6	31,7	-29,8
дисперсия	1,2	2,7	30,2	2,9	42,8	23,6
сумма	77	260	1616	2230	1616	2230

Во время эксперимента частота молний изменялась от 0 до 6 мин<sup>-1</sup> для положительных молний и от 0 до 16 мин<sup>-1</sup> для отрицательных со средними значениями 1,3 мин<sup>-1</sup> и 3,2 мин<sup>-1</sup> и дисперсиями 1,2 и 2,7 соответственно.

Сумма токов отрицательных молний за время существования облака была равна -2230 кА, а положительных +1616 кА. Максимальный ток единичной положительной молнии достигал 141 кА, а отрицательной -31 кА.

На рис. 3.5 представлены гистограммы распределений частот, токов молний и суммарных значений токов молний за минуту как для положительных, так и для отрицательных молний, зарегистрированных в исследуемом облаке. Положительных молний наблюдалось примерно в 2,4 раз меньше, чем отрицательных. Имеющиеся в литературе данные о том, что положительные молнии на землю представляют собой достаточно редкое явление и отличаются существенно большими токами, чем отрицательные, не подтверждаются результатами данного эксперимента, так как их частота была сопоставима с частотой отрицательных молний.

В исследуемом облаке наблюдалось только 11 сильноточных положительных разрядов более 40кА. Возможно, что остальные зарегистрированные (66) положительные разряды не являлись типичными положительными разрядами облако — земля, а положительный импульс тока в антеннах давали разряды молний типа облако — облако или внутриоблачные.

В работах [Синькевич и др., 2016, Михайловский и др., 2017] отмечалась тесная связь между суммарным током разрядов  $I_s$  за минуту и соответствующей частотой отрицательных молний ( $F^-$ ). Для рассматриваемого облака между суммой токов за мин ( $I_s, \text{кА}$ ) и частотой разрядов ( $F^-$ ) также наблюдается тесная линейная связь с коэффициентом корреляции  $r = -0,99$ ,  $p = -0,00$ , где  $p$  — уровень значимости.

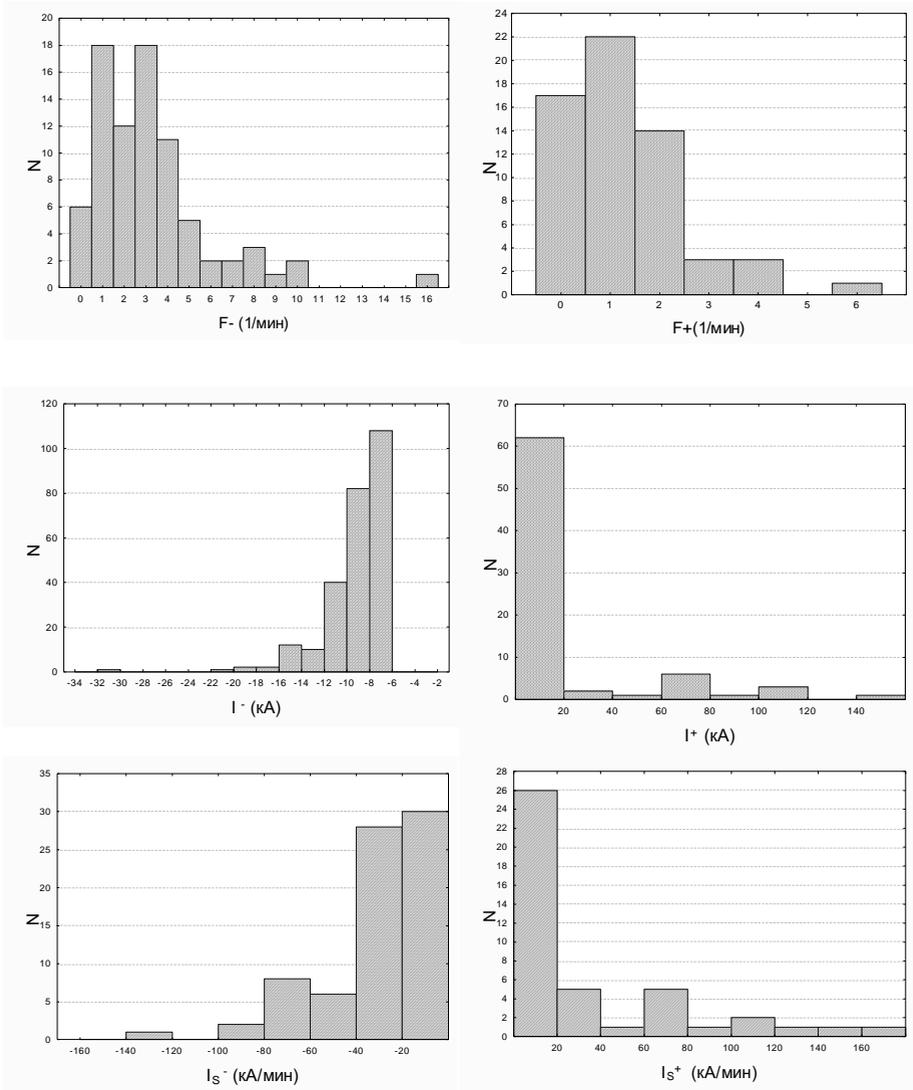


Рис. 3.5. Гистограммы распределений частот ( $F$ ), токов ( $I$ ) и суммарных значений токов за мин ( $I_S$ ) для положительных (+) и отрицательных (-) молний.

Зависимость суммарного тока за мин ( $I_S^-$ ) от частоты отрицательных молний ( $F^-$ ) представлена на рис. 3.6. Из рисунка видно, что связь между указанными характеристиками весьма тесная и имеет линейный характер, уравнение может быть представлено в следующем виде:

$$I_S^- = 0,6 - 8,3 \cdot F^-$$

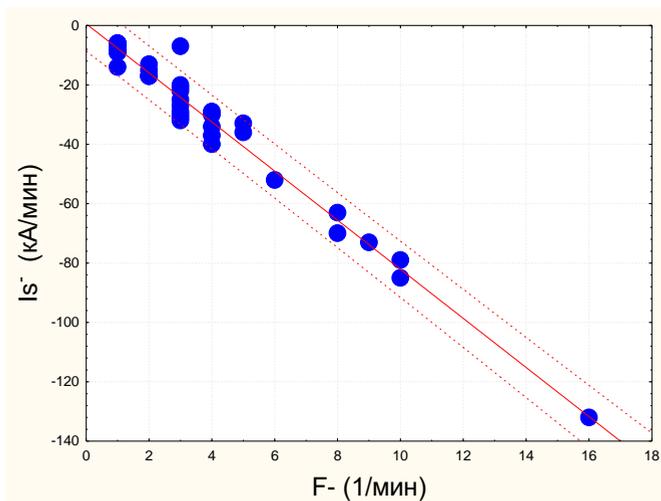


Рис. 3.6. Зависимость суммарного тока за мин ( $I_S^-$ ) от частоты отрицательных молний ( $F^-$ ).

Таким образом, подтверждаются результаты исследований, показывающие возможность использования частоты молний в качестве репрезентативной характеристики мощности электрического генератора [Михайловский и др., 2017]. Необходимо отметить, что речь идет о частотах и токах молний, фиксируемых грозопеленгатором LS8000 в LF диапазоне.

Оценка заряда, переносимого молнией на землю, должна осуществляться интегрированием тока молнии за все время разряда, что сделать в используемой системе грозопеленгации не представляется возможным. Было предложено оценивать

величину переносимого молнией заряда путем умножения значения тока главной стадии первой компоненты на 0,1 с, что в 5—10 раз меньше средней длительности существования молний. Вычисленный таким образом заряд является оценкой сверху и может служить репрезентативной характеристикой мощности электрического генератора облака. Принимая этот метод оценки, получим общий заряд, перенесенный отрицательными молниями из данного облака, который составил 223 Кл. Средний заряд на одну молнию составил 0,86 Кл, а перенесенный положительными молниями — 162 Кл и 2,1 Кл соответственно.

Рассмотрим, как меняются электрические характеристики облака при слиянии ячеек, то есть, выясним, как изменения во внутренней структуре облака сказываются на электрических разрядах.

На рис. 3.7 представлены зарегистрированные токи положительных и отрицательных молний, измеренные в LF диапазоне за время существования исследуемого облака с 17 ч 45 мин до 19 ч 47 мин. Для удобства дальнейших рассуждений время 17 ч 45 мин принято за начало отсчета (0 мин). Анализ электрических разрядов выполнялся до 19 ч 47 мин, что соответствует 122 мин. В верхней части рис. 3.7 отмечено также время существования отдельных ячеек облака. Верхняя линия показывает время существования третьей ячейки (18 ч 00 мин — 19 ч 47 мин), средняя — второй ячейки (17 ч 45 мин — 18 ч 44 мин), нижняя — первой ячейки (17 ч 45 мин — 18 ч 26 мин).

В 18 ч 20 мин (35 мин) ячейка 3 достигает максимального развития, высота верхней границы увеличивается до 12,8 км, а максимальная отражаемость  $Z_{\max}$  — до 64 дБZ. Количество разрядов в это время не очень велико, оно начинает расти примерно через 10 мин. Этот период времени соответствует периоду, когда происходило слияние ячеек 2 и 3 — с 18 ч 15 мин (30 мин) по 18 ч 32 мин (47 мин). Из рисунка видно, что в конце

этого периода и далее происходит увеличение частоты и токов отрицательных молний. Положительные молнии с большими токами появляются на 60 мин (18 ч 45 мин), то есть, сразу после объединения ячеек.

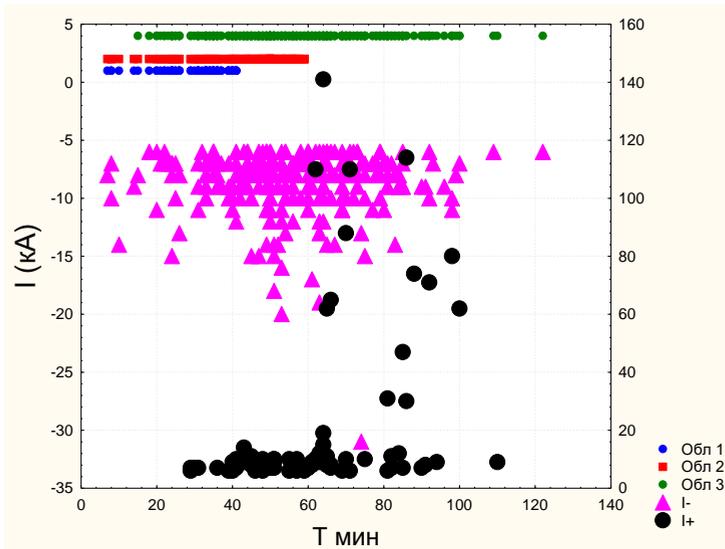


Рис. 3.7. Изменение во времени токов положительных ( $I^+$ ) и отрицательных ( $I^-$ ) молний в процессе слияния конвективных облаков.

Далее рассмотрим, как меняются суммарные токи молний при слиянии облаков (на рис. 3.8 представлено изменение суммарных положительных ( $I_S^+$ ) и отрицательных ( $I_S^-$ ) токов за минуту во время эксперимента). Красные линии на верхней и нижней осях выделяют интервал времени, в течение которого происходило слияние второй и третьей ячеек в анализируемом облаке. На этом рисунке наглядно видно, что после 47 мин, когда завершился процесс слияния, происходит заметное увеличение токов молний обоих знаков. В период между 50 и 70 мин токи отрицательных молний достигают максимальных величин. Примерно с 60 мин резко возрастают токи положительных

молний. Начиная с 80 мин отмечается существенное уменьшение величины токов отрицательных молний, а токи положительных молний имеют большие значения вплоть до 100 мин. Таким образом, первоначально отмечается увеличение токов отрицательных молний, за этим следует увеличение токов положительных молний. Причина этого явления может быть связана с тем, что на первом этапе молнии возникают в центральной части облака, перенося отрицательный заряд, далее, по мере разрушения облака и формирования наковальни, возникают положительные молнии, которые переносят соответствующий заряд из наковальни на Землю.

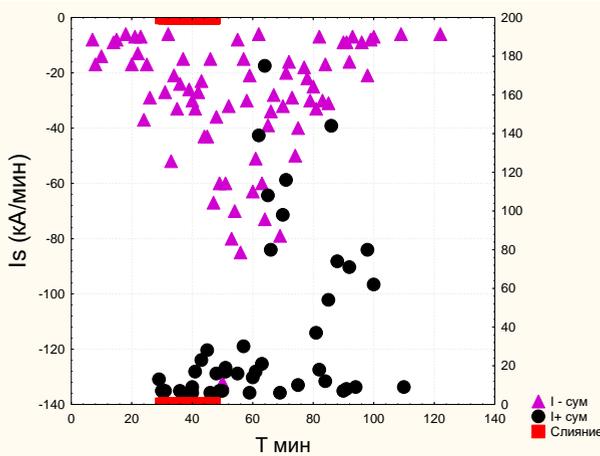


Рис. 3.8. Изменение во времени суммарных положительных ( $I_S^+$ ) и отрицательных ( $I_S^-$ ) токов за мин в течение эксперимента. Красными линиями отмечен период слияния облаков.

На рис. 3.9 представлено изменение интегральных токов ( $I^+$ ,  $I^-$ ) и частот ( $F^+$ ,  $F^-$ ) положительных и отрицательных молний в течение эксперимента. Интегральный ток определялся суммированием токов соответствующего знака ( $I_S^+$ ,  $I_S^-$ ) с начала эксперимента. Видно, что градиенты  $I^-$  и  $F^-$  увеличиваются

сразу после слияния ячеек 2 и 3 (45—55 мин). Увеличения  $I^+$  и  $F^+$  наблюдаются после 60 мин, то есть, увеличение положительных токов молний и частоты разрядов этих молний происходит после соответствующего увеличения отрицательных молний. Оказалось, что модули суммарных токов положительных и отрицательных молний за время существования грозы незначительно отличаются друг от друга, составляя соответственно 1616 и 2230 А (рис. 3.9).

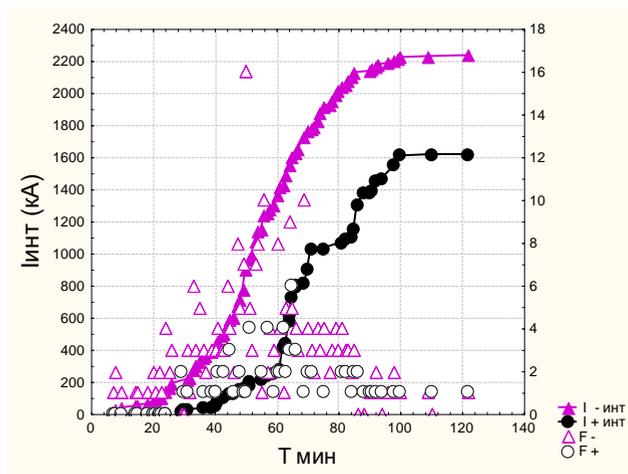


Рис. 3.9. Изменение во времени отрицательных и положительных интегральных токов ( $I^-_{инт}$ ,  $I^+_{инт}$ ) и частот положительных и отрицательных молний ( $F^+$ ,  $F^-$ ).

Известно, что характеристики градовой активности облака тесно связаны с электрическими параметрами. При индикации града в этом эксперименте (с 21 по 78 мин) наблюдается максимальное увеличение  $I^-$ , а также максимальные частоты молний, переносящих отрицательный заряд  $F^-$ . Максимальные значения потока кинетической энергии выпадающего града ( $\dot{E}$ ), приведенные в [Инюхин, 2017], для ячейки 2 (39 мин) непосредственно предшествуют росту градиента  $I$  и  $F$ .

Таким образом, анализ данного эксперимента в Северо-Кавказском регионе России показал, что слияние конвективных ячеек усиливает электрическую активность облака за счет интенсификации микрофизических процессов (рост большего количества и более крупных ледяных частиц). Максимумы частот и токов отрицательных и положительных молний разнесены во времени и наблюдаются после слияния облаков. После 47 мин, когда завершилось слияние, происходит заметное увеличение токов молний обоих знаков. В период между 50 и 70 мин токи отрицательных молний достигают максимальных величин. Примерно с 60 мин резко возрастают токи положительных молний.

Похожие изменения наблюдались и в экспериментах, проведенных в Саудовской Аравии и в Северо-Западном регионе России. В первом случае молниевая активность исследуемого облака после его слияния с материнским увеличилась на 20 % через 10 мин. Этот результат подтверждается и при анализе частот молний  $F_Y$  и  $F_{lgZ}$ . По этим параметрам наблюдалось, что после завершения слияния изменился знак градиента частоты молний с отрицательного на положительный, и через 10 мин был достигнут локальный максимум частоты молний.

В эксперименте по исследованию слияния облаков в Ленинградской области прямые измерения частоты молний с использованием данных грозопеленгационной системы показывают, что после слияния облаков появляются молнии, хотя частота их невысокая (до 3 разрядов за 10 мин). В течение 20 мин до слияния молнии из исследуемых облаков не регистрировались. При расчете частоты молний с использованием предиктора  $dV_{35}$  также отмечается некоторое увеличение частоты молний после слияния облаков. Таким образом, прямые измерения показали усиление грозовой активности.

## ГЛАВА 4

### СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАКОВ ПРИ СЛИЯНИИ

В настоящее время при изучении физических процессов, происходящих при слиянии облаков, учеными анализировались отдельные наблюдавшиеся случаи. В данной монографии впервые предпринята попытка выполнить статистический анализ изменений характеристик облаков в результате их слияния. Ниже представлены результаты такого анализа для двух регионов: Саудовской Аравии и Северо-Запада России. Отметим, что для Саудовской Аравии имеется существенно большее количество случаев, когда наблюдалось слияние облаков, что возможно связано с климатическими и региональными особенностями развития облаков.

#### 4.1. Облака Саудовской Аравии

Анализируемые данные были получены в юго-западной части Королевства Саудовской Аравии. Здесь представлены результаты статистической обработки радиолокационных измерений характеристик кучево-дождевых (материнское облако согласно нашей терминологии) и фидерных (мощных кучевых облаков, в ряде случаев кучево-дождевых) за 3 скана до слияния и 4 скана после слияния с фидерными облаками. В некоторых случаях понятие «фидерное облако» достаточно условно, так как наблюдалось слияние двух достаточно развитых облаков. Время измерений, соответствующее 7 сканам радиолокатора, составило 35 мин. Характеристики фидерных облаков обобщались за один скан измерений перед процессом слияния.

Анализировались следующие характеристики кучево-дождевых облаков: поток осадков  $F$ , высота верхней границы облака  $H_{вг}$ , масса облака, максимальная отражаемость ( $Z_m$ ),

высота расположения области максимальной отражаемости ( $H_m$ ). Все эти характеристики рассчитывались программой ТИТАН. Детальное описание алгоритмов приведено в [Dixon and Wiener, 1993].

Статистические данные о характеристиках исследованных кучево-дождевых облаков и фидерных облаков приведены в табл. 4.1. Они включают 405 измерений для кучево-дождевых облаков и 66 измерений для фидерных облаков [Краус и др., 2012; Krauss et al., 2011; Sinkevich, Krauss, 2014].

Таблица 4.1

**Характеристики исследованных облаков  
(числитель — кучево-дождевые, знаменатель — фидерные)**

Величина	$N$	Среднее	Медиана	Max	$\sigma$
$H_{BG}$ , км	405 / 66	13,6 / 10,5	14,1 / 9,6	18,6 / 17,9	3,1 / 2,9
$Z_m$ , дБZ	405 / 66	54,7 / 46,7	56,6 / 46,4	64,5 / 61,6	6,2 / 7,5
$H_m$ , км	405 / 66	5,8 / 6,2	5,5 / 6,3	10,8 / 13,8	1,8 / 2,3
$M$ , кг	405 / 66	1294 / 177	742 / 51	10068 / 1315	1550 / 294
$F$ , м <sup>3</sup> /с	405 / 66	1456 / 256	1024 / 95	8035 / 2048	1439 / 377

Значения максимальной отражаемости, которые регистрировались в кучево-дождевых облаках, весьма значительные. Так, медианное значение равно 56,6 дБZ, а максимальное достигало 64,5 дБZ. Фидерные облака имели меньшую отражаемость, медианное значение было равно 46,4 дБZ, а максимальное — 61,6 дБZ. Высота расположения зоны максимальной отражаемости в фидерных облаках на 400 м выше, медианное значение высоты зоны повышенной отражаемости у фидерных облаков 6,3 км, у кучево-дождевых — 5,5 км. Поток осадков из кучево-дождевых облаков (медианное значение — 1024 м<sup>3</sup>/с) существенно выше, чем из фидерных (95 м<sup>3</sup>/с).

Высота верхней границы кучево-дождевых облаков превосходила 10 км в 85 % случаев, а максимальное значение достигало 18,6 км. Значения высоты верхней границы могут быть несколько завышены вследствие влияния эффекта боковых лепестков при наличии высокой отражаемости облака [Krauss et al., 2011]. Некоторые из фидерных облаков также были очень развитыми к моменту слияния (верхняя граница одного из них достигала 17,8 км), однако, в большинстве случаев, они были заметно меньше кучево-дождевых облаков. Среднее значение высоты верхней границы составляло 10,5 км. Фидерные облака имели верхнюю границу ниже 12,6 км в 72 % случаев. Масса кучево-дождевых облаков (среднее значение 1456 кт) существенно превышала массу фидерных облаков (среднее значение 256 кт).

#### **4.1.1. Зависимость характеристик кучево-дождевых облаков от времени**

Была исследована зависимость характеристик кучево-дождевых облаков от времени относительно процесса слияния. В табл. 4.2 приводятся средние и медианные значения анализируемых характеристик. Напомним, что время 0, согласно нашему определению — это время непосредственно перед процессом объединения, а +5мин — время следующего измерения, когда уже произошло слияние облаков (программа ТИТАН в этом случае рассчитывает характеристики уже объединенного облака).

Верхняя граница кучево-дождевых облаков постепенно увеличивалась. Наибольшее увеличение произошло в период  $-5 \div +10$  мин (среднее значение изменилось от 12,3 до 14,5 км), далее происходит стабилизация высоты верхней границы. В целом рост облаков начался до слияния и завершился через 10 мин после него.

Таблица 4.2

**Средние и медианные значения анализируемых  
характеристик кучево-дождевых облаков в зависимости от времени**

<i>t</i> , мин	Среднее						Медиана					
	Н <sub>ВГ</sub> , км	Z <sub>нп</sub> , ДБЗ	М, кг	Н <sub>т</sub> , км	F, м <sup>3</sup> /с	M <sub>н</sub> , кг/м <sup>2</sup>	Н <sub>ВГ</sub> , км	Z <sub>нп</sub> , ДБЗ	М, кг	Н <sub>т</sub> , км	F, м <sup>3</sup> /с	M <sub>н</sub> , кг/м <sup>2</sup>
-10	11,9	50,6	752	5,7	918	19,2	11,5	55,1	325	5,5	477	14,8
-5	12,3	51,5	709	5,8	848	18,8	11,9	53,7	243	6,3	490	11,9
0	13,1	53,4	966	5,8	1102	24,6	13,4	54,3	469	6,3	548	16,5
5	14,0	56,2	1392	6,0	1602	33,0	14,1	56,5	801	6,3	1047	26,1
10	14,5	57,0	1643	6,0	1840	36,9	14,9	58,2	1091	5,5	1464	31
15	14,5	56,8	1726	5,5	1883	34,2	14,9	57,6	990	5,5	1454	31,5
20	14,5	56,3	1781	5,6	1892	32,7	14,9	57,9	1110	5,5	1356	30,8

*M<sub>н</sub>* — вертикально интегрированная масса града в столбе атмосферы, приходящаяся на 1м<sup>2</sup>.

Максимальная отражаемость увеличилась после слияния. Наблюдалось некоторое уменьшение отражаемости в период времени перед слиянием, но через 10 мин после него произошло увеличение медианного значения на 3,9 дБZ. Высота уровня максимальной отражаемости ( $H_t$ ) была стабильной в период  $-5 \div +5$  мин, ее уменьшение отмечено позже, что соответствует процессу усилению осадков и постепенному их перемещению в нижнюю часть облака.

Наибольшие изменения в результате слияния облаков наблюдались в величинах потока осадков ( $F$ ) и массы ( $M$ ). Среднее значение массы увеличилось от 966 до 1781 кг на 20 мин (увеличение на 184 %), медианное значение увеличилось от 469 до 1110 кг (236 %).

Поток осадков слабо менялся в течение 3 сканов (15 мин), предшествующих слиянию (медианное значение было примерно равно  $475 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Существенное увеличение произошло сразу после слияния,  $F$  увеличился до  $1047 \text{ м}^3/\text{с}$  (изменение — 212%), еще через 5 мин эта величина достигла  $1464 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Наиболее заметное увеличение приведенной массы града  $M_h$  отмечено в период после слияния облаков (5 мин). Однако следует отметить, что ее увеличение началось еще до слияния облаков.

Для того, чтобы определить, является ли увеличение массы и потока осадков после слияния облаков просто суммой соответствующих величин или же происходят микрофизические и динамические процессы в облаке, которые увеличивают рассматриваемые характеристики существенно больше, была рассчитана сумма массы кучево-дождевого облака и фидерного облака в 0 мин, то есть, перед слиянием. Аналогично был вычислен поток осадков. Далее было определено отношение рассматриваемых величин для каждого периода времени к соответствующему значению суммы в 0 мин. Результаты расчетов приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Отношение потока осадков и массы кучево-дождевого облака  
в выбранный момент времени к сумме потока осадков и массы кучево-дождевого облака  
и фидерного облака в момент времени 0 мин. (N — количество измерений)

Величина	Время, мин	N	Среднее	$\sigma$	Медиана	Максимум
M/M(0)	5	66	1,82	1,32	1,27	7,53
	10	65	2,57	2,67	1,61	14,73
	15	60	2,66	2,60	1,89	12,93
	20	48	2,67	2,43	2,08	11,84
	<b>Среднее</b>		<b>2,43</b>		<b>1,71</b>	
F/F(0)	5	66	1,65	1,02	1,28	5,89
	10	65	2,19	1,98	1,51	12,00
	15	60	2,23	1,88	1,64	10,55
	20	48	2,16	1,63	1,72	8,49
	<b>Среднее</b>		<b>2,06</b>		<b>1,54</b>	

Из приведенной таблицы следует, что за период 20 мин среднее значение отношения масс  $M/M(0)$  увеличилось в 2,43 раза, а медианное значение увеличилось в 1,71 раз. Среднее значение отношения  $F/F(0)$  увеличилось в 2,2 раза через 15 мин после слияния, осредненное за 20 мин значение этого соотношения составило 2,06, медиана в среднем увеличилась в 1,54 раза. Эти данные показывают, что слияние облаков существенно влияет на массу объединенного облака и поток осадков из него, происходит существенное (в 1,5—2,5 раза) увеличение этих характеристик по сравнению с соответствующим значением перед слиянием.

Таким образом, статистический анализ данных о слиянии облаков подтверждает выводы о том, что этот физический процесс оказывает существенное влияние на характеристики облаков, приводя к заметному усилению конвекции, что находит свое выражение в увеличении высоты верхней границы облака, увеличению отражаемости, массы облака и потока осадков. Это неизбежно сказывается на усилении опасных явлений, связанных с конвективными облаками.

#### **4.1.2. Электрические характеристики облаков**

В настоящем параграфе рассмотрены результаты статистической обработки частоты молний  $F$  ( $\text{мин}^{-1}$ ), которая рассчитывалась из радиолокационных параметров облаков. Проанализировано 58 случаев слияния. Были выполнены расчеты параметра  $Y$  для этих облаков (методика расчета представлена в прил. 1). С этой целью были определены максимальные значения отражаемости рассматриваемых облаков на высоте 7 км и высота их верхней границы. Далее вычислялся параметр  $Y$ . С использованием полученной для Северного Кавказа связи между частотой молний  $F$  ( $\text{мин}^{-1}$ ) и параметром  $Y$  рассчитывались значения  $F$  по формуле:

$$F = -0,9 - 0,0003Y + 0,0046Y^2$$

Для последующего анализа определялся безразмерный параметр  $F_{\text{rel}}$  — отношение частоты молний в выбранный скан радиолокатора ( $-10 \div +20$  мин) к частоте молний в 0 момент времени (перед слиянием облаков).

Статистические данные об относительной частоте молний в исследованных кучево-дождевых облаках приведены в табл. 4.4. Здесь представлены значения  $F_{\text{rel}}$ , объединенные в одну группу в период времени  $-5$  и  $-10$  мин, то есть, в период до слияния Сб с фидерным облаком, а также после слияния ( $5—20$  мин).

*Таблица 4.4*

**Статистические характеристики параметра  $F_{\text{rel}}$   
для двух групп Сб: до и после слияния с фидерным облаком**

$t$ , мин	$N$	Среднее	Медиана	Min	Max	$\sigma$
$-5 \div -10$	84	1,1	0,9	0,1	12,0	1,4
$5 \div 20$	211	1,9	1,1	0,0	29,6	3,3

В общей сложности анализируется 84 значения частоты молний в период до слияния облаков и 211 измерений после слияния. Среднее значение относительной частоты молний после слияния облаков существенно (почти в 2 раза) превосходит то, которое рассчитано для периода времени перед слиянием. Разница в медианах не столь существенна (0,9 и 1,1 соответственно). Эти различия объясняются тем, что некоторые из кучево-дождевых облаков начали интенсивно развиваться после слияния, что привело к существенному увеличению отражаемости и высоты верхней границы, это сказалось соответственно на значениях  $Y$  и  $F_{\text{rel}}$ . Если оценивать в целом изменение относительной частоты молний по медиане распределения, то видно, что она увеличилась примерно на 20 %

после слияния облаков. Ниже, на рис 4.1. приведен временной ход медианы и среднего значения  $F_{rel}$ .

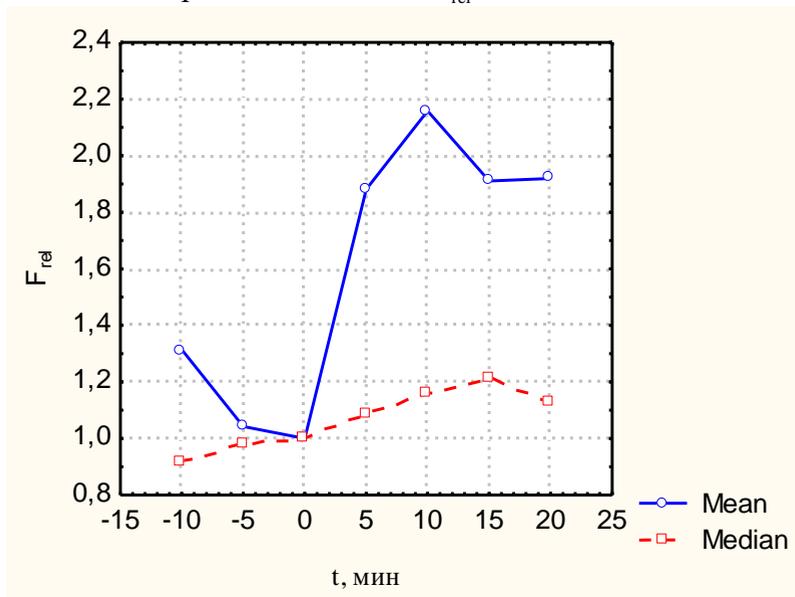


Рис. 4.1. Отношение частоты молний в выбранный момент времени к частоте молний в 0 момент времени ( $F_{rel}$ ).

Из рисунка следует, что максимум в увеличении частоты молний отмечается через 10—15 мин после слияния кучево-дождевого облака с фидерным и примерно равен 20 % при сравнении медиан и более 200 % при сравнении средних значений. Таким образом, представленные данные указывают на то, что слияние облаков существенно сказывается на электрических характеристиках; происходит значительное усиление грозовой активности.

## 4.2. Облака Северо-Запада России

В исследовании облаков Северо-Запада России использовались данные, полученные с помощью ДМРЛ-С —

метеорологического радиолокатора, работающего на длине волны 5,3 см. Он установлен в поселке Воейково Ленинградской области и находится в 10 км восточнее Санкт-Петербурга [Попов, Синькевич, 2017].

Для получения поля осадков радиолокационная отражаемость в приземном слое калибровалась по измерениям интенсивности атмосферных осадков весовыми осадкомерами Pluvio<sup>2</sup> 200. На территории Санкт-Петербурга и ближайших пригородов функционирует сеть таких осадкомеров, включающая 34 прибора, которые проводят измерения количества осадков с периодом 5 мин.

В этих экспериментах рассматривались облака, которые формировали радиолокационную ячейку с максимальной отражаемостью в столбе атмосферы  $Z_m$  более 35 дБZ. Объем с соответствующей отражаемостью должен был превосходить  $10 \text{ км}^3$ ; эта область должна была располагаться на высоте более 1 км. За момент слияния принято время, когда две радиолокационные ячейки объединились в одну. Если на одном скане радиолокатора наблюдалось две конвективных ячейки по уровню отражаемости 35 дБZ, а на следующем на их месте появилась одна ячейка, то считалось, что слияние облаков произошло между этими двумя сканами. Временная неопределенность момента слияния равна периоду радиолокационных обзоров ДМРЛ-С, то есть, 10 мин. Время, соответствующее предыдущему скану радиолокатора перед слиянием, для удобства дальнейших рассуждений, принималось за начало отсчета «0 мин».

Анализировались данные за теплые периоды 2015 и 2016 гг. на территории, которая находится в пределах эффективного радиуса обнаружения осадков радиолокатором ДМРЛ-С Воейково. Из результатов исследований были исключены случаи, в которых непосредственно перед слиянием или сразу после него происходило слияние с третьей ячейкой или распад

исследуемых облаков. Всего для анализа было отобрано 14 случаев слияния конвективных облаков. В выборку попали облака различных геометрических размеров с площадью от 5 до 800 км<sup>2</sup>.

Были рассмотрены следующие характеристики: максимальная радиолокационная отражаемость в столбе атмосферы  $Z_m$ , высота верхней границы облаков  $H_m$ , высота максимальной отражаемости  $H_{Z_m}$ , площадь облака (облаков)  $S$ , максимальная интенсивность осадков  $I_m$  и поток осадков  $F$ .

До слияния, когда два облака существовали отдельно, характеристики для анализа подбирались следующим образом: для максимальных характеристик ( $Z_m$ ,  $H_m$ ,  $I_m$ ) выбиралось наибольшее значение; интегральные характеристики ( $S$ ,  $F$ ) суммировались; высота расположения максимальной отражаемости  $H_m$  определялась, как среднее из значений этой характеристики для двух облаков.

Для удобства анализа рассчитывались относительные значения характеристик (в %), то есть, значения выбранных параметров за каждый временной отсчет нормировались на значение этого параметра в 0 мин.

На рис. 4.2 представлены диаграммы «ящик с усами» для каждой рассматриваемой характеристики в зависимости от времени. На диаграмме представлены: медиана, нижний и верхний квартили, минимальное и максимальное значение выборки для каждого временного отсчета. Кривая, аппроксимирующая изменение медиан относительных характеристик, построена методом взвешенных по расстоянию наименьших квадратов (Distance Weighted Least Squares).

Как видно из рис. 4.2, медианы всех характеристик увеличиваются сразу после слияния (10 мин).

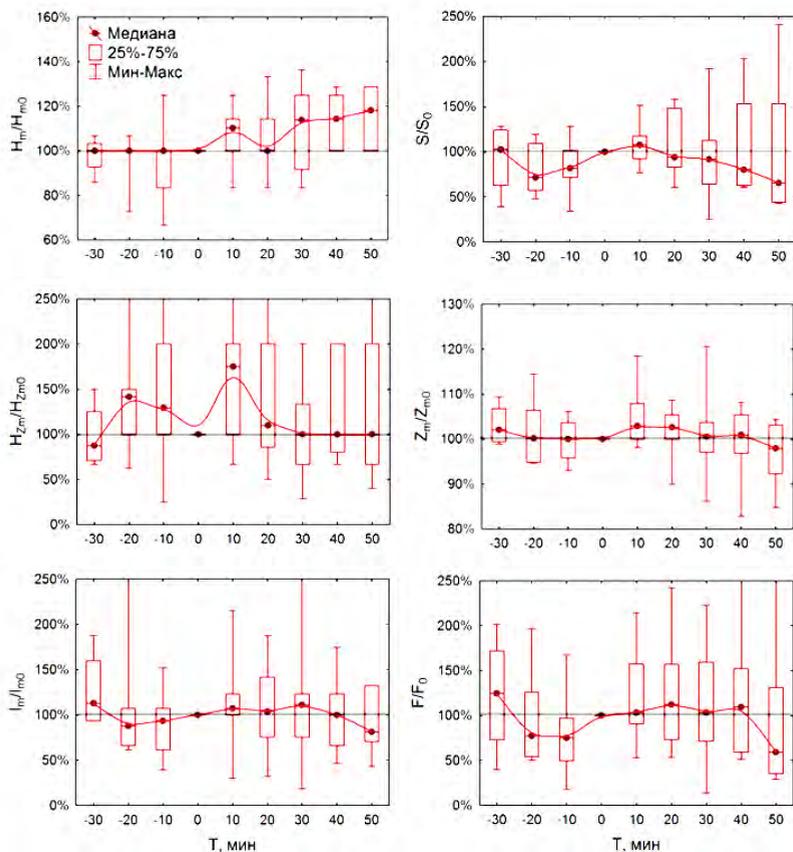


Рис. 4.2. Диаграмма «ящик с усами» изменения относительных характеристик облаков до и после слияния.

Рассмотрим изменение размеров объединенных облаков. До 0 мин  $H_m$  в основном оставалась постоянной, далее происходит увеличение высоты верхней границы облака. Площадь облака  $S$  увеличивалась до 10 мин, далее происходит ее уменьшение. Таким образом, слияние привело к усилению развития облака по вертикали при последующем уменьшении горизонтальных размеров объединенного облака.

Высота расположения максимальной отражаемости резко возросла после слияния (перед слиянием медиана этой характеристики уменьшилась). Ход данной характеристики может быть связан с изменением вертикальных потоков внутри облаков. Возможно, что сразу после объединения двух облаков появляется мощный восходящий поток, который приводит к увеличению высоты расположения максимальной отражаемости на 70 %. Затем она уменьшается, что может быть связано с выпадением осадков из объединенного облака.

В большинстве случаев максимальная отражаемость объединенного облака (рис. 4.2) увеличивается на 10 и 20 мин по сравнению со значениями до слияния. Далее она уменьшается и становится примерно равной той, которая наблюдалась до слияния облаков. Разброс  $Z_m/Z_{m0}$  невелик, так как  $Z$  — логарифмический параметр.

Медиана интенсивности осадков увеличивается после слияния, достигая максимального значения (112 %), на 30 мин, а поток осадков достигает максимального значения на 20 мин (113 %), и далее происходит уменьшение медиан.

Для выявления статистической значимости в изменении характеристик облаков в процессе слияния выполнен отдельный анализ данных для 2 моментов времени — 0 и 20 мин. Нулевая минута соответствует времени скана радиолокатора непосредственно перед слиянием, 20 мин выбрана в связи с тем, что с одной стороны, к этому времени, чаще всего, облака полностью объединяются, а с другой стороны, эффект от слияния ещё присутствует. В табл. 4.5 представлены основные статистические параметры исследуемых характеристик облаков.

Кроме основных статистических параметров облаков, полученных для двух сканов радиолокатора, в таблице также приведено количество случаев уменьшения, отсутствия изменения и увеличения исследуемых характеристик на 20 мин по сравнению с 0 мин ( $n_-$ ,  $n_0$ ,  $n_+$  соответственно).

Таблица 4.5

**Статистические характеристики облаков  
перед (0 мин) и после слияния (20 мин)**

Величина	0 мин					20 мин					$n_+$	$n_0$	$n_-$
	Среднее	Медиана	$\sigma$	min	max	Среднее	Медиана	$\sigma$	min	max			
$H_m$ , км	9,6	8,5	3,2	6	15	9,9	9,5	2,8	6	15	3	5	6
$S$ , км <sup>2</sup>	119,1	116	122,7	21	519	110,9	101	81,7	16	332	9	0	5
$H_{Z_m}$ , км	1,8	1,5	1	1	4	2,1	2	0,9	1	4	4	3	7
$Z_m$ , дБZ	50,8	49	49,8	40,5	55	51,5	51,7	50,1	44	56	3	2	9
$I_m$ , мм/ч	59,9	41,9	55	15	221	50	46,9	21,4	26,6	87	5	2	7
$F$ , м <sup>3</sup> /с	538	297	628	61,2	2388	510	380	444	56	1692	5	0	9

Из табл. 4.5 следует, что процесс слияния в большинстве случаев приводит к увеличению исследуемых характеристик ( $n_+ > n_-$  и  $n_+ > n_0$ ), за исключением площади облака. Среднее значение и медиана  $H_m$ ,  $H_{Z_m}$  и  $Z_m$  увеличились в ходе слияния, а для  $S$  уменьшились. Среднее значение интенсивности и потока осадков уменьшилось после слияния, при этом медиана увеличилась.

Рассмотрим нулевую ( $H_0$ ) и альтернативную ( $H_1$ ) гипотезы. Под нулевой гипотезой  $H_0$  понимается: медиана разности между значениями характеристик на 0 и 20 мин равна нулю. Альтернативная гипотеза  $H_1$ : медиана разности между значениями характеристик на 0 и 20 мин не равна нулю.

Из табл. 4.6, в которой представлены результаты расчета  $W$  критерия Вилкоксона для исследуемых параметров облаков, следует, что уровень значимости  $p$  для всех характеристик превышает принятый критический уровень 0,05. Таким образом, здесь нельзя принять альтернативную гипотезу, и мы остаемся в рамках гипотезы о том, что статистически обеспеченных изменений между 0 и 20 мин в рассматриваемых характеристиках нет. Хотя для значений  $Z_m$  и  $H_{Z_m}$  уровень  $p$  меньше 20%, то есть, можно утверждать с соответствующим уровнем значимости о наличии расхождений в этих характеристиках.

Из результатов статистической оценки изменения характеристик можно сделать вывод о том, что тенденция в их изменении в результате слияния есть, но, возможно, здесь не хватает чувствительности непараметрического критерия для выявления его значимости, другой причиной является недостаточная статистическая обеспеченность данными.

Таким образом, установлено, что после слияния облаков происходит увеличение медиан высоты верхней границы облаков на 18 %, высоты максимальной отражаемости — на 75 %, максимальной отражаемости в столбе атмосферы — на

3 %, максимальной интенсивности осадков — на 12 % и потока осадков — на 13 %. Зафиксировано уменьшение медианы площади облаков после слияния на 65 %. Статистическая значимость полученных результатов была проверена с помощью непараметрического критерия Вилкоксона. В ходе проверки не было обнаружено статистической значимости в изменении характеристик при уровне значимости  $p = 0,05$ .

*Таблица 4.6*

**Результаты проверки гипотезы о наличии расхождения между двумя выборками по  $W$  критерию Вилкоксона для исследуемых характеристик**

Характеристика	$H_m$	$S$	$H_{Z_m}$	$Z_m$	$I_m$	$F$
Уровень значимости $p$	0,5	0,8	0,2	0,1	0,7	0,5

## **ГЛАВА 5**

### **АКТИВНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ФИДЕРНЫЕ ОБЛАКА**

Во многих случаях воздействия на кучево-дождевые облака осуществляются опосредованно путем засева фидерных облаков, которые в дальнейшем сливаются с материнским облаком. Этот метод воздействия используется в работах по подавлению града: считается, что такого рода воздействия приводят к преждевременному формированию осадков. Для увеличения количества осадков из крупных Сб также обычно воздействуют на фидерные облака. Если работы проводятся с самолетов, то это обеспечивает бóльшую безопасность полетов по сравнению с воздействиями непосредственно на Сб.

Воздействия на фидерные облака, как и на любые облака вертикального развития, могут приводить к изменению направления и скорости их движения, а также к изменению движения кучево-дождевого облака, с которым они в дальнейшем сольются. Этот вопрос мало исследован, хотя имеет важное значение для практики активных воздействий.

В первой части настоящей главы приводятся полученные нами результаты по изучению закономерностей движения облаков. Вторая часть посвящена исследованию изменений характеристик кучево-дождевых облаков после слияния с фидерными облаками, на которые проводились воздействия.

#### **5.1. Влияние активных воздействий на движение кучево-дождевых облаков**

Изучение движения облаков после проведенных воздействий чрезвычайно важно, так как открывает новые возможности по регулированию осадков в случае, если можно целенаправленно менять траекторию облаков. Воздействия могут интенсифицировать развитие фидерных облаков, и это

может привести, вследствие их слияния с материнским облаком, к смещению Сб от прежней траектории движения. Нам удалось выполнить лишь отдельные эксперименты, где отмечались изменения в направлении движения кучево-дождевого облака за счет рассматриваемого эффекта. Ниже приводится описание двух таких случаев.

### 5.1.1. Эксперимент в Канаде

Представленные ниже результаты были получены в провинции Альберта (Канада) в 2005 г. в рамках проекта по предотвращению града [Krauss, Santos, 2004; Краус, Синькевич, 2008; Gilbert et al., 2016]. Полученные общие закономерности движения облаков представлены в главе 2.

Фидерные облака во время проведения экспериментов в Канаде, в основном, развивались в юго-восточной части Сб. Следовательно, можно ожидать некоторого смещения облаков преимущественно в южном направлении, которое будет стимулироваться воздействиями. Полагается, что воздействия стимулируют развитие облаков, то есть, происходит развитие фидерного облака. Оно сливается с материнским. Часто при этом процессе наблюдается разрушение основной ячейки кучево-дождевого облака, что приводит к смещению материнского облака после его слияния с фидерным в направлении расположения последнего.

Для исследования влияния активных воздействий на движение облаков были выбраны случаи, когда воздействия осуществлялись только в течение некоторого времени в процессе жизненного цикла облака с тем, чтобы сравнить углы  $\alpha$  во время воздействий ( $\alpha_{DS}$ ), а также в периоды времени до ( $\alpha_{BS}$ ) и после ( $\alpha_{AS}$ ) проведения воздействий (методика получения соответствующих углов представлена в главе 2). В общей сложности нам удалось проанализировать 5 таких

случаев. Сравнение средних значений выбранных углов и соответствующих медиан подтвердило вывод, полученный ранее, о некотором правом (в южном направлении) смещении движения облаков, однако сделать какие-либо выводы о влиянии воздействий не удалось. Очевидно, что для более уверенных выводов необходимо анализировать больше данных.

Аналогичным образом были проанализированы данные о длине вектора  $L$  (методика получения соответствующих длин векторов представлена в главе 2). Рассматривалось отношение текущего значения к среднему за все время наблюдений за облаком. Далее сравнивались средние этих отношений для периодов: 1) во время воздействий; 2) до проведения воздействий; 3) после проведения воздействий. Разброс полученных значений был весьма велик (в пределах от 0,7 до 1,3), что не позволило сделать каких-либо определенных выводов.

Однако ряд экспериментов указывает на то, что воздействия могут оказывать влияние на движение облаков. Ниже мы приводим описание наиболее интересного эксперимента, когда воздействие, возможно, изменило направление движения облака.

Рассмотрим облако, которое в главе 2 обозначено как 1105. Наблюдения за ним выполнялись в период 20 ч 35 мин — 00 ч 58 мин ВСВ. Это было мощное кучево-дождевое облако с вершиной, достигавшей высоты 10,5 км и отражаемостью — 61,5 дБЗ.

Воздействия проводилось в период с 23 ч 00 мин до 00 ч 23 мин: первоначально одним самолетом осуществлялись воздействия в верхней части облака (23 ч 00 мин — 23 ч 56 мин), далее — двумя самолетами одновременно в верхней части облака и под его основанием (23 ч 56 мин — 00 ч 23 мин).

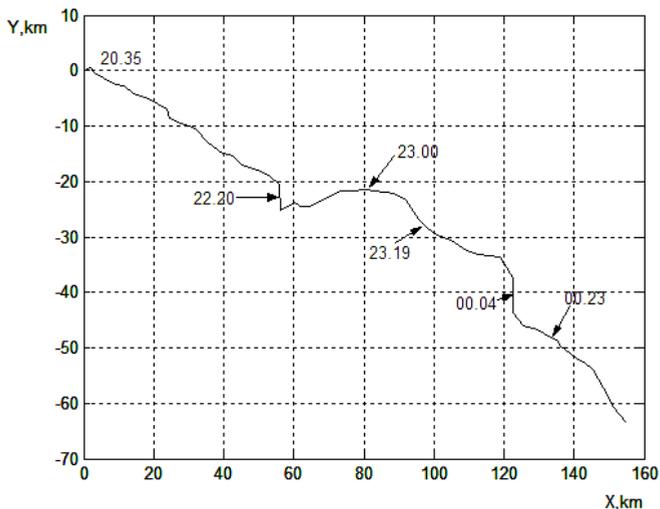


Рис. 5.1. Траектория движения облака 1105.

Траектория движения облака приведена на рис. 5.1. Видно, что во время первой трети траектории движение было достаточно прямолинейным. Основная ячейка распалась на две в 22 ч 20 мин, в 22 ч 24 мин имело место слияние ячеек. Эти изменения в структуре С<sub>б</sub> привели к изменению направления движения – произошло смещение облака на восток. Слияние ячеек отмечалось также в 23 ч 19 мин, однако это слияние не привело к каким-либо заметным изменениям в направлении движения. Существенные изменения произошли в 00 ч 04 мин, когда наблюдалось слияние ячеек. В это время оба самолета проводили воздействия. Появление новой ячейки на юге от основной в 23 ч 59 мин могло являться результатом воздействий на фидерные облака (С<sub>и</sub> song). Эта новая ячейка слилась с основной, что привело к непреднамеренному изменению в движении С<sub>б</sub> по направлению к городу Иненсфэйл. Из облака отмечались настолько интенсивные осадки (в том числе, град), что в городе произошло наводнение. Воздействия были

прекращены в 00 ч 23 мин, в это время уже не наблюдалось существенных изменений в движении облака.

На следующем рисунке представлена зависимость угла  $\alpha$  от времени. Флуктуации угла весьма значительны ( $-90 \div +20^\circ$ ), что объяснимо, учитывая, что положение облака аппроксимируется одной точкой в пространстве. Тем не менее, два события в жизненном цикле облака, которые имели место в 22 ч 20 мин и 00 ч 04 мин (слияние ячеек), хорошо видны. Анализ рисунка в период проведения воздействий (23 ч 00 мин — 00 ч 23 мин) не позволяет сделать каких-либо заключений о влиянии воздействий на  $\alpha$ . Линия тренда указывает на смещение облака в южном направлении (вправо) от прямолинейного движения.

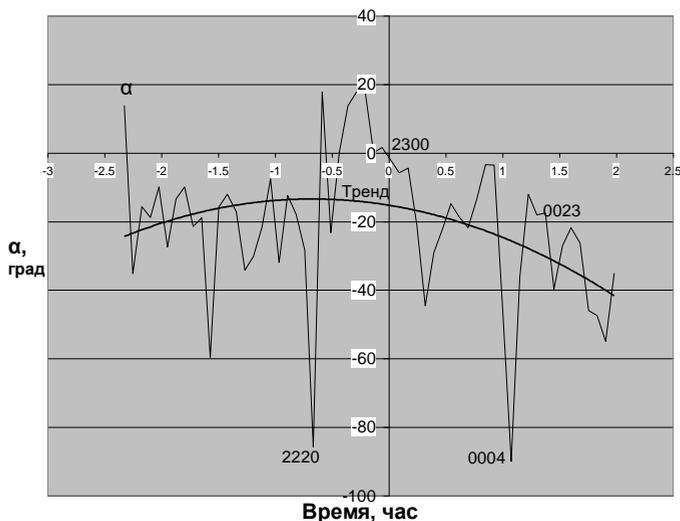


Рис. 5.2. Зависимость угла  $\alpha$  от времени (облако 1105, ось абсцисс — время относительно 23 ч).

Для подтверждения выводов, сделанных выше, нами проведен статистический анализ полученных данных. Сформированы 3 группы углов  $\alpha$ :  $\alpha_{DS}$ ,  $\alpha_{BS}$ ,  $\alpha_{AS}$ . Результаты статистического анализа представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

**Результаты статистического анализа углов**  
 $\alpha_{BS}$ ,  $\alpha_{DS}$ ,  $\alpha_{AS}$  и длин векторов  $L_{BS}$ ,  $L_{DS}$ ,  $L_{AS}$

Угол	$N$	Среднее	Медиана	Min	Max	$\sigma$
$\alpha_{BS}$	31	-15,6	-15,8	-85,7	18,2	22,0
$\alpha_{DS}$	19	-22,3	-18,0	-89,9	-1,9	20,8
$\alpha_{AS}$	8	-37,2	-37,3	-54,9	-21,8	11,7
$L_{BS}$	31	2,9	2,7	1,4	4,7	0,8
$L_{DS}$	19	3,5	3,2	2,4	6,4	1,0
$L_{AS}$	8	3,1	2,7	1,6	4,7	1,2

-----  
 $N$  — число сканов,  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение от среднего,  $L_{DS}$ ,  $L_{BS}$ ,  $L_{AS}$  — длина вектора  $\mathbf{L}$  во время воздействий, а также в период времени до и после проведения воздействий соответственно.

Из табл. 5.1 нельзя сделать выводов о каком-либо влиянии воздействий на движение облака. Тренд в угле  $\alpha$  хорошо просматривается из данных о среднем угле и медиане. Стандартное отклонение для периода времени после окончания воздействий оказалось примерно в 2 раза меньше, чем в другие периоды существования облака, что может быть связано с постепенным ослаблением процессов, связанных с формированием новых ячеек и их слиянием с основной (это, очевидно, уменьшает разброс  $\alpha$ ).

Анализ временной зависимости длины вектора  $\mathbf{L}$  ( $L$ ) показал следующее. Флуктуации весьма существенны. Заметные изменения в длине вектора отмечались во время слияния ячеек в 22 ч 20 мин и 00 ч 04 мин. Отмечается также тренд в значениях  $L$ , который указывает на их увеличение со временем, что указывает на увеличение скорости перемещения облака.

Был выполнен статистический анализ  $L$ , аналогичный тому, который был сделан для угла вектора. Результаты приведены в табл. 5.2.

Из таблицы следует, что в период проведения воздействий отмечается увеличение среднего значения и медианы длины вектора, что указывает на увеличение скорости перемещения облака. Этот результат представляется достаточно интересным, но он, безусловно, требует дальнейшей проверки на большем статистическом материале.

Здесь надо сделать и еще одно замечание по поводу приведенного эксперимента. Полученные здесь данные в принципе указывают на возможность проведения воздействий с целью изменения направления движения облака путем воздействий на фидерные облака. Однако следует помнить, что эти данные получены с помощью радиолокатора, и здесь может формироваться ошибочное представление о том, что прослеживается одно облако, хотя в реальности это могут быть разные облака, достаточно близко расположенные, которые автоматизированная программа ассоциирует с одним. Это может приводить к неверным выводам. Тем не менее, результат, полученный в данном эксперименте, интересен и стимулирует проведение дальнейших исследований в данном направлении.

### 5.1.2. Эксперимент в Индии

Авторами выполнен детальный анализ развития кучево-дождевого облака, на которое проводились воздействия с целью увеличения осадков, в центральной Индии. В процессе исследований оно достигло громадных размеров, высота его верхней границы  $H_{вг}$  превосходила 18 км. Детальные результаты приведены в статьях [Краус и др., 2007; Синькевич и др., 2009]. Здесь мы приведем краткое описание развития облака с данными о его движении.

Первое радиоэхо от исследуемого облака было зарегистрировано в 06 ч 52 мин ВСВ на расстоянии 45 км по азимуту  $15^\circ$  от радиолокатора.  $H_{вг}$  составляла 4 км. Одновременно наблюдалось развитие мощных кучевых облаков рядом с исследуемым. Его развитие в значительной степени определялось процессами слияния с фидерными облаками.

К 08 ч 57 мин сформировалось мультячейковое облако, вытянутое в направлении на северо-запад. Его вершина достигла 18 км, а зона повышенной отражаемости фиксировалась на высоте 2—6 км.

В 09 ч 09 мин начались воздействия с самолета на фидерные облака (Cu cong), располагающиеся к юго-западу от исследуемого облака. Линия полета самолета хорошо видна на рис. 5.3а. Во время первого прохода самолета регистрировались восходящие потоки со скоростью до 12 м/с, пилоты отмечали высокую влажность, отмечалось обледенение самолета. Исследуемое облако находилось на стадии грозы, экипажем самолета были зарегистрированы разряды в виде молний. Второй проход выполнялся с обратным курсом (через 5 мин после первого) по направлению на северо-запад вдоль исследуемого облака. Воздействия на фидерные облака продолжались по мере их пересечения.

Здесь произошли существенные изменения в расположении облака. Пилоты отметили, что не было возможности продолжать полет в северо-западном направлении, так как исследуемое облако приобрело Г-образную форму, его северная часть стала распространяться в юго-западном направлении. Очевидно, что изменение направления движения было связано с быстрым развитием фидерных облаков, на которые проводилось воздействие во время первого прохода самолета с последующим слиянием с основным облаком. Это достаточно хорошо видно на рис. 5.3б. При этом следует отметить, что движение поля облаков в целом имело северо-западное направление. Во время

второго прохода пилоты отметили наличие крупы в облаках. Эта новая ячейка, вытянутая в юго-западном направлении, имела высокую отражаемость, а ее верхняя граница достигала 18 км (рис. 5.3г).

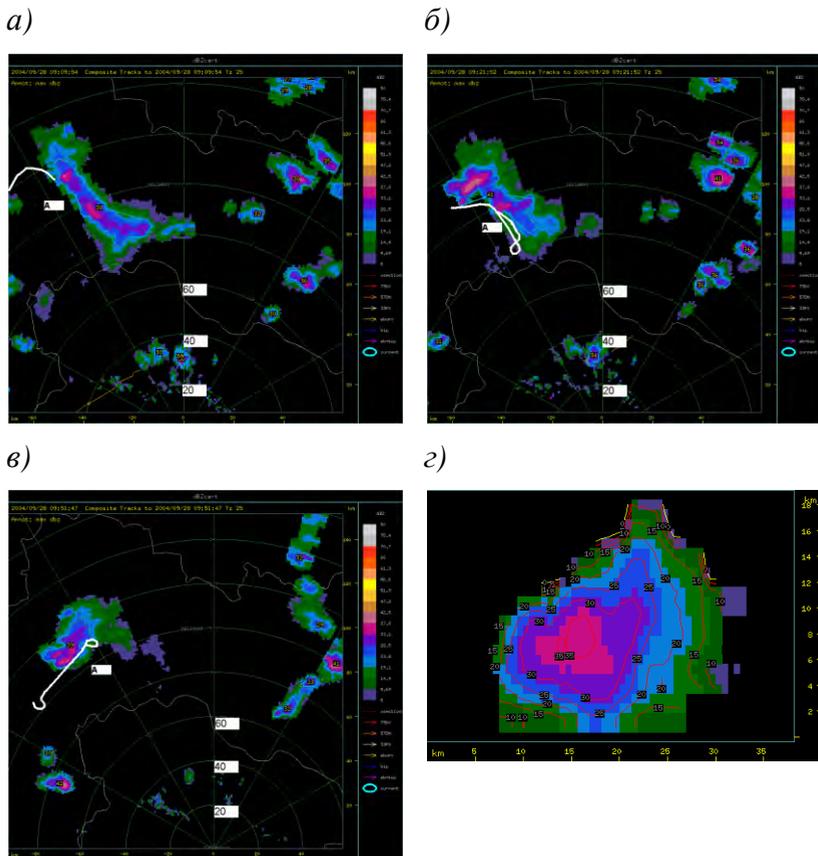


Рис. 5.3. Проекция максимальных значений отражаемости облака (дБZ) на подстилающую поверхность (а, б, в), вертикальное сечение облака по направлению запад-восток (г).

Исследуемое облако обозначено буквой А,  
 трасса полета самолета показана светлой линией;  
 а — 09 ч 09 мин; б — 09 ч 21 мин; в — 09 ч 51 мин.

Последующие воздействия в течение 30 мин способствовали распространению облака по-прежнему в юго-западном направлении (рис. 5.3в).

Такое распространение облака продолжалось до 10 ч 09 мин, когда самолет изменил место воздействия, которое теперь располагалось на северо-западе относительно облака. После этого оно изменило свое направление распространения еще раз на северо-западное.

Воздействия были прекращены в 11 ч 15 мин. За время воздействий (2 ч) было израсходовано 3 самолетных аэрозольных генератора и 163 отстреливаемых патрона, в общей сложности 3,7 кг кристаллизующего реагента.

## **5.2. Изменения характеристик кучево-дождевых облаков при слиянии с фидерными, подвергнутыми воздействиям**

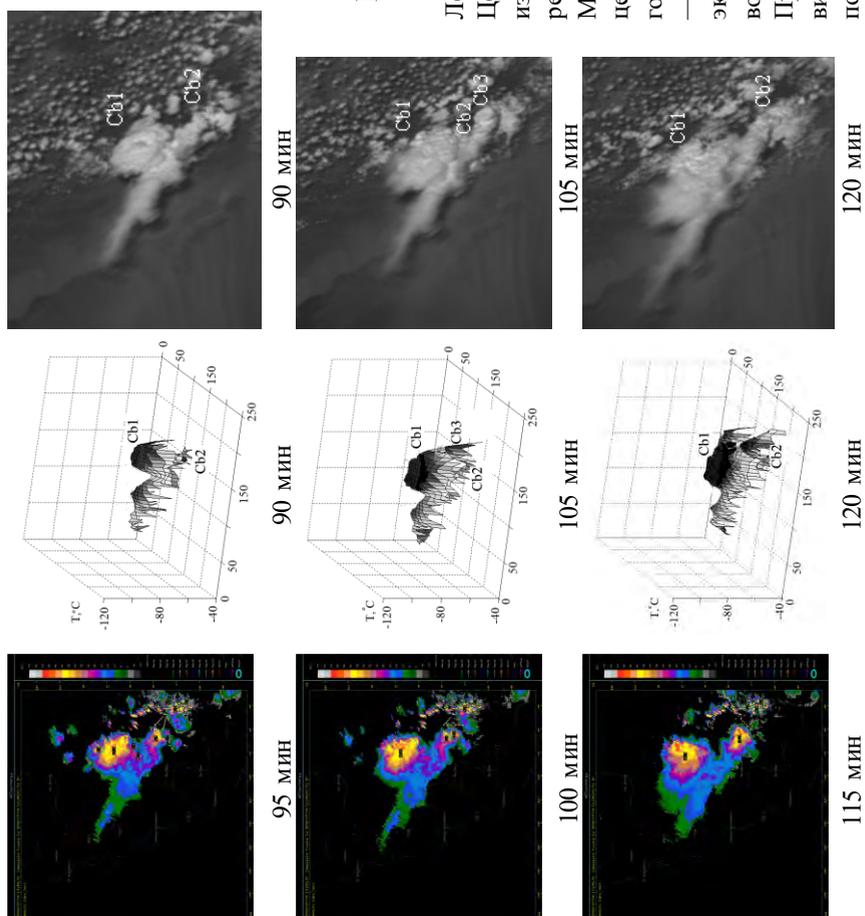
### **5.2.1. Эксперимент в Саудовской Аравии**

Здесь рассматривается случай развития кучево-дождевого облака в Саудовской Аравии, когда отмечалось последовательно несколько слияний с фидерными облаками; при этом на одно из них были проведены воздействия кристаллизующим реагентом [Краус и др., 2011а].

Развитие исследуемого облака было тесно связано с формированием мощного тропического кучево-дождевого облака, которое впервые было зарегистрировано в 09 ч 00 мин ВСВ. Система вторичной обработки радиолокационной информации ТИТАН выделила это облако в самостоятельную ячейку в 09 ч 10 мин. Для удобства анализа мы примем это время за нулевой отсчет. Облако быстро развивалось, его верхняя граница достигла 14 км на 25 мин развития. На 35 мин

оно начало формировать наковальню (назовем это облако Сb1). На 50 мин на юго-западном крае радиоэха появилась новая ячейка (это облако назовем Сb2). Она быстро развивалась, система ТИТАН выделила ее в отдельную ячейку на 80 мин. Ее верхняя граница находилась на высоте 11,1 км. Здесь интересно отметить особенности движения облаков. Во время появления Сb2 оно располагалось в непосредственной близости от Сb1, однако затем по мере своего развития облака (радиоэха) начали двигаться в противоположном направлении, постепенно удаляясь друг от друга. Далее  $H_{\text{вг}}$  исследуемого облака (Сb2) начала понижаться и составила 7,4 км на 100 мин. На юго-востоке от исследуемого кучево-дождевого облака (Сb2) располагалось мощное кучевое (фидерное) облако, отражаемость которого была невелика и радиоэхо от него отсутствовало. На 85 мин начались самолетные воздействия на это облако. Пилоты отметили высокую водность в нем, восходящий поток достигал 7 м/с (рис. 5.4). Облако стало быстро развиваться. Оно слилось с Сb2 на 115 мин (рис. 5.4).

Интересно проследить за этими процессами, используя данные зондирования со спутника Метеосат. В качестве примера мы приводим трехмерные изображения формирования наковальни исследуемого кучево-дождевого облака в период 90—120 мин (рис 5.4). Они были построены по результатам зондирования спутником Метеосат 9 в окне прозрачности с центром 10,8 мкм. К наковальне была отнесена часть облака, температура в пикселях которой была ниже  $-40^{\circ}\text{C}$ . Из представленных изображений хорошо видно расположение наковален Сb1 и Сb2. Первое кучево-дождевое облако в своем вертикальном развитии достигло задерживающего слоя вблизи изотермы  $-83^{\circ}\text{C}$  и сформировало обширную наковальню, имеющую приблизительно круговую форму над облаком, а также часть, вытянутую в направлении ведущего потока.



**Рис. 5.4. Изображения облаков в разные моменты времени.**

Левая колонка — радиоэхо.  
 Центральная колонка — трехмерное изображение, полученное из результатов зондирования спутника Метеосат в окне прозрачности с центром 10,8 мкм (цифры на горизонтальной плоскости — км), Cb3 — новая ячейка, которая появилась на экране радиолокатора после воздействия, она далее слилась с Cb2. Правая колонка — изображение в видимом диапазоне спектра, полученное со спутника Метеосат.

Из рисунка следует, что радиационная температура вдоль наковальни имеет заметные колебания, что, видимо, связано с изменениями ее оптической плотности. Сb2 также сформировало протяженную относительно узкую наковальню, вытянутую вдоль ведущего потока, которая примыкает к наковальне от Сb1.

После воздействия происходит заметный вертикальный рост новой фидерной ячейки, ее высота достигает 16 км, в ее верхней части начинает активно формироваться наковальня (рис. 5.4). На 120 мин вершина облака четко видна на представленном трехмерном изображении, облако достигло максимума в своем вертикальном развитии, и продолжается формирование наковальни.

Изображения облаков в видимом диапазоне спектра (рис. 5.4) подтверждают полученные выше выводы. Хорошо видна наковальня, сформированная исследованными облаками. Она вытянулась от горного массива к побережью Красного моря. На 105 мин заметно существенное развитие в вертикальном направлении кучево-дождевого облака Сb3, примыкающего к Сb2. На 120 мин наблюдается их слияние.

Далее началось повторное понижение  $H_{вг}$ , которая уменьшилась до 8,9 км на 130 мин развития. В это время снова начали проводиться воздействия на мощные кучевые облака, расположенные на юго-востоке от исследуемого Сb2 (Сb2+Сb3). Они проводились в течение 30 мин. Возможным результатом этих воздействий явилось образование двух новых радиоэхо на юго-востоке от исследуемого облака. На 160 мин система ТИТАН выделила их в отдельные ячейки с  $H_{вг}$ , равной 5,1 и 7,4 км. В это время  $H_{вг}$  Сb2 равнялась 8,2 км. Эти облака последовательно слились с ним. Верхняя граница исследуемого облака вновь увеличилась, достигнув 11,9 км на 180 мин. К этому времени начался процесс разрушения наковальни. Далее исследуемое облако начало разрушаться и исчезло с

экранов радиолокатора на 220 мин, его наковальня прослеживалась до 285 мин.

В процессе развития Сb<sub>2</sub> по радиолокационным измерениям наблюдалось его слияние с фидерными облаками 4 раза на 105, 145, 165, 185 мин развития. В трех случаях слияния были с облаками, на которые были проведены воздействия, и в одном случае (на 145 мин) с естественно развивающимся Сu cong.

Для исследования динамики характеристик кучево-дождевого облака была применена следующая методика: анализировались относительные изменения характеристик облака, полученные с использованием радиолокационных данных. За нулевой отсчет для каждого процесса слияния был выбран скан радиолокатора, предшествующий слиянию. Далее, после слияния, анализировалось еще 2 скана, то есть, в целом — период в 20 мин. Все характеристики нормировались по соответствующему значению характеристики «нулевого» скана. Результаты такого анализа приведены на рис. 5.5.

Во всех рассмотренных случаях слияния верхняя граница облака возрастает, при этом возрастание существенно различно и составляет от 20 до 200 %. Наибольшее значение было зарегистрировано во время первого из рассмотренных случаев, когда фидерное облако после воздействия начало стремительно развиваться, увеличивая свои горизонтальные размеры и вертикальную протяженность. Воздействие на это Сu cong было проведено на 90 мин. В это время отражаемость облака была мала, составляя 1 дБZ,  $H_{вг}$  была примерно равна 7 км. Развитие облака ограничивалось мощным инверсионным слоем. На 95 мин отражаемость составила 30 дБZ. Верхняя граница уже находилась на высоте 11,5 км. Можно полагать, что вследствие искусственной кристаллизации выделилось достаточное количество скрытой теплоты для того, чтобы вершина облака смогла проникнуть через зону инверсии и быстро подняться над ней.

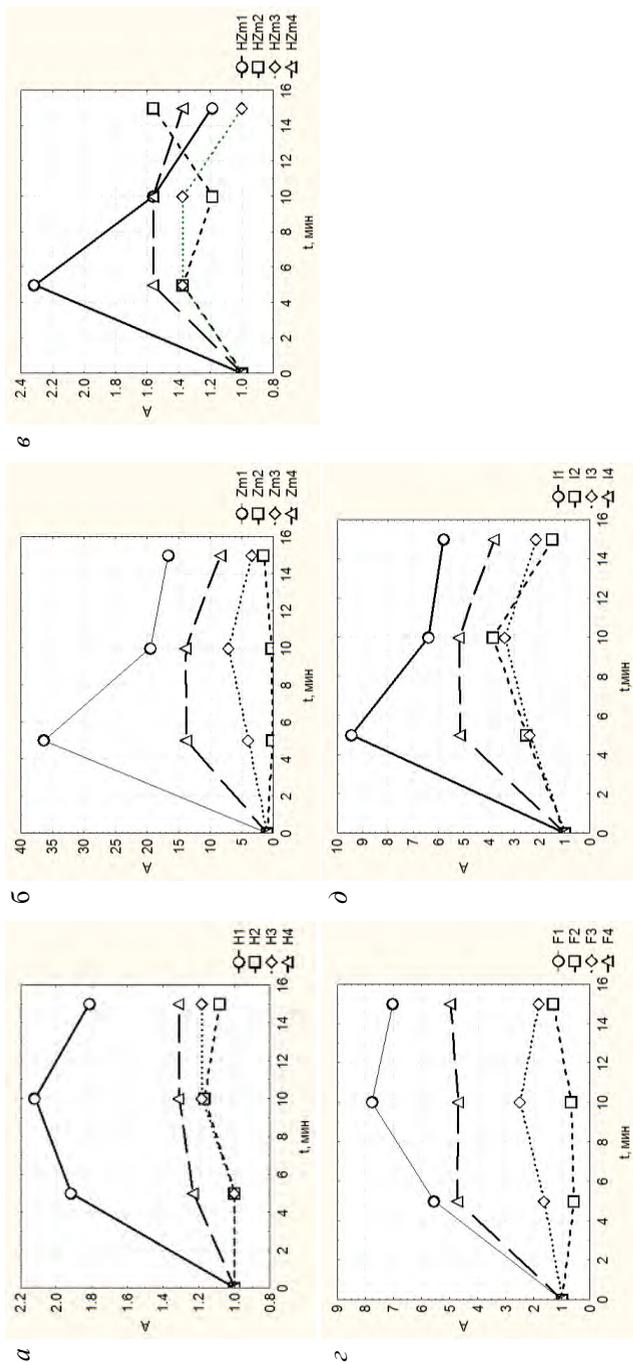


Рис. 5.5. Зависимость относительных характеристик кучево-дождевого облака А (нормированных на соответствующее значение перед слиянием) после слияния с фидерными облаками от времени.

*а* — высота верхней границы облака, *б* — отражаемость облака, *в* — высота расположения максимального значения радиолокационной отражаемости, *г* — поток осадков, *д* — интенсивность осадков. Кривые характеризуют изменения характеристик при слиянии следующих облаков:

1 — Cb2 с Cb3, 2 — Cb2 с Cb4, 3 — Cb2 с Cb5, 4 — Cb2 с Cb6.

Такое развитие называют взрывным ростом, что и наблюдалось в данном случае. На 100 мин верхняя граница Сб достигла высоты 13,4 км.

Скорость роста вершины составила 10 м/с. В остальных случаях фидерные облака также располагались под инверсионным слоем, но их развитие не было столь быстрым.

Максимальная отражаемость облаков также возрастает во всех случаях, когда проводились воздействия. Это возрастание меняется от 7 до 37 раз, указывая на появление крупных частиц в облаке, что сказывается естественно на процессе осадкообразования. В случае слияния с фидерным облаком, на которое воздействие не проводилось, наблюдается некоторое уменьшение максимальной отражаемости.

Увеличение высоты расположения зоны максимальной отражаемости указывает на появление и рост крупных частиц, то есть, интенсификацию процесса осадкообразования. Поток осадков также существенно возрастает после слияния кучево-дождевого облака с мощными кучевыми, на которые проводились воздействия. Это возрастание достигает 200—800 % (рис. 5.5). Важно отметить и увеличение интенсивности осадков во всех случаях слияния фидерных облаков с кучево-дождевым. Это увеличение достигает 300—900 %.

Приведенные данные показывают значительное влияние процесса слияния фидерных облаков с кучево-дождевым на характеристики последнего. Результатом этого процесса является существенное усиление осадков. Полученные экспериментальные данные также демонстрируют в принципе достаточно высокую эффективность воздействий, что проявляется в увеличении интенсивности осадков в рассмотренных конкретных метеорологических условиях. Количественные оценки изменения осадков носят, безусловно,

оценочный характер, что связано с существенными погрешностями измерений.

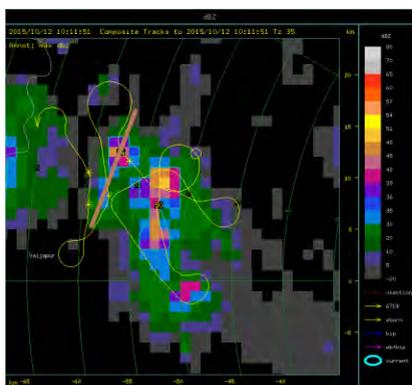
### 5.2.2. Эксперимент в Индии

Слияние облаков наблюдается не только в случае, когда они перешли в стадию кучево-дождевых, но и на стадии мощных кучевых, когда их размеры не очень велики. Один из таких случаев нами наблюдался в центральной Индии, где выполнялись самолетные воздействия на облака с целью усиления осадков [Синькевич и др., 2018].

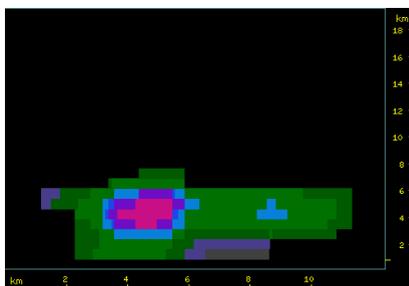
Процесс слияния облаков иллюстрируется на рис. 5.6. Здесь представлена проекция максимальных значений отражаемости на подстилающую поверхность для четырех моментов времени и вертикальное радиолокационное сечение в направлении северо-восток — юго-запад.

В 10 ч 11 мин ВСВ материнское облако имело область высокой отражаемости на высоте около 4,5 км (на горизонтальном радиолокационном сечении располагается выше фидерного). Фидерное облако находилось в стадии развития, его отражаемость была мала и составляла 36 дБZ (здесь понятия материнского и фидерного облаков весьма условны).

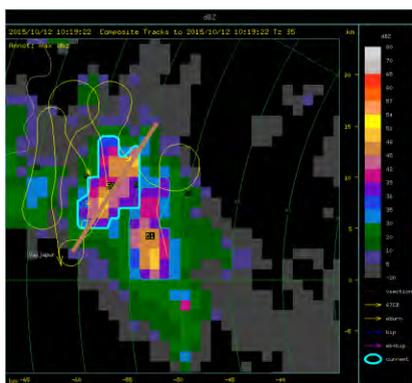
В следующий момент времени, соответствующий скану радиолокатора в 10 ч 19 мин, программа Титан объединила эти два облака в одно, при этом, как следует из радиолокационного разреза, начался фактический процесс объединения облаков. Видно появление зоны осадков в нижней части материнского облака и увеличение отражаемости фидерного облака на высотах 4—6 км. Самолет пересек вершину этого слившегося облака, в спектре капель были обнаружены частицы размером 25 мкм. Наличие таких крупных частиц вблизи вершины облака также указывает на формирование осадков вследствие действия коагуляционного механизма укрупнения облачных частиц.



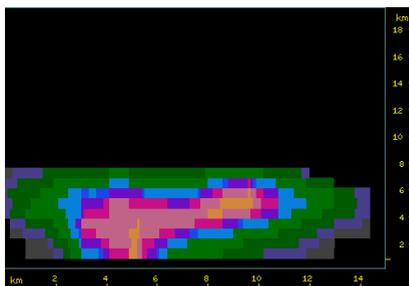
10 ч 11 мин



10 ч 11 мин



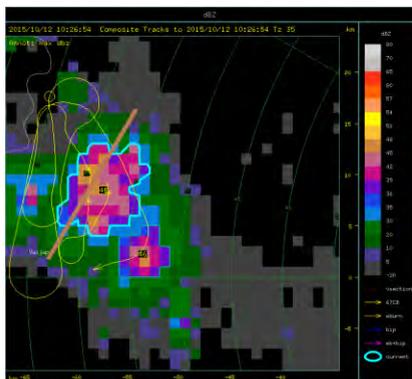
10 ч 19 мин



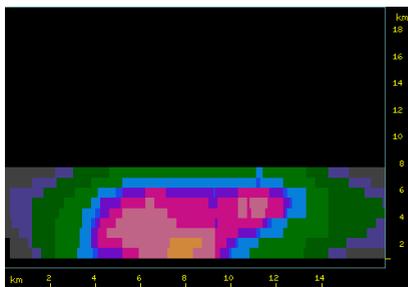
10 ч 19 мин

Рис 5.6. Проекция максимальных значений отражаемости на подстилающую поверхность для четырех моментов времени (левая колонка) и вертикальное радиолокационное сечение в направлении северо-восток – юго-запад (правая колонка)

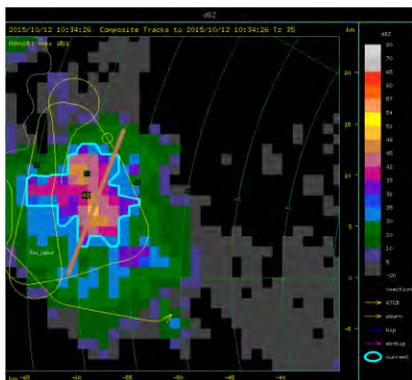
Коричневая линия — направление сечения,  
 сплошная желтая линия — трасса полета самолета,  
 звездочки — места воздействия.



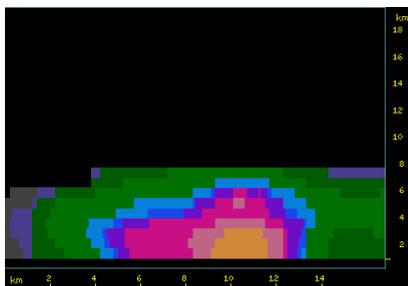
10 ч 26 мин



10 ч 26 мин



10 ч 34 мин



10 ч 34 мин

Рис 5.6. (продолжение)

В 10 ч 26 мин сформировалось уже одно облако, включавшее оба слившихся. Процесс объединения окончательно завершился к 10 ч 34 мин. Заметно существенное увеличение протяженности зоны осадков в нижней части облака.

Рассмотрим, как менялись характеристики облака в результате его слияния с фидерным. Этот случай отличается от ранее рассмотренных нами тем, что перед слиянием на оба облака — материнское и фидерное — были проведены воздействия.

Таблица 5.2

**Характеристики материнского облака  
в разные периоды времени**

Время	$F$ , м <sup>3</sup> /с	$I$ , мм/час	$H_{\text{ниг}}$ , км	$H_{\text{вг}}$ , км	$Z_{\text{м}}$ , дБZ	$H_{Z_{\text{м}}}$ , км	$M_{\text{н}}$ , кг/м <sup>2</sup>	Масса, кг
09:49	—	—	—	6	23	5	—	—
09:56	—	—	—	6	33	4	—	—
10:04	—	—	—	8	41	4	—	—
10:11	25	0	1,6	8	46	4,3	0,7	10
10:19	170	68	0,9	8	49,5	5	7	84
10:26	230	24	0,9	8,4	47,7	5,7	5,7	142
10:34	228	19	0,9	8	48,5	2	4,1	140

Цветом выделен момент слияния облаков.  $H_{\text{ниг}}$  — высота нижней границы облака.

Характеристики материнского облака в разные периоды времени представлены в табл. 5.2. По мере развития облака от 09 ч 49 мин до момента слияния 10 ч 19 мин (выделено цветом в таблице), происходило увеличение максимальной отражаемости от облака  $Z$  от 23 до 49,5 дБZ, далее значение максимальной отражаемости уменьшилось. Осадки в облаке появились в 10 ч 11 мин, но их интенсивность  $I$  была очень мала, соответственно был невелик и поток осадков  $F$ , значение которого было равно 25 м<sup>3</sup>/с. Слияние облаков привело к существенному увеличению осадков. Интенсивность осадков по радиолокационным измерениям достигла максимума и была равна 68 мм/час. Существенно увеличился поток осадков – в 6,8 раза. Это произошло как за счет увеличения интенсивности осадков, так и за счет увеличения площади, занимаемой осадками, что видно из радиолокационного сечения. Своего максимального значения поток осадков достиг через 7 мин, его

величина была равна  $230 \text{ м}^3/\text{с}$ . На следующем скане радиолокатора эта величина практически не изменилась, хотя интенсивность осадков уменьшилась до  $19,5 \text{ мм/ч}$ .

Приведенная масса осажденного града  $M_h$  существенно увеличилась (в 10 раз) после слияния облаков в 10 ч 19 мин, что также могло являться следствием увеличения количества и размеров кристаллов при воздействии. На следующем скане радиолокатора началось ее постепенное уменьшение.

Изменения массы облака  $M$ , полученной из данных программы вторичной обработки радиолокационной информации Титан, отражают процесс объединения облаков. После слияния облаков в 10 ч 19 мин масса объединенного облака увеличилась примерно в 8 раз от 10 до 84 кг. На следующем скане радиолокатора увеличение массы продолжалось, она достигла 142 кг в 10 ч 26 мин.

Высота зоны максимальной отражаемости  $H_{Z_m}$  составляла 4—6 км, на протяжении жизни облака она уменьшилась до 2 км к 10 ч 34 мин, и, видимо, была связана с выпадающими осадками.

Таким образом, в данном эксперименте отмечалось существенное усиление конвекции и осадков, что может являться следствием слияния облаков весьма ограниченной вертикальной протяженности.

### **5.3. Статистический анализ изменений характеристик кучево-дождевых облаков Саудовской Аравии при воздействиях на фидерные облака**

Физическая причина возможных различий в характеристиках кучево-дождевых облаков, находящихся в естественном цикле развития и после воздействий, связана с тем, что в результате воздействий на фидерные облака в них

появляется дополнительное количество кристаллов, что в дальнейшем резко меняет микроструктуру облака и сказывается на его динамических свойствах. Нами было ранее показано, что частицы осадков обычно появляются уже через 10—15 мин после воздействий [Бекряев и др. 1987, Краус и др, 2006, Синькевич, 2001].

Сложность статистической оценки связана с тем, что облака (кучево-дождевое и фидерное), формирующие группу естественного развития и группу с воздействиями различаются между собой. Это фундаментальная проблема в оценке эффективности воздействий. В нашем случае, эта проблема усугубляется тем фактом, что в обеих группах имеются пары облаков, которые по своим характеристикам различаются. Нами ранее был разработан соответствующий подход, когда по радиолокационным данным оценивались результаты воздействий на Cu cong [Краус, 2006, Синькевич, Краус, 2007, Krauss, Sinkevich, Ghulam, 2010]. Этот подход состоял в том, чтобы на начальном этапе анализа провести фильтрацию имеющихся массивов данных с тем, чтобы в группе без воздействий и с воздействиями оказывались облака с примерно одинаковыми начальными характеристиками. Аналогичный подход был реализован и здесь.

Основной характеристикой для отбора примерно одинаковых облаков была выбрана масса облака. Для анализа данных были использованы все случаи, когда проводились воздействия на фидерные облака (группа *s*). Выбор облаков в группе *Sb*, где слияние происходило с фидерными облаками в естественном цикле развития, осуществлялось следующим образом. Для каждого кучево-дождевого облака из группы *s* подбирались пара кучево-дождевых облаков из группы, где слияние происходило с фидерными облаками в естественном цикле развития, с массой больше и меньше массы соответствующего облака. Таким образом, была сформирована

группа  $n$ , т.е. группа облаков в естественном цикле развития. В ряде случаев, когда в группе с воздействиями массы облаков были близки между собой, не было облаков с промежуточной массой в группе кучево-дождевых облаков, находящихся в естественном цикле развития. Соответственно, уменьшалось количество облаков в группе  $n$ . В результате такой фильтрации была сформирована группа облаков  $n$  — кучево-дождевые облака, которые сливались с фидерными облаками в естественном цикле развития, и те, которые имели близкие массы с облаками из группы  $s$ . В итоге численность групп  $s$  и  $n$  составила 15 и 21 облако соответственно.

Зависимость характеристик сформированных групп кучево-дождевых облаков от времени приведена на рис. 5.7. Здесь показано изменение во времени медианных значений, анализируемых характеристик кучево-дождевых облаков для случаев слияния с фидерными облаками в естественном цикле развития ( $n$ ) и для случаев слияния с фидерными облаками, подвергнутыми воздействию ( $s$ ). Помимо этого, представлен диапазон значений характеристик по уровню повторяемости 10—90 %.

В обеих группах кучево-дождевые облака развивались. Увеличение высоты верхней границы в группе  $n$  в период времени с  $-10$  по  $0$  мин составило  $0,7$  км, а в группе  $s$  —  $0,5$  км. Слияние не оказало заметного влияния на тренд высоты верхней границы, продолжалось увеличение высоты верхней границы в обеих группах. Можно также отметить, что высота верхней границы естественно развивающихся облаков была несколько выше, чем соответствующая высота облаков, которые сливались с фидерными облаками, подвергнутыми воздействиям.

Медианное значение  $Z_m$  в группе  $n$  в период времени с  $-10$  по  $0$  мин увеличилось на  $2,5$  дБZ, соответствующее значение в группе  $s$  уменьшилось на  $5$  дБZ.

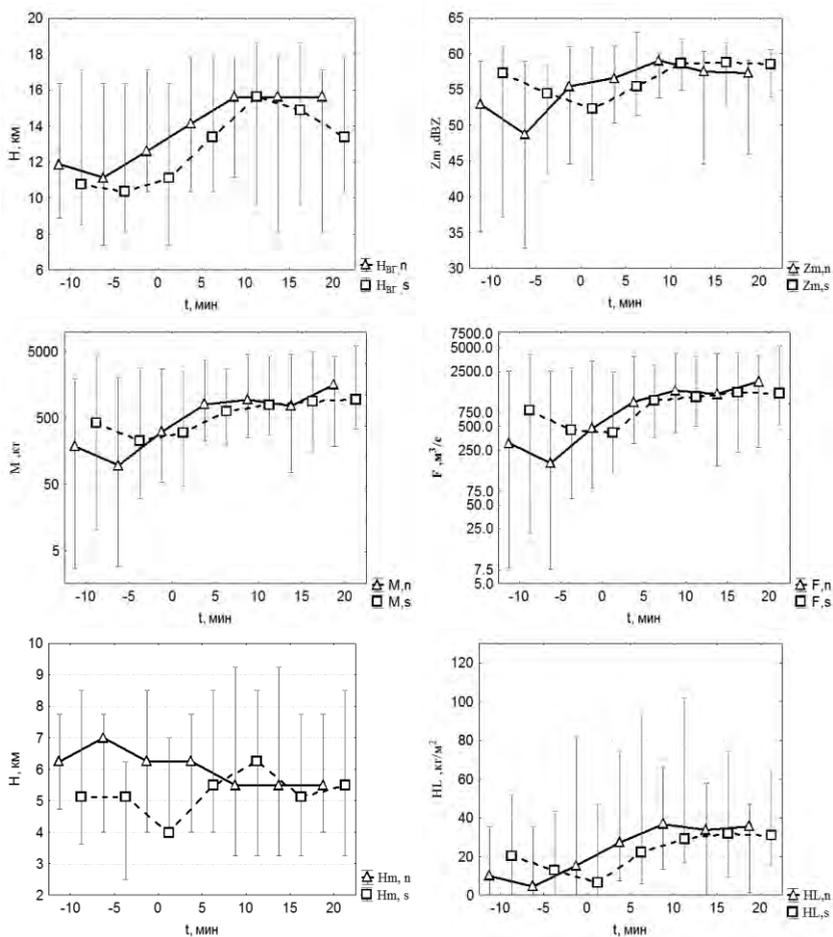


Рис. 5.7. Зависимость характеристик кучево-дождевых облаков от времени для случаев слияния с естественно развивающимися фидерными облаками ( $n$ ) и случаев слияния с фидерными облаками, подвергнутыми воздействию ( $s$ ).

Медианное значение в распределении характеристики — треугольник или квадрат, диапазон значений характеристик по уровню повторяемости 10—90% — вертикальная линия,  
 $t = 0$  мин — время скана перед слиянием облаков.

Слияние привело к тому, что тренд хода  $Z_m$  в группе  $s$  изменился на противоположный, к 10 мин это значение увеличилось на 6,6 дБZ. Высота уровня максимальной отражаемости была заметно меньше в группе  $s$ , она существенно увеличилась после слияния. Это увеличение составило 2,2 км в период 0—10 мин. Это может быть связано с тем, что в фидерных облаках, на которые было проведено воздействие, высота расположения уровня максимальной отражаемости была больше, что может быть объяснено эффектом воздействия. Реагент вводился в верхнюю часть фидерных облаков.

Зависимости медианного значения массы от времени очень близки в обеих группах. Наблюдается некоторое уменьшение соответствующих характеристик в течение первых 5 мин, но затем массы начинают увеличиваться. Заметное увеличение происходит и сразу после слияния, но различий между группами не отмечается.

Поток осадков уменьшался в период с  $-10$  по  $-5$  мин, его существенное увеличение наблюдалось после слияния облаков с фидерными (в период между 0 и 5 мин он увеличился в обеих группах на 630—640 м<sup>3</sup>/с). Важно также отметить существенное увеличение приведенной массы града после слияния, но заметной разницы этой характеристики между группами не отмечено.

Таким образом, выполненный анализ показал, что максимальная отражаемость облака наиболее сильно реагирует на воздействия, которые проводились на фидерные облака. Ее увеличение и увеличение высоты расположения области максимальной отражаемости могли быть следствием проведенных воздействий. Однако, в целом, различия между группами не очень большие и находятся в пределах естественных вариаций исследуемых характеристик, разброс которых достаточно велик.

Для сравнения фидерных облаков в момент времени непосредственно перед слиянием представлена табл. 5.3, где приводятся основные статистические характеристики групп фидерных облаков, которые развивались естественно и после воздействий. Видно, что высота верхней границы и максимальная отражаемость мало различаются. Медианное значение массы облаков из группы с воздействиями оказалась меньше, чем для группы без воздействий, среднее значение массы имеет обратную зависимость. Это означает, что в группе с воздействиями было больше менее развитых облаков, чем в группе без воздействий, при этом было несколько весьма мощных облаков, наличие которых сказалось на величине средней массы. На это же указывает и величина потока осадков в обеих группах. Высота расположения зоны максимальной отражаемости оказалась выше в группе с воздействиями, что могло быть следствием соответствующих воздействий на фидерные облака. Содержание градовых частиц  $M_h$  в естественно развивающихся фидерных облаках было выше, чем в облаках после воздействий. Все это указывает на то, что в группе с воздействиями оказались в основном фидерные облака менее развитые, чем соответствующие облака в естественном цикле развития.

Резюмируя сказанное, можно отметить, что в целом происходило развитие кучево-дождевых облаков до момента слияния с фидерными в группе без воздействий и разрушение кучево-дождевых облаков в группе, которая в дальнейшем сливалась с фидерными облаками, подвергнутыми воздействиям. Причиной этого может быть тот факт, что облака столь интенсивно развивались в условиях очень нестабильной атмосферы, что летчики для воздействий выбирали менее развитые (опасные) облака. При этом можно отметить тенденцию к более интенсивному развитию кучево-дождевых облаков после слияния с облаками, подвергнутыми

воздействиями. Происходит постепенное сближение характеристик облаков этой группы и характеристик кучево-дождевых облаков в естественном цикле развития. Однако различия между группами кучево-дождевых облаков не столь велики, чтобы можно было делать статистически обоснованные выводы. Совершенно очевидно, что при использованном подходе необходим больший статистический материал. По-видимому, следует в группы для сравнения подбирать не только близкие по своим характеристикам кучево-дождевые облака, а пары облаков, включающих кучево-дождевые и фидерные.

Таблица 5.3

**Статистические характеристики фидерных облаков для момента времени  $t = 0$ : в естественном цикле развития ( $n$ ) — числитель;  $s$  воздействиями ( $s$ ) — знаменатель**

Величина	$N$	Среднее	Медиана	Min	Max	$\sigma$
$H_{вг}$ , км	21/15	10,9/10,9	10,3/9,6	5,1/5,1	16,3/17,1	2,6/3,5
$Z_m$ , дБZ	21/15	47,4/45,7	46,1/46,5	31,8/34,1	61,5/57,5	8,5/7,7
$M$ , кг	21/15	191/248	61/35	2,2/2,8	1314/1225	305/417
$F$ , м <sup>3</sup> /с	21/15	302/306	124/68	4,5/8,8	2047/1356	458/453
$H_m$ , км	21/15	6,3/6,5	6,2/7,0	2,5/4,0	13,7/10,7	2,4/2,3
$M_h$ , кг/м <sup>2</sup>	21/15	10,4/8,4	2,3/1,3	0,0/0,0	64,9/48,4	16,6/14,2

Полученные данные показывают, что влияние процесса слияния облаков на их характеристики значительно превосходит эффект активных воздействий. Это означает, что при попытках оценки эффективности воздействий на конвективные облака необходимо тщательно сортировать данные, отдельно рассматривая случаи, когда наблюдается слияние облаков.

## ГЛАВА 6

# ИССЛЕДОВАНИЕ СЛИЯНИЯ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В последние годы в условиях бурного прогресса электронно-вычислительной техники интенсивно развивается численное моделирование атмосферных процессов. Численные модели являются одним из важнейших инструментов исследования конвективных облаков и связанных с ними осадков. Они дают возможность получать пространственно-временное распределение основных характеристик облака (вектор скорости воздушного потока, массовую концентрацию облачных частиц и осадков и др.), непосредственное измерение которых в натуральных условиях затруднено. Модели позволяют воспроизводить процесс эволюции облака в разных условиях (путем варьирования тех или иных параметров), что обеспечивает возможность выполнять анализ получаемых результатов. Модели облаков незаменимы при интерпретации результатов воздействий на облака, так как они позволяют выполнять моделирование облаков с воздействием и без него, определяя эффект воздействий, как соответствующую разницу [Довгалюк и др., 1993].

На сегодняшний день специалистами разработано много моделей разного уровня сложности, в том числе разной пространственной размерности (одномерные, двумерные, трехмерные). Под размерностью модели понимают количество пространственных координат, от которых зависят физические величины. Например, для одномерных моделей учитывается только изменение величин по высоте. Для двумерных рассматриваются высота и одна горизонтальная координата

(декартова или цилиндрическая). Трехмерные модели имеют дело с полным набором координат — как правило, декартовых. Следует выделить так называемые полуторамерные модели [Довгалюк и др., 2013], в которых зависимость величин от вертикальной координаты вычисляется при решении уравнений, а от горизонтальной — задается заранее определенным (упрощенным) образом. Кроме того, существуют так называемые нуль-мерные модели, когда рассматривается всплывающая частица с однородным объемом внутри (лагранжев подход).

Кроме размерности, модели различаются способом описания гидродинамики воздушной среды (от использования приближения Буссинеска до решения полной системы уравнений Навье — Стокса); способом описания микрофизических процессов (детальное или параметризованное); наличием или отсутствием учета тех или иных физических процессов (образование ледяной фазы, электризация облачных частиц, влияние на облако аэрозольных примесей и др.). Обзоры моделей содержатся в работах [Коган и др., 1984; Puppacher, Klett, 1978; Ашабоков, Шаповалов, 2008; Довгалюк, Ивлев, 1998; Довгалюк и др., 2013, Довгалюк и др., 2016а]. Обзор методов параметризации облачных процессов, применяемых в моделях, приведен в работе [Поташник, Кузнецов, 2010].

Публикации, посвященные применению численных моделей для моделирования процесса слияния конвективных облаков, наряду с экспериментальными работами, кратко описаны во введении.

В данной главе приведено описание численных моделей, разработанных в ГГО, а также изложены и проанализированы результаты их применения для моделирования слияния облаков.

## 6.1. Описание численной трехмерной модели конвективного облака

В ГГО совместно с ЦАО, ВГИ и НПО «Тайфун» разработана численная нестационарная трехмерная модель конвективного облака с параметризованным описанием микрофизических процессов [Довгалюк и др., 2008; Довгалюк и др., 2010; Довгалюк и др., 2016a; Довгалюк и др., 2016b; Веремей и др., 2016]. Она пригодна для моделирования как отдельного облака, так и двух и более взаимодействующих облаков. Ниже приведено ее краткое описание, а также представлены примеры результатов моделирования взаимодействия двух облаков.

Отметим, что применение указанной модели для исследования облаков является подходом, альтернативным по отношению к использованию мезомасштабных моделей (как, например, в работах [Fu, Xueliang, 2006; Finley et al., 2001]). Преимуществом данного подхода является достаточно простая интерпретация получаемых результатов, возможность использования малых шагов по пространству и времени (50—200 м и  $0,01 \div 0,5$  с соответственно), а также упрощения, связанные с отсутствием необходимости явного учета синоптической ситуации. В дальнейшем еще предстоит определить условия, когда применение каждого типа из указанных моделей является наиболее оптимальным. Это может считаться перспективным направлением исследований.

Рассматриваемая модель включает уравнения гидродинамики сжимаемой среды, а также баланса энергии, массы и заряда, дополненные выражениями для расчета интенсивностей микрофизических процессов (фазовые переходы, коагуляция, электризация облачных частиц). Микрофизические процессы описываются в параметризованном виде. Учтено поле фонового ветра. Данная модель описывает основные процессы, присущие конвективным облакам, в том

числе те, которые не могут быть описаны в моделях меньшей размерности (сдвиг ветра по высоте, компенсирующие движения воздуха, значительные горизонтальные неоднородности физических величин и др.) и позволяет получить трехмерную пространственную картину распределения исследуемых характеристик. В модели учитывается целый ряд важных процессов, связанных с электризацией облачных элементов. В качестве входных данных используются вертикальные профили температуры и влажности, получаемые обычно из результатов радиозондирования атмосферы, а также электрическое состояние невозмущенной атмосферы. Выходными данными являются пространственно-временные распределения температуры, скорости движения воздуха, содержания облачных капель, дождевых капель, ледяных кристаллов и градин, радиолокационной отражаемости, плотности распределения электрического заряда и других величин. Модель реализована на суперкомпьютере «Ломоносов» [Воеводин и др., 2012]. Создан и зарегистрирован реализующий ее пакет программ (Свидетельство о государственной регистрации № 2012618057 от 19.01.2012 г.).

Исходная система уравнений для мгновенных значений физических величин применительно к случаю движения многофазной системы, использованная при выводе уравнений модели, приведена в [Zatevakhin, 2015]. Она включает уравнения неразрывности, движения, энергии и переноса массы частиц конденсированной фазы, а также дополнена уравнением состояния.

Указанные уравнения получены при следующих основных допущениях:

1. Температура капель и ледяных частиц предполагается равной температуре окружающего воздуха (время температурной релаксации для конденсированной фазы

полагается пренебрежимо малым по сравнению с шагом по времени).

2. Давление в газовой фазе равно давлению в жидкой фазе (это справедливо в случае, когда малы эффекты поверхностного натяжения, и характерное время исследуемого макропроцесса во много раз превышает время установления равновесного давления между фазами).

3. Время скоростной релаксации частиц мало, то есть, в момент возникновения они уже двигаются относительно окружающей среды с установившейся скоростью гравитационного падения (берется средневзвешенное значение этой скорости).

4. В облаке при наличии облачных капель среда находится в состоянии термодинамического равновесия, то есть, парциальное давление водяного пара равно давлению насыщения относительно плоской поверхности воды.

Известно, что конвективное облако является сильно турбулизованной системой. Поэтому далее было выполнено осреднение исходной системы по Рейнольдсу. При описании членов, содержащих корреляции пульсаций плотности с другими величинами, применен подход Фавра [Favre, 1969]. В результате уравнения упрощаются. Для описания турбулентности использовался полуэмпирический подход (*K*-модель).

Предполагалось, что вся влага, присутствующая в облаке, разделена на водяной пар, облачные капли, дождевые капли, облачные ледяные кристаллы и ледяные частицы осадков. При этом воздух и водяной пар образуют несущую паровоздушную среду, а остальные субстанции представляют собой конденсированную фазу; для каждой из этих субстанций записывается уравнение переноса массы.

В модели учтены процессы электризации облачных частиц, пространственного распределения зарядов и образования

электрических полей. К вышеперечисленным уравнениям добавлены уравнения переноса электрических зарядов, вид которых в целом аналогичен виду уравнений переноса массы частиц конденсированной фазы.

Полученная система дополнена параметрическими выражениями для вычисления интенсивностей микрофизических процессов, с помощью которых рассчитываются источники и стоки субстанций в уравнениях переноса массы и зарядов.

Полученная система основных уравнений имеет следующий вид (здесь и далее тильдой обозначены величины, осредненные по Фавру [Favre, 1969]):

1. Уравнение неразрывности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{\rho} \tilde{v}_{\text{air},x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{\rho} \tilde{v}_{\text{air},y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\rho} \tilde{v}_{\text{air},z}) = \\ = \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\rho} \tilde{q}_c V_c) + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\rho} \tilde{q}_{ic} V_{ic}) + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\rho} \tilde{q}_r V_r) + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\rho} \tilde{q}_i V_i) \end{aligned}, \quad (6.1)$$

где  $x, y, z$  — декартовы координаты;  $t$  — время;  $\rho$  — плотность смеси с учетом паровоздушной несущей среды и содержащихся в ней капель воды и частиц льда;  $v_{\text{air}}$  — вектор скорости движения среды;  $q_c, q_r, q_{ic}, q_i$  — удельное содержание облачных капель, дождевых капель, облачных ледяных кристаллов и ледяных осадков соответственно;  $V_c, V_r, V_{ic}, V_i$  — их собственная установившаяся скорость падения. Здесь и далее предполагается, что установившиеся скорости падения всех частиц имеют только вертикальную составляющую, поэтому для них индекс  $z$  опускается.

2. Уравнение движения несущей среды:

$$\begin{aligned}
 & (1 - \tilde{q}_c - \tilde{q}_{ic} - \tilde{q}_r - \tilde{q}_i) \times \\
 & \times \left( \bar{\rho} \frac{\partial \tilde{v}_{air,x}}{\partial t} + \bar{\rho} \tilde{v}_{air,x} \frac{\partial \tilde{v}_{air,x}}{\partial x} + \bar{\rho} \tilde{v}_{air,y} \frac{\partial \tilde{v}_{air,x}}{\partial y} + \bar{\rho} \tilde{v}_{air,z} \frac{\partial \tilde{v}_{air,x}}{\partial z} - \right. \\
 & \quad \left. - \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial \tilde{v}_{air,x}}{\partial x} + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial \tilde{v}_{air,y}}{\partial y} + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial \tilde{v}_{air,z}}{\partial z} \right) ; \quad (6.2a) \\
 & - \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial \tilde{v}_{air,x}}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial \tilde{v}_{air,y}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial \tilde{v}_{air,x}}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial \tilde{v}_{air,z}}{\partial x} \Big) = \\
 & \quad = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - E_x \tau
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (1 - \tilde{q}_c - \tilde{q}_{ic} - \tilde{q}_r - \tilde{q}_i) \times \\
 & \times \left( \bar{\rho} \frac{\partial \tilde{v}_{air,y}}{\partial t} + \bar{\rho} \tilde{v}_{air,x} \frac{\partial \tilde{v}_{air,y}}{\partial x} + \bar{\rho} \tilde{v}_{air,y} \frac{\partial \tilde{v}_{air,y}}{\partial y} + \bar{\rho} \tilde{v}_{air,z} \frac{\partial \tilde{v}_{air,y}}{\partial z} - \right. \\
 & \quad \left. - \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial \tilde{v}_{air,y}}{\partial y} + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial \tilde{v}_{air,x}}{\partial x} + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial \tilde{v}_{air,z}}{\partial z} - \right) ; \quad (6.2b) \\
 & - \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial \tilde{v}_{air,y}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial \tilde{v}_{air,y}}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial \tilde{v}_{air,x}}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial \tilde{v}_{air,z}}{\partial y} \Big) = \\
 & \quad = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - E_y \tau
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (1 - \tilde{q}_c - \tilde{q}_{ic} - \tilde{q}_r - \tilde{q}_i) \times \\
 & \times \left( \bar{\rho} \frac{\partial \tilde{v}_{air,z}}{\partial t} + \bar{\rho} \tilde{v}_{air,x} \frac{\partial \tilde{v}_{air,z}}{\partial x} + \bar{\rho} \tilde{v}_{air,y} \frac{\partial \tilde{v}_{air,z}}{\partial y} + \bar{\rho} \tilde{v}_{air,z} \frac{\partial \tilde{v}_{air,z}}{\partial z} - \right. \\
 & \quad \left. - \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial \tilde{v}_{air,z}}{\partial z} + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial \tilde{v}_{air,x}}{\partial x} + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial \tilde{v}_{air,y}}{\partial y} - \right) , \quad (6.2b) \\
 & - \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial \tilde{v}_{air,z}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial \tilde{v}_{air,z}}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial \tilde{v}_{air,x}}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial \tilde{v}_{air,y}}{\partial z} \Big) = \\
 & \quad = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} - E_z \tau - g \bar{\rho}
 \end{aligned}$$

где  $p$  — давление;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\mu$  — коэффициент турбулентной вязкости;  $E_x, E_y, E_z$  — компоненты вектора напряженности электростатического поля;  $\tau$  — суммарная объемная плотность электрического заряда.

В правой части уравнений (6.2а) — (6.2в) стоят объемные силы, действующие на среду: сила барического градиента, электростатическая и гравитационная силы (для последней отлична от нуля только вертикальная составляющая).

3. Уравнение баланса общего влагосодержания:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{q}) + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{\rho}\tilde{q}\tilde{v}_{\text{air},x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{\rho}\tilde{q}\tilde{v}_{\text{air},y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\rho}\tilde{q}\tilde{v}_{\text{air},z}) + \\ - \frac{\partial}{\partial x}K \frac{\partial\tilde{q}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y}K \frac{\partial\tilde{q}}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z}K \frac{\partial\tilde{q}}{\partial z} - \\ - \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\rho}\tilde{q}_c V_c) - \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\rho}\tilde{q}_r V_r) - \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\rho}\tilde{q}_{ic} V_{ic}) - \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\rho}\tilde{q}_i V_i) = 0 \end{aligned} \quad (6.3)$$

где  $q$  — общее влагосодержание,  $K$  — динамический коэффициент турбулентности.

Последние четыре слагаемых левой части описывают гравитационное осаждение частиц разных фракций. Установившаяся собственная скорость падения облачных капель и облачных ледяных кристаллов ( $10^{-3} \div 10^{-2}$  м/с) пренебрежимо мала по сравнению с аналогичными величинами для осадков ( $10^{-1} \div 10^1$  м/с) и со скоростью движения среды ( $10^0 \div 10^1$  м/с) [Pruppacher, Klett, 1978; Облака и облачная атмосфера, 1989; Мейсон, 1961; Шишкин, 1964; Шметер, 1972; Матвеев, 1981; Шметер, 1987]. В связи с этим в большинстве задач полагается, что  $V_c$  и  $V_{ic}$  равны нулю. Значения  $V_r$  рассчитываются по формулам, аппроксимирующим экспериментальные данные Ганна и Кинцера [Роджерс, 1979]. Аналогичные формулы

адаптированы для расчета  $V_i$  с поправкой на отличие плотности льда от плотности воды.

4. Уравнения баланса облачных капель, облачных ледяных кристаллов, дождевых капель и кристаллических осадков:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{q}_j) + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{\rho}\tilde{q}_j\tilde{v}_{\text{air},x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{\rho}\tilde{q}_j\tilde{v}_{\text{air},y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\rho}\tilde{q}_j\tilde{v}_{\text{air},z}) - \\ - \frac{\partial}{\partial x}K\frac{\partial\tilde{q}_j}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y}K\frac{\partial\tilde{q}_j}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z}K\frac{\partial\tilde{q}_j}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\rho}\tilde{q}_jV_{j,z}) = F_j \end{aligned}, \quad (6.4)$$

где

$$q_j = \{\tilde{q}_c, \tilde{q}_{ic}, \tilde{q}_r, \tilde{q}_i\}; V_j = \{V_c, V_{ic}, V_r, V_i\}; F_j = \{F_c, F_{ic}, F_r, F_i\}.$$

Здесь  $F_c, F_{ic}, F_r, F_i$  — источники-стоки облачных капель, дождевых капель, облачных ледяных кристаллов и градин соответственно. Источниковые члены описывают микрофизические процессы фазовых переходов влаги и коагуляции облачных элементов. Следует отметить, что в модели отсутствует разделение кристаллических осадков на град и крупу, однако осадки указанных типов отличаются лишь плотностью льда, которая в модели задается в качестве параметра.

Характерные значения  $\tilde{q}_c, \tilde{q}_{ic}, \tilde{q}_r, \tilde{q}_i$  в конвективных облаках не превышают величины порядка  $10^{-3}$  (величины безразмерные, имеют смысл массы субстанции на единицу массы среды). Это соответствует водности (ледности) порядка  $10^0$  г/м<sup>3</sup> [Pruppacher, Klett, 1978; Облака и облачная атмосфера, 1989; Мейсон, 1961; Шишкин, 1964; Шметер, 1972; Матвеев, 1981; Шметер, 1987; Синькевич, 2001, Пономарев и др., 1991]. В ряде случаев,  $\tilde{q}_r$  и

$\tilde{q}_i$  могут достигать  $10^{-2}$  (например, в зонах аккумуляции). В связи с этим множитель  $(1 - \tilde{q}_c - \tilde{q}_{ic} - \tilde{q}_r - \tilde{q}_i)$  в уравнениях (6.2а) — (6.2в) близок к единице. Однако при наличии достаточных вычислительных ресурсов его следует учитывать, так как погрешность расчетов из-за отсутствия их учета накапливается со временем.

Удельное содержание водяного пара рассчитывается из общего влагосодержания и содержания конденсированных фракций по формуле:

$$\tilde{q}_v = \tilde{q} - \tilde{q}_c - \tilde{q}_{ic} - \tilde{q}_r - \tilde{q}_i.$$

### 5. Уравнение внутренней энергии:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{u}) + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{\rho}\tilde{u}\tilde{v}_{\text{air}_x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{\rho}\tilde{u}\tilde{v}_{\text{air}_y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{\rho}\tilde{u}\tilde{v}_{\text{air}_z}) - \\ & - \frac{\partial}{\partial x}K\frac{\partial\tilde{u}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y}K\frac{\partial\tilde{u}}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z}K\frac{\partial\tilde{u}}{\partial z} = \\ & = -\bar{p}\left(\frac{\partial\tilde{v}_{\text{air}_x}}{\partial x} + \frac{\partial\tilde{v}_{\text{air}_y}}{\partial y} + \frac{\partial\tilde{v}_{\text{air}_z}}{\partial z}\right) + \Phi + \\ & + g\bar{\rho}(V_c\tilde{q}_c + V_{ic}\tilde{q}_{ic} + V_i\tilde{q}_i + V_r\tilde{q}_r) - \\ & - \frac{\partial}{\partial z}\left[\bar{\rho}\tilde{q}_c V_c(L_{\text{cond}} - c_{v,p}\tilde{T}) + \bar{\rho}\tilde{q}_r V_r(L_{\text{cond}} - c_{v,p}\tilde{T}) + \right. \\ & \left. + \bar{\rho}\tilde{q}_{ic} V_{ic}(L_{\text{subl}} - c_{v,p}\tilde{T}) + \bar{\rho}\tilde{q}_i V_i(L_{\text{subl}} - c_{v,p}\tilde{T})\right] \end{aligned} \quad , \quad (6.5)$$

где  $u$  — внутренняя энергия;  $T$  — температура;  $L_{\text{cond}}$  и  $L_{\text{subl}}$  — скрытая теплота фазового перехода вода — пар и лед — пар соответственно;  $\Phi$  — диссипативная функция.

## 6. Уравнения состояния:

$$\begin{aligned} \bar{p} &= \bar{\rho}_{\text{air}} R_{\text{air}} \tilde{T} + \bar{\rho}_v R_v \tilde{T} = \\ &= \bar{\rho} \tilde{T} [(1 - \tilde{q}) R_{\text{air}} + (\tilde{q} - \tilde{q}_c - \tilde{q}_{\text{ic}} - \tilde{q}_r - \tilde{q}_i) R_v], \end{aligned} \quad (6.6a)$$

$$\tilde{T} = \frac{\tilde{u} + (\tilde{q}_c + \tilde{q}_r) L_{\text{cond}} + (\tilde{q}_{\text{ic}} + \tilde{q}_i) L_{\text{subl}}}{(1 - \tilde{q}) c_{\text{air},v} + \tilde{q} c_{v,v} + (\tilde{q}_c + \tilde{q}_{\text{ic}} + \tilde{q}_r + \tilde{q}_i) R_v}, \quad (6.6b)$$

где  $R_{\text{air}}$  и  $R_v$  — газовая постоянная сухого воздуха и водяного пара соответственно.

Указанная система дополнена параметрическими выражениями для расчета интенсивностей микрофизических процессов фазовых переходов и коагуляции частиц. В задачах, где учитываются электрические процессы, система также дополняется уравнениями переноса электрических зарядов (ионов обоих знаков и каждой из конденсированных фракций), уравнением Пуассона для расчета напряженности электрического поля, а также параметрическими выражениями для расчета процессов электризации частиц.

Микрофизический блок содержит параметрические выражения для расчета интенсивностей фазовых переходов, коагуляции и заряжения частиц.

Схема перехода влаги между субстанциями в ходе микрофизических процессов при эволюции облака представлена на рис. 6.1, 6.2, 6.3. На рис. 6.1 представлена схема для частного случая жидкокапельного облака, на рис. 6.2 — для случая, когда ледяная фаза представлена только кристаллическими осадками. На рис. 6.3 приведена обобщенная схема с учетом наличия в облаке всех субстанций, учитываемых в модели.

Все источниковые члены имеют размерность  $\text{с}^{-1}$  и имеют физический смысл приращения массы субстанции на единицу массы смеси за единицу времени.

1. Источник-сток водяного пара:

$$F_v = P_{с, исп} + P_{г, исп} + P_{i, исп} + \\ + P_{i исп. тающ} - P_{конд} - P_{субл} - P_{субл. ЛОЯ}$$

2. Источник-сток облачных капель:

$$F_c = P_{конд} - P_{автоковн} - P_{коаг, с-г} - P_{с, исп} - P_{обзерн} - P_{замерзс}$$

3. Источник-сток облачных ледяных кристаллов:

$$F_{ic} = P_{замерзс} + P_{субл. ЛОЯ} - P_{коаг, г-ic, ic} - P_{ростic}$$

4. Источник-сток дождевых капель:

$$F_r = P_{автоковн} + P_{коаг, с-г} - P_{замерз, г} + P_{таян} - \\ - P_{г, исп} - P_{коаг, г-i} - P_{коаг, г-ic, г}$$

5. Источник-сток ледяных частиц осадков:

$$F_i = P_{замерз, г} + P_{субл} - P_{таян} - P_{i, исп} - P_{i исп. тающ} + \\ + P_{обзерн} + P_{рост, ic} + P_{коаг, г-i} + P_{коаг, г-ic, г} + P_{коаг, г-ic, ic}$$

Следует отметить, что некоторые механизмы были исключены из рассмотрения. В частности, не учтен механизм выброса вторичных облачных ледяных кристаллов при обзертении градин (механизм Халлетта — Моссопа), а также испарение облачных кристаллов.

Резюмируя сказанное выше, можно отметить, что микрофизические процессы, связанные с фазовыми переходами воды и коагуляцией частиц, можно подразделить на две группы: в трехфазном облаке, в общем случае, могут работать все перечисленные процессы, а в двухфазном — только часть из них (в которых не участвуют ледяные частицы).

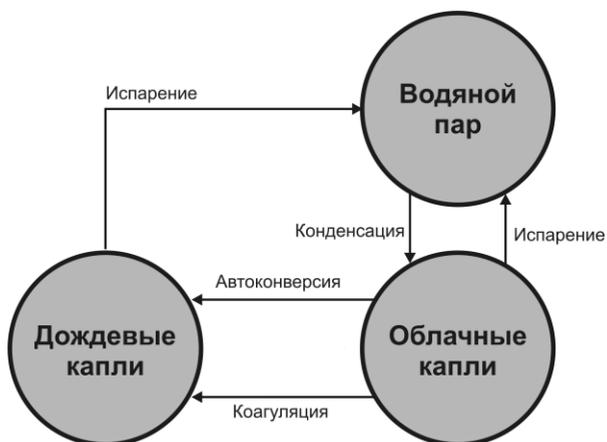


Рис. 6.1. Схема баланса влаги для случая жидкокапельного облака.



Рис. 6.2. Схема баланса влаги для случая трехфазного облака без учета облачного льда.

Известно, что в атмосфере Земли ветер изменяется по скорости и направлению в зависимости от высоты относительно поверхности. При этом эти изменения носят нерегулярный характер. Облака взаимодействуют с полем ветра, что существенно влияет на их характеристики. В связи с этим в модели учтено взаимодействие конвективного облака с полем фонового ветра в атмосфере [Веремей и др., 2016].



Рис. 6.3. Схема баланса влаги для случая трехфазного облака с учетом облачного льда.

На рис. 6.4 приведена обобщенная схема обмена данными между блоками модели.

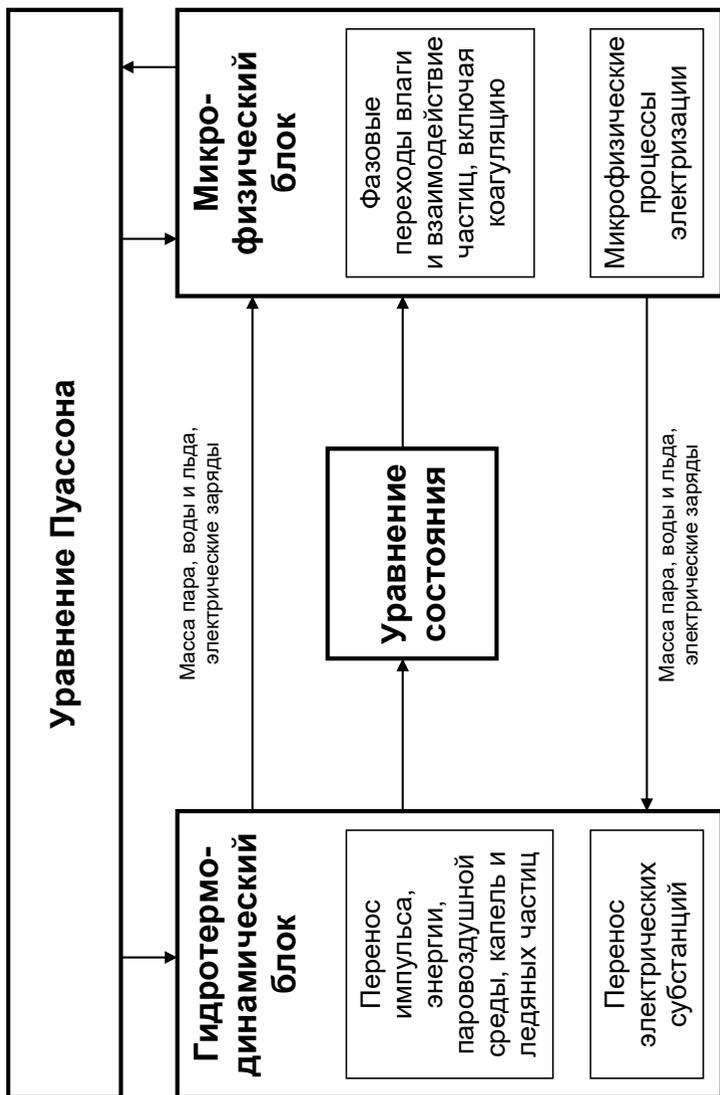


Рис. 6.4. Схема обмена данными между блоками модели на каждом шаге расчетов по времени.

Начальными условиями в модели являются данные радиовеетрового зондирования (вертикальные профили температуры, влажности и вектора скорости ветра) и начальное возмущение полей скорости и (или) температуры в момент времени  $t = 0$ . Электрическое состояние атмосферы в начальный момент времени определяется вертикальными профилями концентрации положительных и отрицательных ионов, характерными для условий хорошей погоды при отсутствии облачности

Граничные условия выбираются в зависимости от конкретной поставленной задачи. Нижняя граница, соответствующая подстилающей поверхности, всегда задается непроницаемой. Для верхней и боковых границ могут задаваться как непроницаемые границы, так и условие свободного протекания. В случае задания фонового ветра задаются условия втекания (вытекания).

При численной реализации модели был применен метод расщепления по физическим процессам [Марчук, 1967; Пирнач, Буйков, 1983; Бусыгина, 1970]. Такой подход дает возможность последовательно рассчитывать гидротермодинамический и микрофизический блоки.

Для численного решения уравнений движения, неразрывности и энергии была использована классическая схема Маккормака [MacCormack, 1969] второго порядка точности по времени и по координате. Для численного решения уравнений переноса использовалась простая противопоточная схема. Уравнение Пуассона решается методом бисопряженных градиентов.

В модели рассматривается прямоугольная расчетная область, покрытая сеткой с постоянными шагами  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ . Характерные значения  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ , используемые при моделировании конвективных облаков, составляют 100—200 м, значения  $\Delta t$  — 0,01÷1 с. Предусмотрено задание как

фиксированного значения  $\Delta t$ , так и переменного значения, определяемого непосредственно в процессе расчетов в соответствии с критерием Куранта — Фридрихса — Леви [Courant et al., 1928]. Используемая численная схема предусматривает возможность применения технологии распараллеливания вычислений, которая в настоящее время широко используется для решения различных задач.

## **6.2. Методика задания возмущений поля температуры в трехмерной модели**

При моделировании облачной конвекции важным является вопрос об инициализации конвективного потока, дающего начало развитию облаков. В данной работе инициализация конвекции производилась путем задания трехмерного осесимметричного возмущения поля температуры в некоторой области вблизи подстилающей поверхности методом Мак-Найдера — Коппа [McNider, Kopp, 1990] в начальный момент времени. В соответствии с разработанной методикой предполагалось, что указанное возмущение для потенциальной температуры  $\theta$  имеет зависимость от координат гауссовского типа:

$$\theta'(x, y, z) = 3,0 \cdot \sigma(z) \exp \left[ -\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{0,5\lambda^2} \right],$$

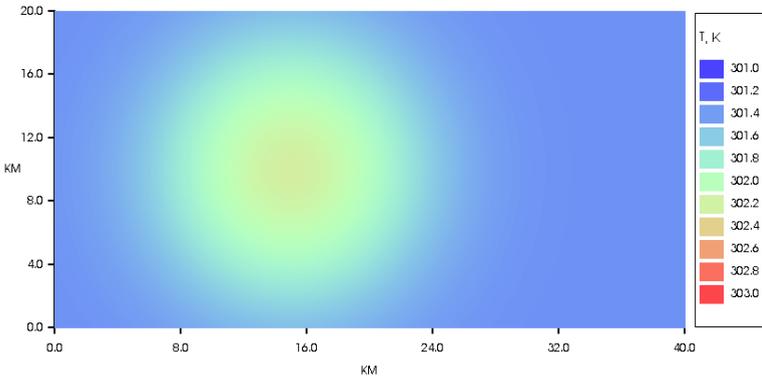
где

$$\sigma(z) = 1,34 z^{-1/3} \left( \frac{H}{\rho c_p} \right)^{2/3} \left( \frac{\theta}{g} \right)^{1/3}.$$

Здесь  $x, y, z$  — координаты (ось  $x$  вытянута вдоль направления ветра),  $x_0, y_0$  — координаты центра возмущения,  $H$  — тепловой поток с поверхности ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), приводящий к вычисляемому перегреву (характерный диапазон значений  $H$  составляет

60—480 Вт/м<sup>2</sup> [McNider, Kopp, 1990]),  $\lambda$  — ширина гауссовой кривой,  $\rho$  — плотность воздуха,  $c_p$  — теплоемкость воздуха при постоянном давлении;  $g$  — ускорение свободного падения.

а)



б)

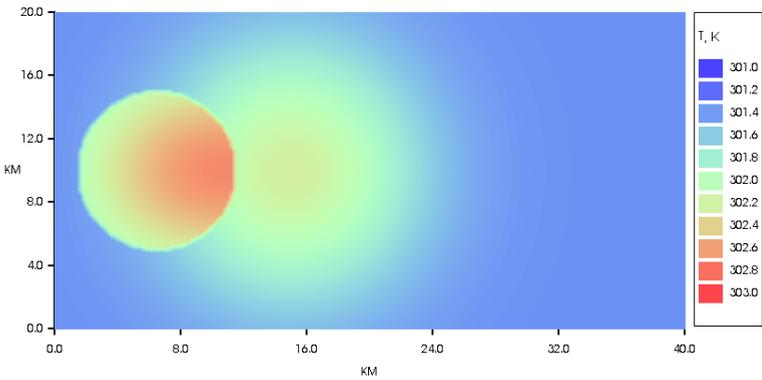


Рис. 6.5. Горизонтальный профиль поля температуры  $T_u$  подстилающей поверхности в начальный момент времени:  
 а) при инициализации одиночного облака;  
 б) при инициализации двух облаков с разным горизонтальным размером. Области перегрева частично перекрываются между собой.

При инициализации двух и более облаков задается соответствующее количество областей перегрева. На рис. 6.5 приведен пример инициализации одного (рис. 6.5а) и двух (рис. 6.5б) облаков, которые впоследствии будут взаимодействовать между собой.

В данном примере для единичного возмущения поля температуры задано  $H = 300$  Вт/м<sup>2</sup>. В случае двух возмущений для обоих из них задается то же значение  $H$ , но при этом искусственно ограничивается ширина области перегрева. Оба тепловых пятна разнесены в пространстве вдоль оси  $x$ , но частично перекрываются между собой.

### **6.3. Результаты моделирования слияния облаков с помощью трехмерной модели**

#### **6.3.1. Эксперимент в Индии**

В Индии, в окрестности города г. Аурангабад (штат Махараштра), 12 октября 2015 г. компанией WMI inc выполнялись работы по активному воздействию на конвективные облака с целью увеличения осадков [Синькевич и др., 2018]. Велись натурные наблюдения за состоянием атмосферы, а также за эволюцией облаков и осадков. Радиолокационные наблюдения за кучево-дождевыми облаками, развивавшимися в этот день, анализировались с помощью программы ТИТАН [Mather et al., 1996]. Наблюдения показали, что имел место процесс слияния двух облаков. Экспериментальные данные об изменении характеристик облаков в процессе их слияния представлены в главе 2.

Ниже приведены результаты численного моделирования эволюции взаимодействующих облаков с помощью трехмерной модели для указанного случая.

Вертикальные профили температуры  $T$ , точки росы  $T_d$ , и модуля горизонтальной скорости ветра  $v$  в атмосфере по данным

ближайшего пункта радиозондирования 43003 VABB (Bombay) за 12.10.2015 г., 12 ч представлены в табл. 6.1. Для простоты предполагается, что ветер изменяется с высотой только по величине, но не меняет направления. Это является серьезным упрощением, однако для интерпретации получаемых результатов данное упрощение оправдано.

Таблица 6.1

**Вертикальные профили температуры,  
точки росы и скорости ветра**

$p$ , ГПа	$T$ , °С	$T_d$ , °С	$v$ , м/с	$p$ , ГПа	$T$ , °С	$T_d$ , °С	$v$ , м/с
1009	32,0	24,0	3,1	600	3,8	-13,2	4,6
952	25,2	21,6	3,1	501	-4,1	-11,1	5,1
925	24,0	20,9	3,6	478	-5,1	-40,1	5,1
912	23,3	20,7	3,6	300	-29,3	-52,3	6,2
850	20,0	16,6	3,6	250	-39,3	-54,3	6,7
809	17,6	12,7	3,6	200	-51,1	-59,1	7,2
700	9,8	5,9	4,1	109	-78,5	-85,5	8,2

Анализ данных радиозондирования показал, что в день эксперимента в 12 ч ВСВ внутри слоя активной конвекции имелись три устойчивых слоя (инверсии температуры) небольшой вертикальной протяженности на высотах примерно 3,5, 4,5 и 6,0 км. Запас водяного пара в столбе атмосферы был равен 51,9 мм. Дефицит точки росы у подстилающей поверхности составил 8,0°С. Нулевая изотерма располагалась на высоте 5,3 км. С использованием метода частицы получено, что нижняя граница облаков должна была находиться на высоте 1,5 км (температура 17,7°С). Запас энергии неустойчивости в слое развития конвекции составлял 409 Дж/кг. Таким образом, в

анализируемый день могли развиваться мощные конвективные облака.

Моделировалось два случая: эволюция отдельного конвективного облака (случай А) и эволюция двух соседних взаимодействующих между собой конвективных облаков, которые впоследствии сливаются (случай Б). Значения перегревов заданы в соответствии с рис. 6.5*a* и 6.5*b* соответственно. Результаты расчетов проиллюстрированы на рис. 6.6—6.14.

На рис. 6.6 приведены графики, иллюстрирующие временной ход основных характеристик конвективного облака и связанных с ним осадков как для случая А, так и для случая Б. В табл. 6.2 приведены значения абсолютных максимумов этих и других характеристик, а также высоты и времени их достижения.

Рассмотрим случай А. В результате расчетов получено, что при заданном вертикальном распределении температуры и влажности в атмосфере развивается грозо-градовое кучево-дождевое облако с высотой верхней границы 8 км. Максимальное значение скорости восходящего потока  $w$  достигает 25 м/с, что также характерно для грозо-градовых облаков. Абсолютные максимумы водности облачных капель  $Q_c$ , водности дождевых капель  $Q_r$  и ледности градин  $Q_i$  составляют 3,6, 10,4 и 11,6 г/м<sup>3</sup> соответственно, что является очень большими значениями. Облачные ледяные кристаллы не образуются ( $Q_{ic} = 0$ ). Значение радиолокационной отражаемости  $Z$  достигает 61,1 дВЗ. Интенсивность дождя  $I_r$  и града  $I_i$  в максимуме составляет 283,7 и 9,2 мм/ч соответственно; суммарная интенсивность осадков  $I_\Sigma$  — 285,7 мм/ч. Отметим, что выпадение града из кучево-дождевых облаков в указанном регионе является редким, поэтому сравнительно малая интенсивность града соответствует

наблюдаемым данным. Вместе с тем, по результатам моделирования интенсивность осадков существенно превосходит наблюдаемую в натуральных условиях.

Таблица 6.2

**Максимальные значения  
основных характеристик облака и осадков,  
а также высоты ( $z_{\max}$ ) и времени ( $t_{\max}$ ) их достижения**

Величина	Случай А			Случай Б		
	max	$z_{\max}$ , км	$t_{\max}$ , мин	max	$z_{\max}$ , км	$t_{\max}$ , мин
$w$ , м/с	25,0	5,1	44,9	35,9	8,7	34,8
$Q_c$ , г/кг	3,6	3,8	41,9	3,9	5,6	45,9
$Q_r$ , г/кг	10,4	2,7	51,1	15,1	0,7	42,4
$Q_i$ , г/кг	11,7	5,1	47,4	11,5	5,1	51,0
$Q_{ic}$ , г/кг	0,0	—	—	2,1	8,5	34,3
$Z$ , дБZ	61,1	2,8	51,0	64,0	0,7	42,4
$I_r$ , мм/ч	283,7	—	53,0	416,2	—	43,3
$I_i$ , мм/ч	9,2	—	52,2	24,6	—	52,2
$I_{\Sigma}$ , мм/ч	285,7	—	53,0	421,1	—	43,3

Значительные интенсивности осадков, существенно превосходящие наблюдаемые в натуральных условиях, иногда появляются в результате расчетов по модели. Причины расхождений еще предстоит определить.

На рис. 6.7, 6.9 и 6.11 показан вертикальный профиль  $Q_c$ ,  $Q_r$  и  $Q_i$  соответственно для случая А. Представлено максимальное по оси  $Y$  значение величин в плоскости  $XZ$  для выбранных моментов времени, соответствующих разным стадиям эволюции облака.

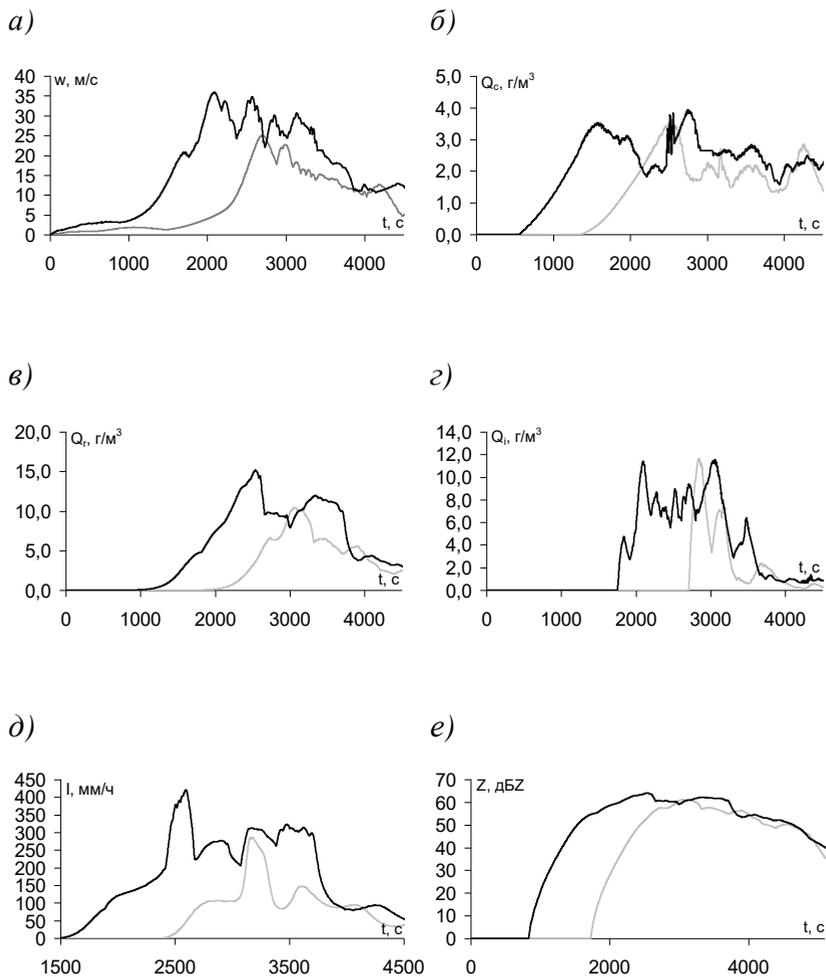


Рис. 6.6. Временной ход: максимального значения скорости вертикального потока (а); максимального значения водности облачных капель, водности дождевых капель и ледности твердых осадков (б, в, г, соответственно); интенсивности осадков (д); максимального значения радиолокационной отражаемости (е).

Черные кривые — случай Б, серые — случай А.

Из рисунков видно, что облако проходит все стадии жизни (развития, стабилизации и диссипации). Облако и область выпадающих из него осадков сильно деформируются в результате взаимодействия с полем фонового ветра, изменяющегося с высотой. На рис. 6.7 приведен профиль  $Q_c$ . На рис. 6.7а, б представлена стадия развития облака, а на рис. 6.7в показан момент, близкий к его наибольшему развитию. Из рис. 6.7г, д, е видно, что значение  $Q_c$  в результате осадкообразования уменьшается, так как облачные капли интенсивно коагулируют как с дождевыми каплями, так и с градинами. В результате в нижней части облака на поздних стадиях его эволюции масса облачных капель уменьшается. В верхней же его части облачные капли сохраняются на протяжении длительного времени.

На рис. 6.9 и 6.11 отображен процесс образования и выпадения осадков. Образование дождевых капель в результате автоконверсии облачных капель и последующей коагуляции дождевых капель с облачными начинается уже на достаточно ранней стадии эволюции облака (рис. 6.6в, 6.9а). Около  $t = 2800$  с начинается образование града в результате замерзания дождевых капель (рис. 6.11а). Далее происходит быстрый рост массы града в облаке в результате коагуляции градин с каплями воды всех фракций. Тем не менее, в области положительных температур в подоблачном слое имеет место таяние градин, вследствие чего интенсивность града у подстилающей поверхности оказывается невелика. Наряду с этим, масса дождевых капель за счет таяния градин пополняется (рис. 6.9в, г, д).

Далее рассмотрим случай Б, когда заданы две области начального теплового возмущения.

Над обеими перегретыми областями (рис. 6.5б) образуются восходящие потоки воздуха (всплывающие термики). Их развитие приводит к образованию облаков. Первым образуется

(и в дальнейшем оказывается наиболее мощным) облако над той областью, где зоны перегревов пересекаются между собой. Это происходит к моменту времени 1000 с. Около  $t = 2500$  с образуется второе облако — над правой (более широкой) перегретой областью. Оно оказывается менее мощным. В дальнейшем происходит процесс слияния указанных облаков. Отметим, что термики, равно как и порожденные ими облака, смещаются вдоль оси  $x$  под действием фонового ветра.

На рис. 6.6 и в табл. 6.2 показаны основные характеристики облака и осадков для случая Б в сравнении со случаем А. Максимальные значения соответствуют наибольшему из облаков, а в дальнейшем, после слияния, — объединенному облаку.

Видно, что процесс слияния способствует значительному усилению облачной конвекции, росту вертикальной мощности облака, а также увеличению интенсивности осадкообразования. Высота верхней границы объединенного облака достигает 15 км (в случае А — 8 км). Отметим, что высота верхней границы оценивается по сумме водности облачных капель и ледности облачных кристаллов. В случае Б происходит образование последних, и они образуют достаточно высокую наковальню.

Максимальное значение  $w$  достигает 35,9 м/с. Абсолютные максимумы  $Q_c$ ,  $Q_r$  и  $Q_i$  составляют 3,9, 15,1 и 11,5 г/м<sup>3</sup> соответственно. При этом только  $Q_i$  не превысило значение, соответствующее случаю А. Наблюдается образование облачных ледяных кристаллов в верхней части облака. Их ледность  $Q_{ic}$  достигает 2,1 г/м<sup>3</sup>. Значение  $I_r$  и  $I_i$  в максимуме составляет 416,2 и 24,6 мм/ч соответственно;  $I_\Sigma$  — 421,1 мм/ч,  $Z$  — 64,0 дВЗ. Все эти величины существенно превосходят значения, рассчитанные для случая А. Высота верхней границы облака в случае Б достигает 15 км.

Резкий рост объединенного облака, усиление конвекции и осадкообразования, очевидно, являются результатом подпитки большего облака теплом, влагой и количеством движения от объединившегося с ним меньшего. Кроме того, увеличение горизонтальных размеров объединенного облака способствует уменьшению взаимодействия облака с окружающей атмосферой (вовлечение, перемешивание), которое ослабляет конвекцию.

На рис. 6.8, 6.10 и 6.12 показан вертикальный профиль  $Q_c$ ,  $Q_r$  и  $Q_i$  соответственно для случая Б. Как и для случая А, здесь представлено максимальное по оси  $Y$  значение величин в плоскости  $XZ$  для выбранных моментов времени. Из рисунков видно, что два облака сливаются приблизительно к моменту времени 3500 с. На рис. 6.8 просматривается возникновение так называемого облачного моста, наиболее заметное на рис. 6.8г. Эта перемычка, состоящая из слоистообразных облаков, неоднократно наблюдалась при слиянии облаков в природных условиях [Chin, Wilhelmson, 1998; Lee et al., 2006; Simpson et al., 1980; Westcott, 1984; Fu, Xueliang, 2006]. Области осадков, связанных с двумя облаками (рис. 6.10, 6.12), сливаются почти полностью, однако сохраняют некоторую обособленность. На рис. 6.13 представлен вертикальный профиль поля вертикальной составляющей скорости движения воздуха. Видны взаимодействующие между собой конвективные потоки двух сливающихся облаков.

Сравнительный анализ рисунков для случая А (рис. 6.7, 6.9, 6.11) и для случая Б (рис. 6.8, 6.10, 6.12) так же, как и табл. 6.2 и рис. 6.6, демонстрирует рост размеров облака, усиление облачной конвекции, усиление осадков и расширение охваченной ими области. Это соответствует реально наблюдаемым данным. Надо отметить, что в природных условиях слияние облаков привело к усилению конвекции и осадков, однако при моделировании этот процесс проявился значительно сильнее. Причиной расхождений могут являться расхождения в

начальном перегреве на подстилающей поверхности в природных условиях и при моделировании. Вопрос о задании перегрева пока плохо исследован [Довгалюк и др., 2016б].

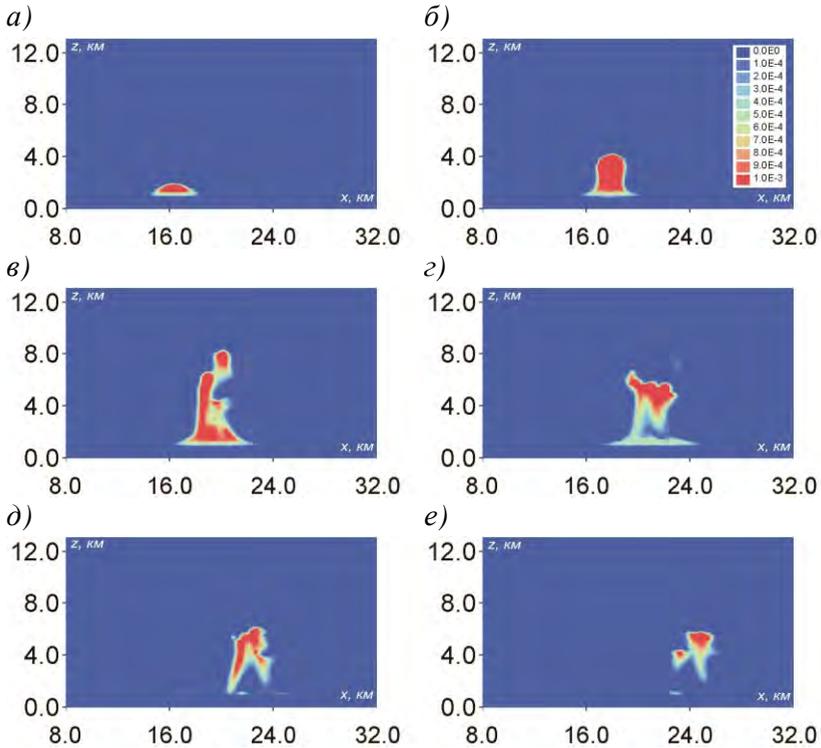


Рис. 6.7. Вертикальный профиль максимального по оси  $Y$  значения водности облачных капель в плоскости  $XZ$

в моменты времени:

а) 2000 с; б) 2500 с; в) 3000 с; г) 3500 с; д) 4000 с; е) 4500 с.

Случай А.

На рис. 6.14 приведено трехмерное изображение поля  $Q_c$  (изоповерхность 0,1 г/кг) для случая Б в разные моменты времени. Рисунок позволяет получить пространственное

представление о процессе слияния облаков. В частности, на рис. 6.14 аналогично рис. 6.5, также просматривается возникновение облачного моста, наиболее заметное на рис. 6.14г.

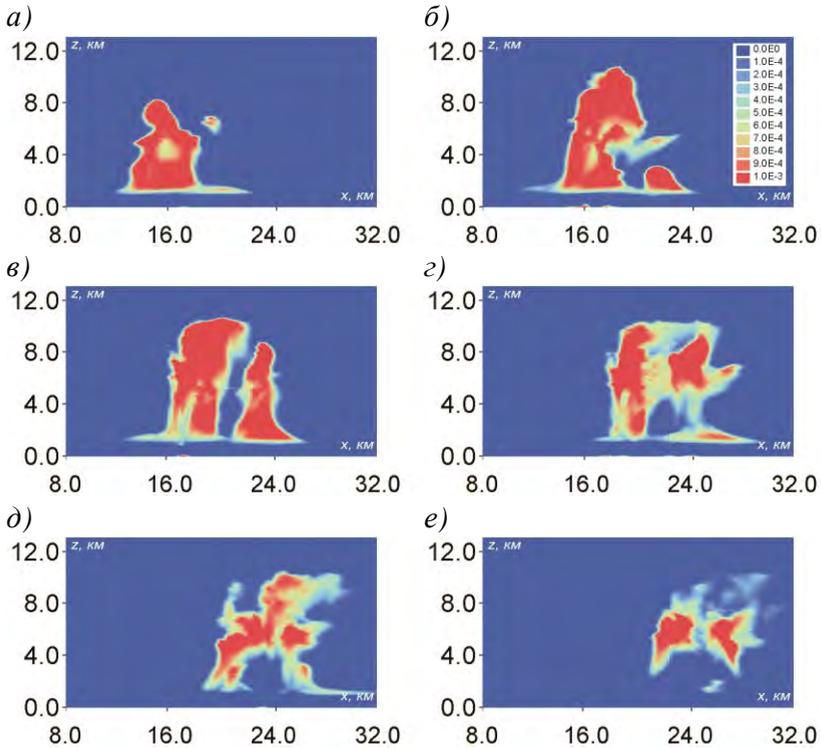


Рис. 6.8. Вертикальный профиль максимального по оси  $Y$  значения водности облачных капель в плоскости  $XZ$

в моменты времени:

а) 2000 с; б) 2500 с; в) 3000 с; г) 3500 с; д) 4000 с; е) 4500 с.

Случай Б.

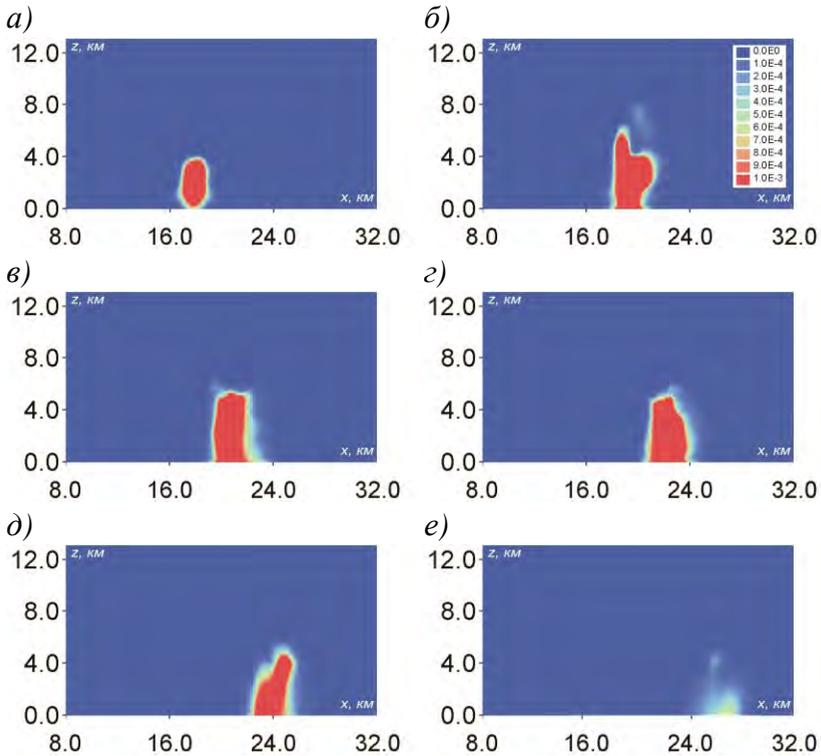


Рис. 6.9. Вертикальный профиль максимального по оси  $Y$  значения  
 влажности дождевых капель в плоскости  $XZ$

в моменты времени:

а) 2500 с; б) 3000 с; в) 3500 с; г) 4000 с; д) 4500 с; е) 5000 с.

Случай А.

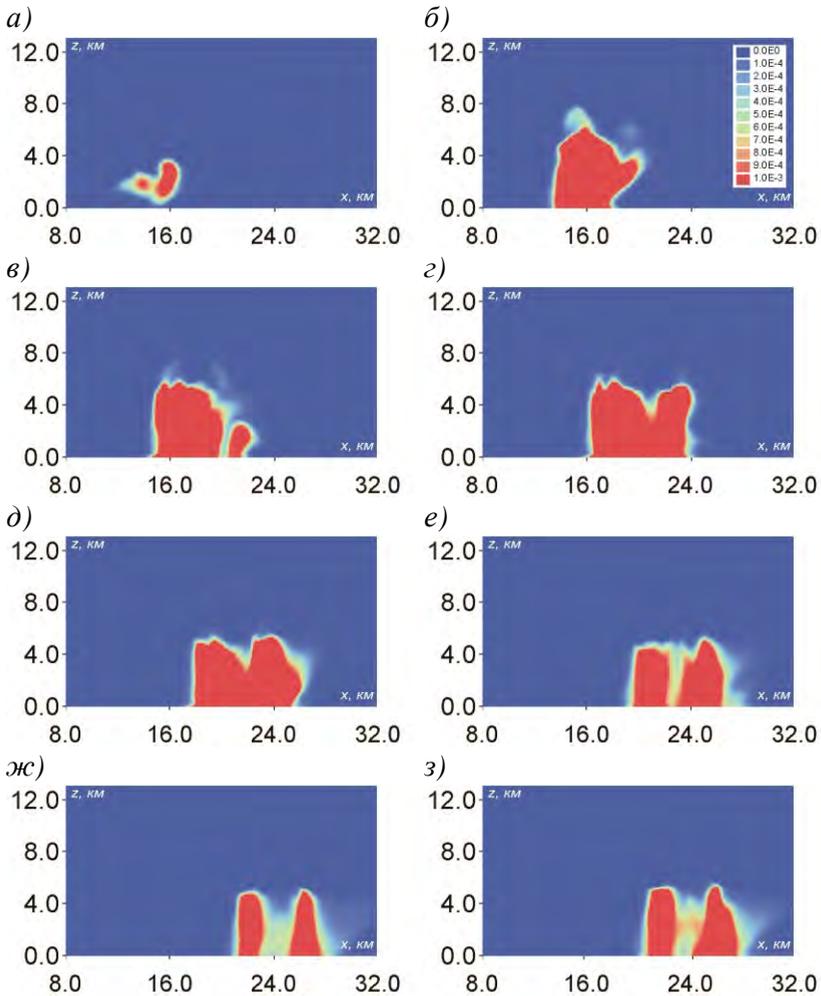


Рис. 6.10. Вертикальный профиль максимального по оси  $Y$  значения водности дождевых капель в плоскости  $XZ$  в моменты времени:  
 а) 1500 с; б) 2000 с; в) 2500 с; г) 3000 с;  
 д) 3500 с; е) 4000 с; ж) 4500 с; з) 5000 с.  
 Случай Б.

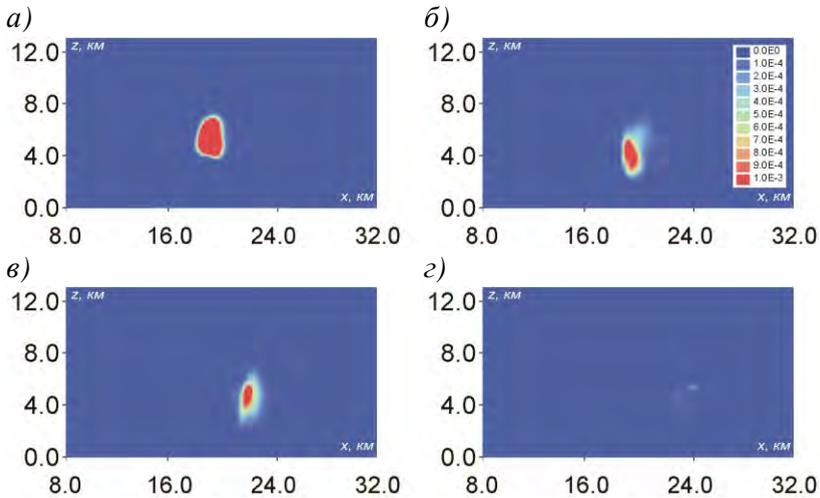


Рис. 6.11. Вертикальный профиль максимального по оси  $Y$  значения ледности градин в плоскости  $XZ$  в моменты времени:  
 а) 2800 с; б) 3300 с; в) 3800 с; г) 4300 с.  
 Случай А.

Небольшое облако в левой части расчетной области (рис. 6.8, 6.10) возникает над краем левого возмущения. Во взаимодействии вышеупомянутых облаков оно не участвует. Высота его верхней границы не превышает 3,5 км. Это облако остается жидкокапельным, выпадающие из него осадки невелики и присутствуют только в виде дождя.

Для практических задач важно знать коэффициенты экстремальности, то есть, отношения максимальных характеристик облака в результате слияния к тем, которые наблюдаются без слияния. Результаты моделирования рассматриваемых облаков показали, что эти коэффициенты для рассматриваемого случая составили соответственно: для  $w$  — 1,44; для  $Q_c$  — 1,08; для  $Q_r$  — 1,45; для  $Q_i$  — 0,98; для  $I_r$  — 1,47; для  $I_i$  — 2,67; для  $I_\Sigma$  — 1,47.

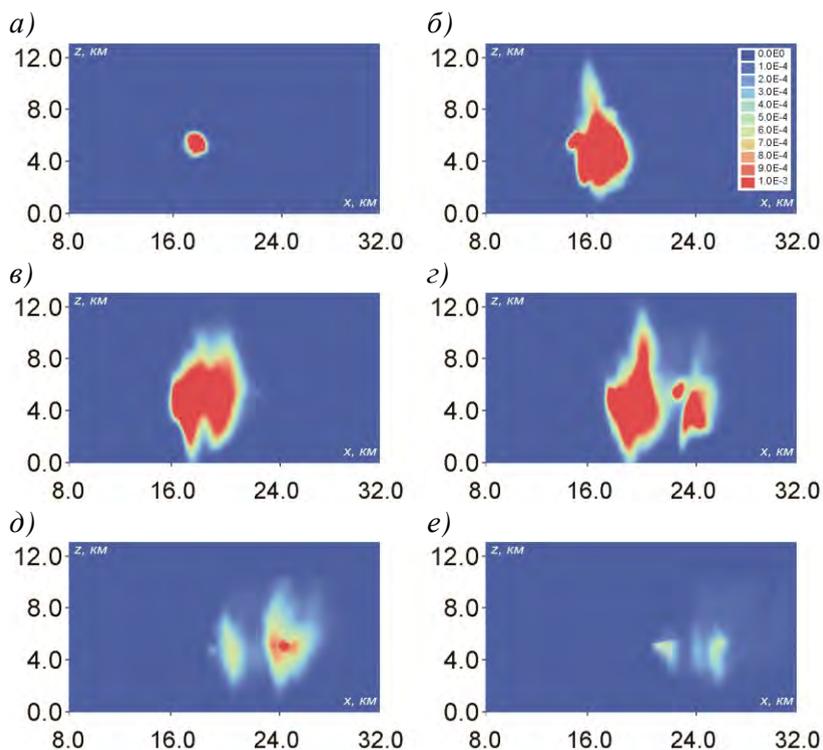


Рис. 6.12. Вертикальный профиль максимального по оси  $Y$  значения ледности градин в плоскости  $XZ$  в моменты времени:  
 а) 1800 с; б) 2300 с; в) 2800 с; г) 3300 с; д) 3800 с; е) 4300 с.  
 Случай Б.

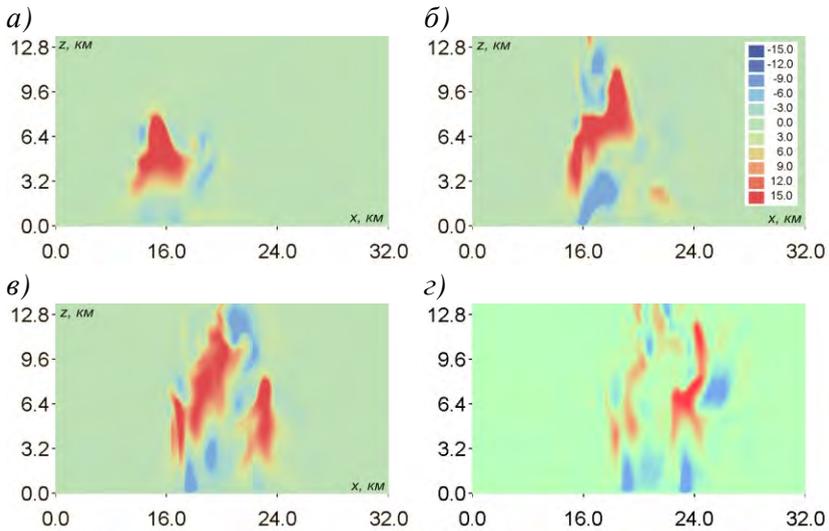


Рис. 6.13. Вертикальный профиль вертикальной составляющей скорости движения среды в плоскости XZ ( $y=10$  км)

в моменты времени:

а) 2000 с; б) 2500 с; в) 3000 с; з) 3500 с.

Случай Б.

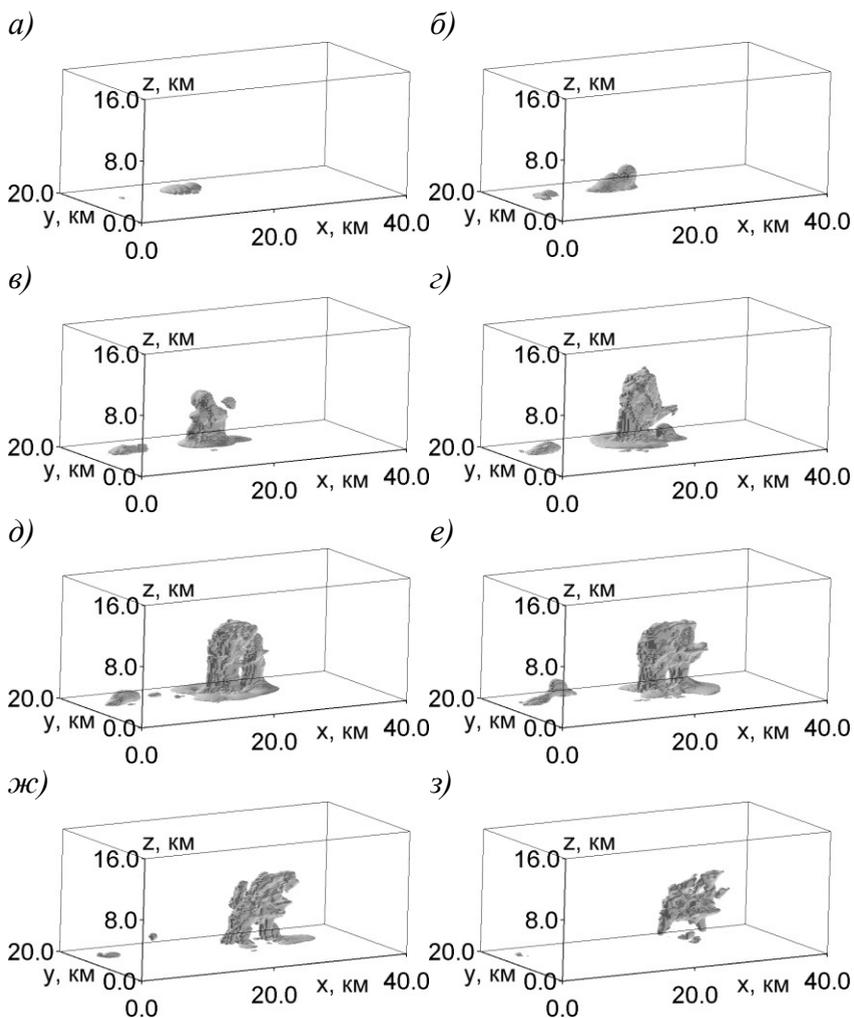


Рис. 6.14. Трехмерное изображение поля водности облачных капель  
 в моменты времени:  
 а) 1000 с; б) 1500 с; в) 2000 с; г) 2500 с;  
 д) 3000 с; е) 3500 с; ж) 4000 с; з) 4500 с.  
 Изоповерхность 0,1 г/кг. Случай Б.

### 6.3.2. Эксперимент в Северо-Кавказском регионе России

В Северо-Кавказском регионе России 7 июня 2014 г. имел место интенсивный грозо-градовый процесс с большим количеством отдельных ячеек, сменяющих друг друга в процессе своего развития. Непрерывные многочасовые наблюдения с использованием автоматизированной системы сбора и обработки радиолокационной информации проводились в этот день в течение 12 ч. Исследование градового процесса, развивавшегося юго-восточнее г. Нальчика с 17 ч 42 мин по 20 ч 34 мин, показало, что выпадение крупного града на территории Кабардино-Балкарии и Северной Осетии происходило из нескольких градовых ячеек, последовательно сменявших друг друга в течение 3 ч. Формирование одной градовой ячейки происходило в результате процесса слияния двух других ячеек, развивавшихся в одном и том же кластере, и, на момент слияния, находящихся на стадии интенсивного развития. Более детальные данные о характеристиках облаков в этот день приводятся в главе 3.

Для указанного случая выполнено численное моделирование эволюции взаимодействующих облаков с помощью трехмерной модели.

Вертикальные профили температуры  $T$ , точки росы  $T_d$ , и модуля горизонтальной скорости ветра  $\vec{v}$  в атмосфере по данным ближайшего пункта радиозондирования 37055 (Минеральные Воды) за 07.06.2014 г., 12 ч ВСВ приведены в табл. 6.3. Для упрощения предполагается, что ветер изменяется с высотой только по величине, но не меняет направления.

Моделирование, как и в предыдущем эксперименте, выполнялось для двух случаев: А) эволюция отдельного конвективного облака; Б) эволюция двух взаимодействующих между собой конвективных облаков, которые в процессе эволюции сливаются.

Таблица 6.3

**Вертикальные профили температуры,  
точки росы и модуля вектора скорости ветра**

$p$ , ГПа	$T$ , °C	$T_d$ , °C	$v$ , м/с	$p$ , ГПа	$T$ , °C	$T_d$ , °C	$v$ , м/с
973	27,5	17,0	2,1	446	-20,8	-28,8	6,2
949	24,2	13,6	4,6	423	-23,7	-32,7	5,1
925	22,4	11,7	7,2	400	-26,9	-36,9	2,1
850	15,4	6,4	11,8	377	-29,9	-43,3	4,1
821	12,8	4,3	13,9	300	-42,7	-50,7	8,2
793	10,2	2,2	12,8	250	-53,1	-61,1	8,7
700	3,8	-2,2	8,7	231	-56,7	-64,7	8,2
634	-1,6	-6,8	10,8	200	-54,1	-64,1	8,7
616	-3,1	-8,2	10,8	178	-54,6	-65,2	5,1
548	-9,5	-13,6	9,8	150	-53,5	-65,5	7,2
500	-14,3	-20,3	8,7	100	-57,7	-70,7	8,2

Инициализация конвекции, как и ранее, выполнялась по методу Мак-Найдера — Коппа [McNider, Copr, 1990]. Для случая А задано одно возмущение со значением теплового потока  $300 \text{ Вт/м}^2$ , а для случая Б — два возмущения с тем же тепловым потоком, но разной ширины. Эти возмущения, разнесенные в пространстве вдоль оси  $x$ , перекрываются между собой.

На рис. 6.15 и в табл. 6.4 приведены основные характеристики конвективного облака и связанных с ним осадков для случаев А и Б. В таблице приведены значения абсолютных максимумов характеристик (для случая Б они соответствуют наибольшему из облаков, а в дальнейшем, после слияния, — объединенному облаку), а также высоты и времени

их достижения. На рис. 6.15 построены графики, иллюстрирующие временной ход указанных максимумов.

Таблица 6.4

**Максимальные значения  
основных характеристик облака и осадков,  
а также высоты ( $z_{\max}$ ) и времени ( $t_{\max}$ ) их достижения**

Величина	Случай А			Случай Б		
	max	$z_{\max}$ , км	$t_{\max}$ , мин	max	$z_{\max}$ , км	$t_{\max}$ , мин
$H_{\text{вг}}$ , км	14,1	—	58,2	15,2	—	46,2
$w$ , м/с	47,3	9,5	43,9	54,1	11,2	41,0
$Q_c$ , г/м <sup>3</sup>	2,4	4,3	36,8	2,8	5,5	31,4
$Q_r$ , г/м <sup>3</sup>	11,7	0,0	45,1	10,1	0,1	39,7
$Q_i$ , г/м <sup>3</sup>	10,3	3,5	42,1	13,5	3,2	34,0
$Q_{ic}$ , г/м <sup>3</sup>	1,8	8,4	41,7	1,9	8,0	31,1
$Z$ , дБЗ	62,0	0,0	45,1	60,9	0,1	39,7
$I_r$ , мм/ч	337,7	—	45,1	297,3	—	39,8
$I_i$ , мм/ч	108,5	—	44,9	141,1	—	45,9
$I$ , мм/ч	428,3	—	45,2	387,2	—	39,8

Рассмотрим случай А. При заданных вертикальных профилях температуры и влажности образуется грозо-градовое кучево-дождевое облако с высотой верхней границы  $H_{\text{вг}} = 14,1$  км и с максимальной скоростью восходящего потока  $w = 47,3$  м/с. Абсолютные максимумы водности облачных капель  $Q_c$ , водности дождевых капель  $Q_r$ , и ледности градин  $Q_i$  и ледности облачных кристаллов  $Q_{ic}$  составляют 2,8; 11,7; 10,3 и 1,8 г/м<sup>3</sup> соответственно.

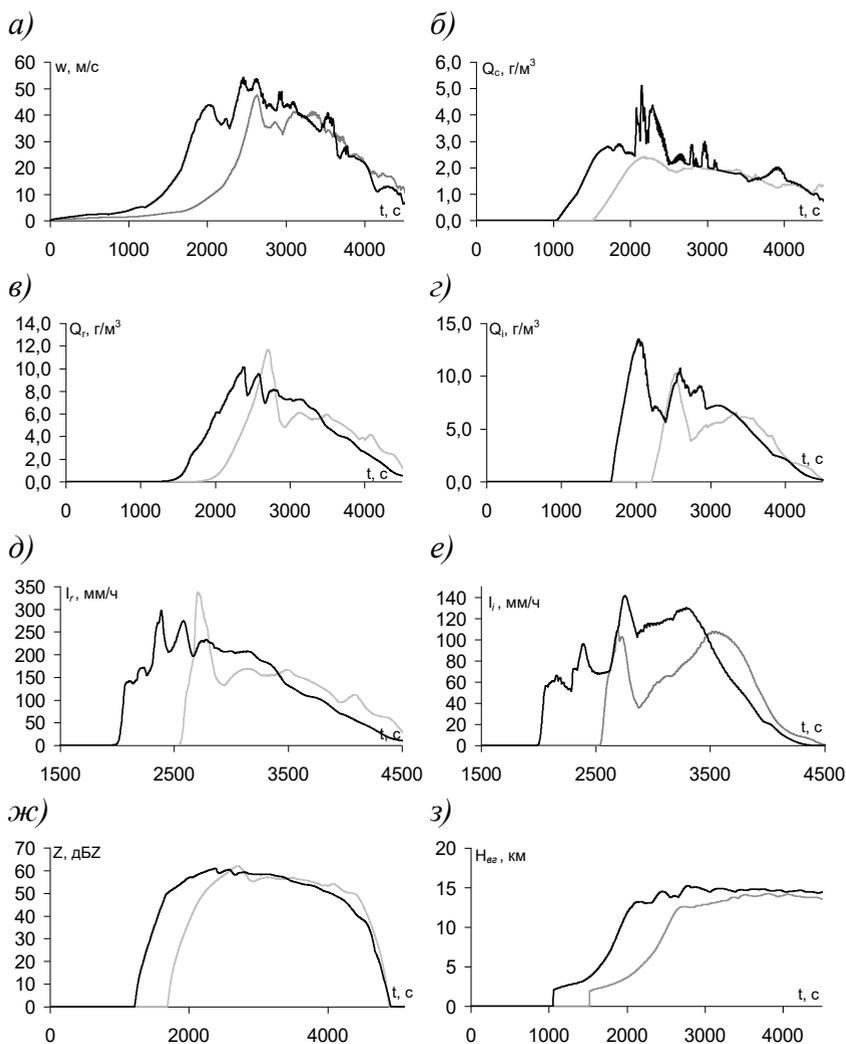


Рис. 6.15. Временной ход: *a* — максимального значения скорости вертикального потока; *б, в, г* — максимального значения водности облачных капель, водности дождевых капель и ледности твердых осадков соответственно; *д* — интенсивности дождя; *е* — интенсивности града; *ж* — максимального значения радиолокационной отражаемости; *з* — верхней границы облака. Черные кривые — случай Б, серые — случай А.

Все эти значения характерны для мощных грозо-градовых облаков. Отметим, что здесь и далее при расчете максимума  $Q_c$  не учитывалось появление облачных капель у подстилающей поверхности вследствие увлажнения воздуха выпадающими осадками (см. максимумы на графике на рис. 6.15б после  $t = 2000$  с).

Значение радиолокационной отражаемости  $Z$  достигает 62,0 дВЗ. Интенсивность дождя  $I_r$  и града  $I_i$  в максимуме составляет 337,7 и 108,5 мм/ч соответственно. Следует отметить, что это есть максимальные значения как во времени, так и в пространстве; область же выпадения осадков занимает малую площадь.

В случае Б всплывающие термики образуются над двумя перегретыми областями. Соответственно, развитие термиков приводит к образованию двух сливающихся облаков, которые смещаются вдоль оси  $x$  под действием фонового ветра. Из рис. 6.15 и табл. 6.4 видно, что слияние облаков способствует значительному усилению конвекции, росту вертикальной мощности облака, а также увеличению интенсивности образования и выпадения осадков. Высота верхней границы объединенного облака составляет 15,2 км (против 14,1 км в случае А). Максимальное значение скорости восходящего потока достигает 54,1 м/с (против 47,3), что, очевидно, является результатом взаимной подпитки облаков теплом, влагой и количеством движения. Кроме того, увеличение горизонтальных размеров объединенного облака ведет к уменьшению взаимодействия облака с окружающей средой (вовлечение, перемешивание), которое ослабляет конвекцию.

Динамика вертикальных движений играет определяющую роль в эволюции конвективных облаков, влияя, в том числе, и на процессы фазовых переходов. Вследствие более интенсивной конденсации абсолютный максимум  $Q_c$  по сравнению со

случае А увеличился с 2,4 до 2,8 г/м<sup>3</sup>. Для  $Q_t$  этот максимум, напротив, несколько уменьшился (10,1 против 11,7); это связано с менее сильным таянием градин. Для ледности последних абсолютный максимум составил 13,5 против 10,3 г/м<sup>3</sup>; таким образом, в случае Б образование града оказалось более интенсивным по сравнению с образованием дождя. Максимальная интенсивность града у Земли увеличилась (141,1 против 108,5 мм/ч), а дождя — уменьшилась (297,3 против 337,7 мм/ч). Еще раз отметим, что указанные значения являются пиковыми. Радиолокационная отражаемость по сравнению со случаем А уменьшилась (60,9 против 62,0 дБZ), так как дождевые капли, число которых уменьшилось, эффективнее отражают сигнал по сравнению с градинами таких же размеров. Меньшей оказалась и суммарная интенсивность осадков.

Таким образом, в указанном случае при слиянии облаков наблюдается перераспределение фазового состава осадков, при этом однозначного увеличения интенсивности осадкообразования не наблюдается (в отличие от рассмотренного ранее случая). Увеличивается содержание града и интенсивности града у подстилающей поверхности, однако уменьшаются значения аналогичных величин для дождя. По-видимому, это связано с тем, что восходящий поток оказывает неоднозначное влияние на формирование и выпадение осадков. С одной стороны, при более сильном восходящем потоке образуется более мощное облако, что способствует формированию большего количества осадков. С другой стороны, восходящий поток препятствует выпадению осадков вниз.

На рис. 6.16 — 6.21 показан вертикальный профиль водности облачных капель, водности дождевых капель и ледности градин соответственно для обоих случаев.

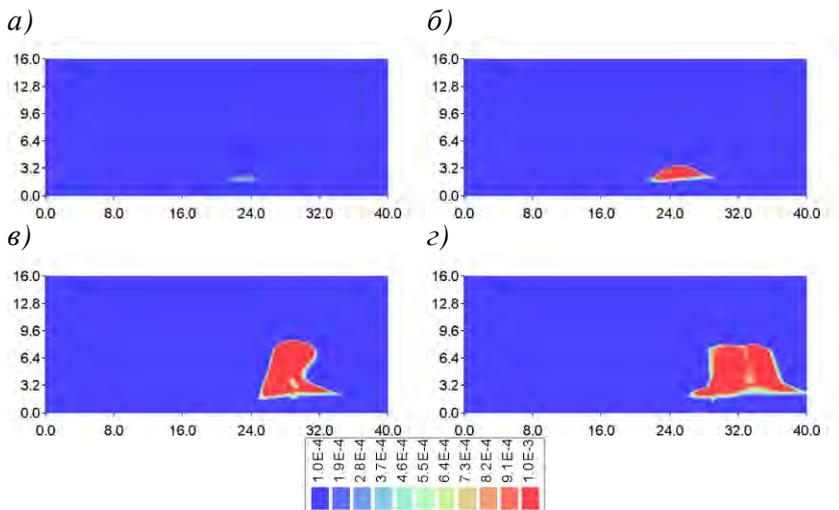


Рис. 6.16. Вертикальный профиль максимального по оси  $Y$  значения водности облачных капель в плоскости  $XZ$  в моменты времени: а) 1700 с; б) 2000 с; в) 2500 с; з) 3000 с. Случай А.

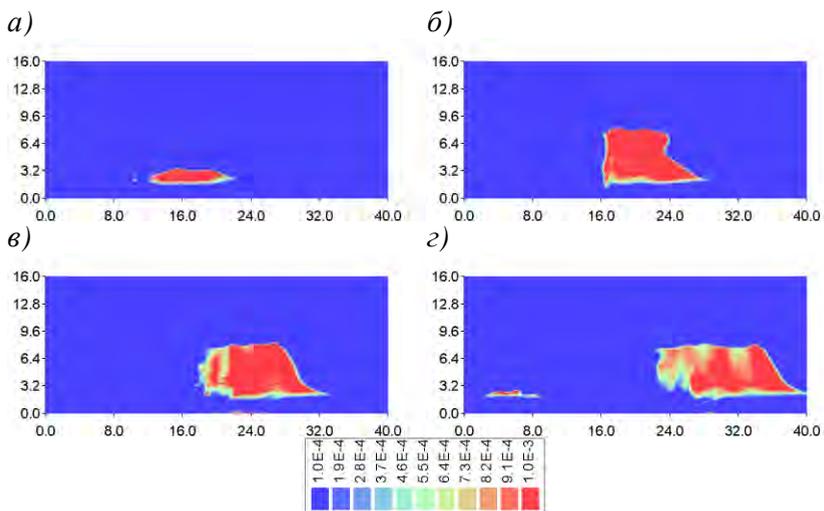


Рис. 6.17. Вертикальный профиль максимального по оси  $Y$  значения водности облачных капель в плоскости  $XZ$  в моменты времени: а) 1500 с; б) 2000 с; в) 2400 с; з) 3000 с. Случай Б.

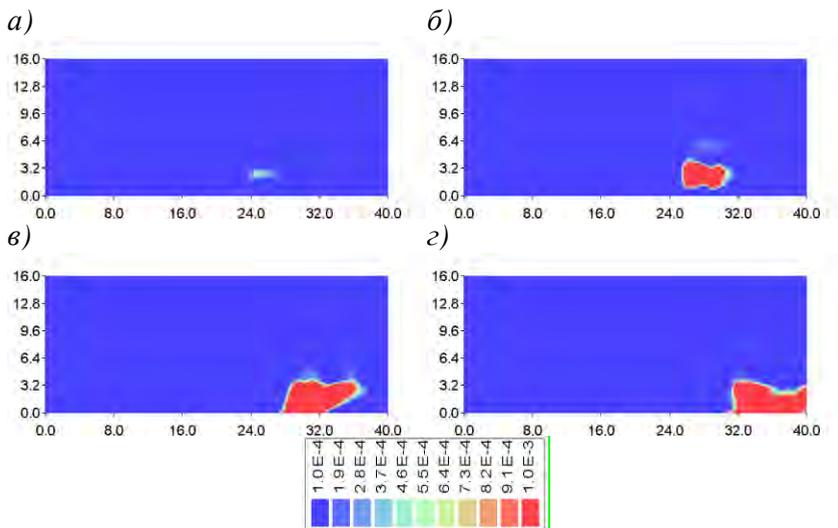


Рис. 6.18. Вертикальный профиль максимального по оси  $Y$  значения водности дождевых капель в плоскости  $XZ$  в моменты времени: а) 2000 с; б) 2500 с; в) 3000 с; г) 3500 с. Случай А.

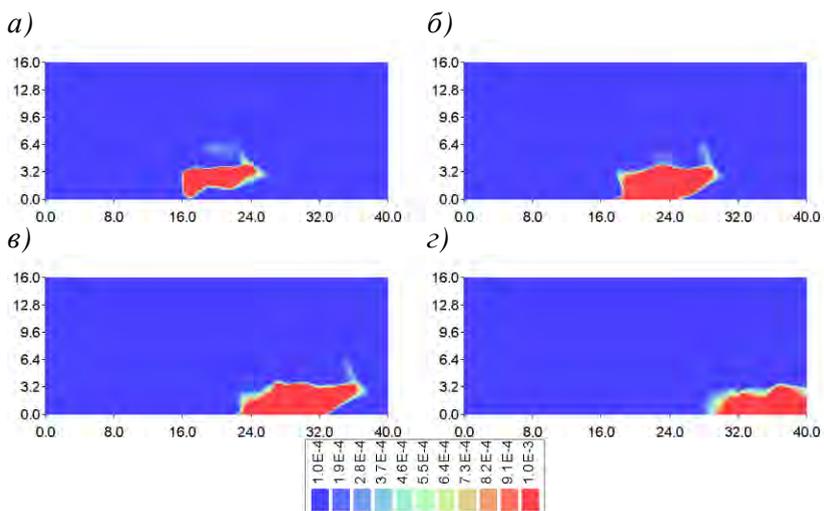


Рис. 6.19. Вертикальный профиль максимального по оси  $Y$  значения водности дождевых капель в плоскости  $XZ$  в моменты времени: а) 2000 с; б) 2400 с; в) 3000 с; г) 3600 с. Случай Б.

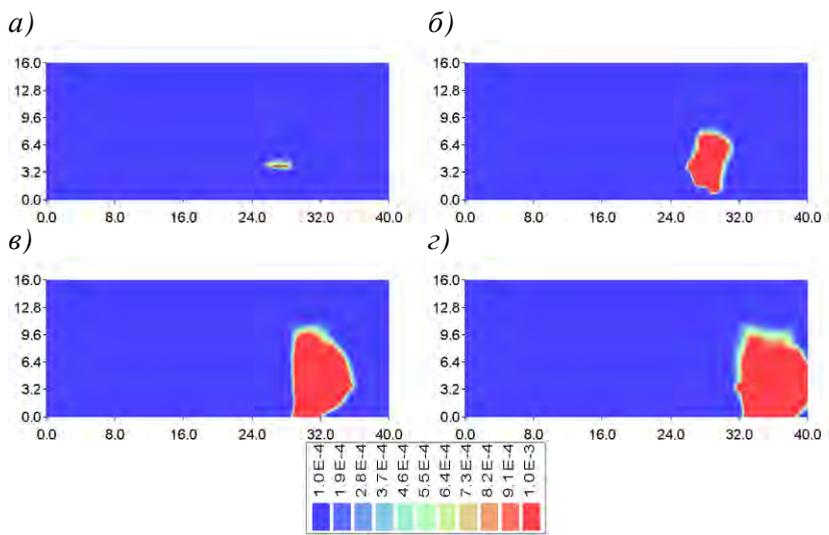


Рис. 6.20. Вертикальный профиль максимального по оси  $Y$  значения ледности градин в плоскости  $XZ$  в моменты времени: а) 2250 с; б) 2500 с; в) 3000 с; з) 3500 с. Случай А.

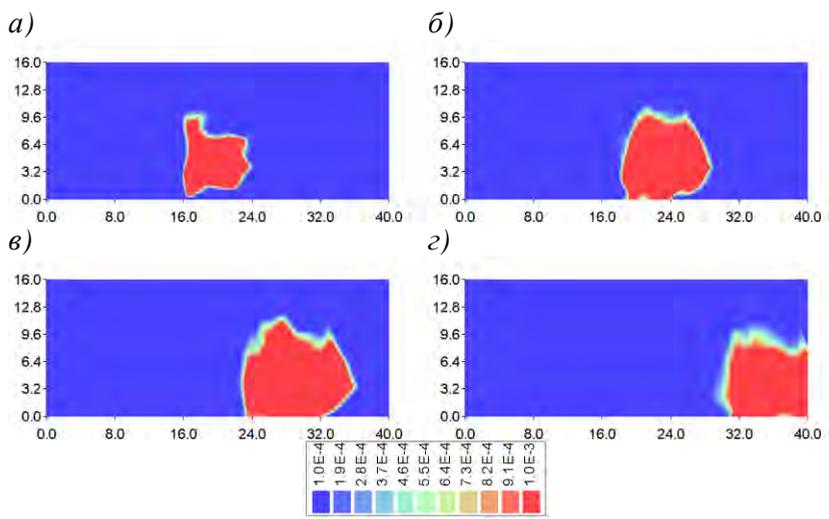
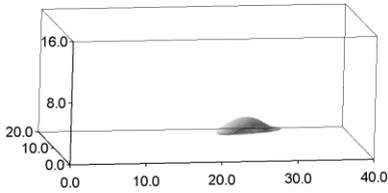
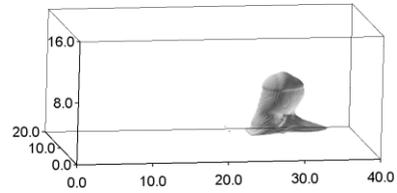


Рис. 6.21. Вертикальный профиль максимального по оси  $Y$  значения ледности градин в плоскости  $XZ$  в моменты времени: а) 2000 с; б) 2400 с; в) 3000 с; з) 3600 с. Случай Б.

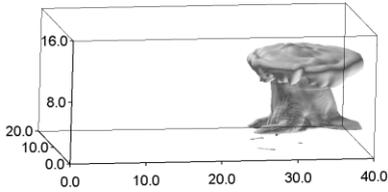
*a)*



*б)*



*в)*



*г)*

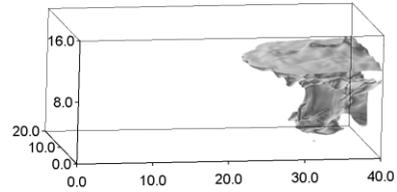
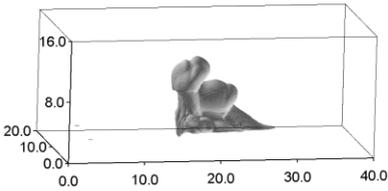
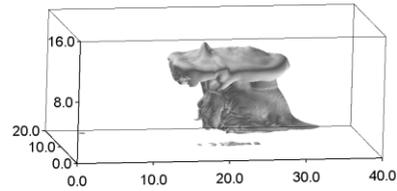


Рис. 6.22. Трехмерное изображение суммарного поля водности облачных капель и ледности облачных ледяных кристаллов в моменты времени: *a)* 2000 с; *б)* 2500 с; *в)* 3000 с; *г)* 3500 с. Изоповерхность 0,1 г/кг. Случай А.

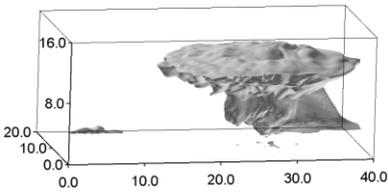
*a)*



*б)*



*в)*



*г)*

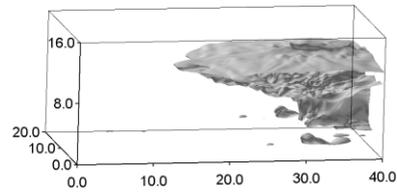


Рис. 6.23. Трехмерное изображение суммарного поля водности облачных капель и ледности облачных ледяных кристаллов в моменты времени: *a)* 2000 с; *б)* 2400 с; *в)* 3000 с; *г)* 3600 с. Изоповерхность 0,1 г/кг. Случай Б.

Представлено максимальное по оси  $Y$  значение величин в плоскости  $XZ$  для некоторых моментов времени, соответствующих разным стадиям эволюции облака (развития, стабилизации и диссипации). На рис. 6.22 и 6.23 приведено трехмерное изображение изоповерхности ( $0,1 \text{ г/кг}$ ) суммы водности облачных капель и ледности облачных ледяных кристаллов. В результате действия фонового ветра облако и зона осадков оказываются пространственно несимметричными. Для случая Б виден процесс слияния двух облаков, который происходит практически с момента их образования. Особенно хорошо процесс слияния виден на рис. 6.23а. На рисунке видно возникновение облачного моста. Эта перемычка, состоящая из слоистообразных облаков, неоднократно наблюдалась при слиянии облаков в природных условиях [Chin, Wilhelmson, 1998; Lee et al., 2006; Simpson, Westcott et al., 1980; Turpeinen, 1982; Danhong, Xueliang, 2006]. Сравнение рисунков для случаев А (рис. 6.16, 6.18, 6.20) и Б (рис. 6.17, 6.19, 6.21) демонстрирует рост размеров облака, усиление облачной конвекции и расширение области, охваченной осадками, в случае слияния облаков. Это соответствует реально наблюдаемым данным.

Представляют интерес коэффициенты экстремальности, то есть, отношения максимальных характеристик облака в случае Б по сравнению со случаем А. Результаты моделирования рассматриваемых облаков показали, что эти коэффициенты для данного случая составили соответственно: для скорости восходящего потока — 1,44; для водности облачных капель — 1,17; для водности дождевых капель — 0,86; для ледности градин — 1,31; для ледности облачных кристаллов — 1,06; для интенсивности дождя — 0,88; для интенсивности града — 1,30; для суммарной интенсивности осадков — 0,90.

Таким образом, не во всех случаях наблюдается увеличение водности и интенсивности осадков. Для данного случая получено уменьшение (хотя и незначительное) водности

дождевых капель и интенсивности дождя, а также суммарной интенсивности осадков по сравнению со случаем отдельного облака.

При этом важно подчеркнуть, что происходит существенное усиление осадков в виде града. Наряду с этим, прочие характеристики, как и следовало ожидать, увеличиваются, что говорит об усилении конвекции. Поведение характеристик облака и осадков для каждого индивидуального случая определяется атмосферной ситуацией, в частности, температурно-влажностным строением атмосферы.

Таким образом, на примере двух рассмотренных случаев (применительно к разным физико-географическим регионам) можно сделать вывод о том, что численное моделирование слияния облаков подтверждает факт существенного усиления облачной конвекции в результате слияния.

#### **6.4. Описание численной нестационарной модели облака малой размерности**

Рассмотренная выше численная нестационарная трехмерная модель конвективного облака является ресурсоемкой и требует больших вычислительных мощностей. Расчеты по этой модели на данном этапе развития вычислительной техники выполняются сравнительно медленно.

Альтернативным подходом является использование модели малой размерности, в которой выполняется осреднение физических величин по горизонтальным пространственным координатам. Такая модель не может описывать все многообразие динамических конвективных процессов, сопровождающих слияние облаков, однако вполне может использоваться для приближенных оценок характеристик сливающихся облаков и связанных с ними осадков.

Примером такой модели является численная нестационарная полуторамерная модель конвективного облака [Довгалюк и др., 2013]. Она включает систему уравнений гидротермодинамики несжимаемой среды в приближении Буссинеска, а также баланса субстанций (водяного пара, облачных капель, дождевых капель, облачных ледяных кристаллов, кристаллических осадков). Уравнения дополнены системой параметрических выражений для источников-стоков каждой из них вследствие фазовых переходов и коагуляции. Данная модель является полуторамерной: изменение всех величин рассматривается только вдоль вертикальной оси, при этом вдоль горизонтальных координат величины осредняются по сечению цилиндра заданного радиуса [Довгалюк и др., 2013]. Внутри цилиндра происходят процессы, связанные с образованием и развитием облака, а вне его границ все величины соответствуют невозмущенной атмосфере. При этом облако взаимодействует с окружающей атмосферой через боковую границу цилиндра за счет упорядоченного втока (оттока) и турбулентного перемешивания.

Входными данными указанной модели, так же, как и трехмерной, являются вертикальные профили температуры и влажности, получаемые из данных радиозондирования атмосферы, а также (в случае учета электрических процессов) профили концентрации ионов, характерные для условий хорошей погоды. Профиль ветра не используется, так как модель является осесимметричной. На выходе получается высотный и временной ход всех основных характеристик конвективного облака и связанных с ним осадков, в том числе скорость восходящего потока, водность, ледность, радиолокационная отражаемость и интенсивность осадков.

Система основных уравнений модели включает:

1. Уравнение движения

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2\alpha^2}{R} w|w| + \frac{2u_R}{R} (w - w_R) + \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial w}{\partial z} \right) + g \frac{T_v - T_{v0}}{T_{v0}} - g(Q_c + Q_r + Q_i), \quad (6.7)$$

где  $w$  — скорость восходящего потока,  $t$  — время,  $z$  — вертикальная координата,  $\alpha$  — коэффициент бокового турбулентного перемешивания,  $R$  — радиус цилиндра,  $u_R$  — радиальная составляющая скорости,  $w_R$  — скорость восходящего потока на границе цилиндра,  $\rho_a$  — плотность воздуха,  $K$  — коэффициент турбулентности в вертикальном направлении,  $g$  — ускорение свободного падения,  $T_v$  и  $T_{v0}$  — виртуальная температура внутри облачного цилиндра и во внешней среде соответственно,  $Q_c$ ,  $Q_r$ ,  $Q_i$  — отношение смеси облачных капель, дождевых капель и градин соответственно.

2. Уравнение неразрывности

$$\frac{2u_R}{R} + \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_a w) = 0. \quad (6.8)$$

3. Уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -w \left( \frac{\partial T}{\partial z} + \gamma_a \right) - \frac{2\alpha^2}{R} |w| (T - T_0) + \frac{2u_R}{R} (T - T_R) + \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + F_T, \quad (6.9)$$

где  $T$ ,  $T_0$  и  $T_R$  — температура воздуха внутри облачного цилиндра, во внешней среде и на боковой границе соответственно,  $\gamma_a$  — сухоадиабатический градиент температуры,  $F_T$  — источник — сток температуры.

4. Уравнение баланса отношения смеси водяного пара

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_v}{\partial t} = & -w \frac{\partial Q_v}{\partial z} - \frac{2\alpha^2}{R} |w| (Q_v - Q_{v0}) + \\ & + \frac{2u_R}{R} (Q_v - Q_{vR}) + \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial Q_v}{\partial z} \right) + F_v, \end{aligned} \quad (6.10)$$

где  $Q_v$ ,  $Q_{v0}$ ,  $Q_{vR}$  — отношение смеси водяного пара внутри облачного цилиндра, во внешней среде и на боковой границе соответственно.

5. Уравнение баланса отношения смеси облачных капель

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_c}{\partial t} = & -w \frac{\partial Q_c}{\partial z} - \frac{2\alpha^2}{R} |w| (Q_c - Q_{c0}) + \\ & + \frac{2u_R}{R} (Q_c - Q_{cR}) + \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial Q_c}{\partial z} \right) + F_c, \end{aligned} \quad (6.11)$$

где  $Q_{c0}$ ,  $Q_{cR}$  — отношение смеси облачных капель внутри облачного цилиндра и на его боковой границе соответственно,  $F_c$  — источник — сток облачных капель.

6. Уравнение баланса отношения смеси дождевых капель

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_r}{\partial t} = & -(w - V_r) \frac{\partial Q_r}{\partial z} - \frac{2\alpha^2}{R} |w| (Q_r - Q_{r0}) + \\ & + \frac{2u_R}{R} (Q_r - Q_{rR}) + \frac{Q_r}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_a V_r) + F_r, \end{aligned} \quad (6.12)$$

где  $Q_{r0}$ ,  $Q_{rR}$  — отношение смеси дождевых капель внутри облачного цилиндра и на его боковой границе соответственно,  $F_r$  — источник — сток дождевых капель,  $V_r$  — скорость седиментации дождевых капель.

Отметим, что уравнение неразрывности (6.8) записано в предположении несжимаемости среды, а значения коэффициента турбулентности приняты одинаковыми для всех субстанций, что в общем случае должно быть уточнено.

7. Уравнение баланса отношения смеси частиц кристаллических осадков

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_i}{\partial t} = & -(w - V_i) \frac{\partial Q_i}{\partial z} - \frac{2\alpha^2}{R} |w| (Q_i - Q_{i0}) + \\ & + \frac{2u_R}{R} (Q_i - Q_{iR}) + \frac{Q_i}{\rho_a} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_a V_i) + F_i \end{aligned}, \quad (6.13)$$

где  $Q_{i0}$ ,  $Q_{iR}$  — отношение смеси градин внутри облачного цилиндра и на его боковой границе соответственно,  $F_i$  — источник — сток градин,  $V_i$  — скорость седиментации градин.

В некоторых задачах ледяные частицы, аналогично каплям воды, подразделялись на две фракции: кристаллические осадки и облачный лед. В таком случае в систему добавлялось уравнение баланса отношения смеси облачных ледяных кристаллов  $Q_{ic}$  с источником — стоком  $F_{ic}$ , по форме аналогичное (6.11).

Для того, чтобы система (6.7) — (6.13) была замкнутой, она дополняется:

1. Уравнением состояния

$$p = \rho_a R_a T, \quad (6.14)$$

где  $p$  — давление воздуха,  $R_a$  — газовая постоянная сухого воздуха.

2. Уравнением гидростатики

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_a g, \quad (6.15)$$

3. Выражением для насыщающего значения отношения смеси водяного пара над плоской поверхностью воды  $Q_{ws}$

$$Q_{ws} = 3,8 \exp \left[ \frac{17,27(T - T_0^*)}{T - 35,86} \right] \frac{1}{p}, \quad (6.16)$$

где  $T_0^* = 273,15^\circ \text{C}$ .

4. Выражением для насыщающего значения отношения смеси водяного пара над плоской поверхностью льда  $Q_{is}$

$$Q_{is} = 3,8 \exp \left[ \frac{21,87(T - T_0^*)}{T - 8} \right] \frac{1}{p}. \quad (6.17)$$

Система уравнений 6.7 — 6.17 является замкнутой, если определены значения зависимых переменных в окружающей среде. Для каждой из переменных

$\varphi(z, t) = (w, Q_r, Q_i, Q_{ic}, Q_c, Q_v, T)$  предполагается

$$\begin{aligned} \varphi_R &= \varphi_0 & \text{при} & \quad u_R < 0, \\ \varphi_R &= \varphi & \text{при} & \quad u_R \geq 0. \end{aligned}$$

Граничные условия для  $\varphi(z, t)$  на нижней границе цилиндра (подстилающая поверхность) имеют вид:

$$\varphi(0, t) = \text{const} \quad \text{при} \quad 0 \leq t < \infty.$$

При этом значения величин  $Q_r$  и  $Q_i$ , при  $z = 0$  находятся из самого решения системы уравнений.

Граничные условия на верхней границе области решения имеют вид:

$$\Phi(H,t) = \text{const} \quad \text{при} \quad 0 \leq t < \infty.$$

Начальные условия для скорости восходящего потока и содержания всех фракций задаются нулевыми:

$$w(z,0) = 0;$$
$$Q_c(z,0) = Q_{ic}(z,0) = Q_r(z,0) = Q_i(z,0) = 0.$$

Функции  $T(z,0)$  и  $Q_v(z,0)$  вводятся в модель непосредственно в процессе ее реализации. Вертикальные профили температуры получают по данным температурно-ветрового зондирования. Значения отношения смеси водяного пара для каждой высоты рассчитываются с использованием данных о вертикальном распределении точки росы, которые также получают из данных температурно-ветрового зондирования.

Для инициализации модели необходимо смоделировать выведение атмосферы из заданного начального состояния. Для этого на начальные значения функций накладываются возмущения. Какими бы малыми они ни были, они могут играть роль не только спускового механизма, но и оказывать влияние на характеристики облаков и связанных с ним опасных явлений в течение некоторого времени. Используется наложение возмущений на вертикальные профили температуры, влажности и скорости восходящего потока. Для температуры задается перегрев воздуха в слое, примыкающем к подстилающей поверхности. Значение этого перегрева, строго говоря, зависит от локальных свойств подстилающей поверхности. В слое 1,0—1,2 км (эти высоты близки к наиболее часто

повторяющемуся значению уровня конденсации) обычно задается слой с относительной влажностью среды 100 %. В этом же слое может дополнительно задаваться начальное возмущение вертикальной скорости с амплитудой до 1,0 м/с.

Для решения системы уравнений применен метод расщепления по физическим процессам [Марчук, 1967]. Поиск решения на каждом шаге по времени подразделяется на два этапа. На первом этапе решается та часть задачи, которая описывает динамические процессы (конвективный перенос, взаимодействие с окружающей средой). Следуя [Orville et al, 1976], была выбрана модифицированная схема «вперед по времени и вверх против потока». На втором этапе рассчитываются окончательные значения искомых функций с учетом микрофизических процессов. В работе [Довгалюк и др., 2013] приведены условия сходимости численной схемы.

## **6.5. Результаты моделирования слияния облаков с помощью модели малой размерности**

### **6.5.1. Эксперимент на Северо-Западе России (2015 г.)**

С помощью полутримерной модели проанализирован случай слияния облаков, который наблюдался 3 августа 2015 г. в районе г. Санкт-Петербурга [Синькевич и др., 2018a]. В этот день велись радиолокационные, наземные и спутниковые наблюдения за облаками и осадками. Результаты натурных измерений характеристик облаков представлены в главе 2. Вертикальные профили температуры и влажности в атмосфере приведены в табл. 6.5.

В используемой модели нет возможности моделировать взаимодействие двух облаков, поэтому физические эффекты, связанные со слиянием, моделировались путем увеличения радиуса облака  $R$ . Он входит в члены уравнений модели, описывающие процессы упорядоченного втока (оттока)

субстанций и турбулентного перемешивания облака с окружающей атмосферой [Довгалюк и др., 2013]. Физически увеличение радиуса означает уменьшение вклада взаимодействия облака с окружающей атмосферой (вовлечение, перемешивание) в процесс его эволюции.

Таблица 6.5

**Вертикальные профили температуры и влажности, полученные по данным радиозондирования атмосферы (п. Воейково, 03.08.2015 г.)**

$p$ , ГПа	$T$ , °С	$T_d$ , °С	$p$ , ГПа	$T$ , °С	$T_d$ , °С
1007,0	11,2	9,6	500,0	-20,9	-31,9
990,0	13,0	11,8	486,0	-22,7	-32,7
960,0	14,4	11,0	445,0	-23,3	-33,3
925,0	11,2	7,9	400,0	-27,3	-32,0
896,0	10,6	9,3	370,0	-31,3	-33,2
850,0	5,4	4,2	350,0	-34,5	-35,5
804,0	3,0	1,9	300,0	-43,7	-44,9
764,0	-1,5	-2,4	268,0	-47,9	-49,6
730,0	-3,3	-3,5	250,0	-50,5	-52,5
700,0	-7,1	-9,3	228,0	-49,5	-51,8
650,0	-9,9	-14,8	200,0	-46,7	-50,1
624,0	-9,9	-21,9	176,0	-46,4	-51,4
606,0	-10,1	-22,1	150,0	-46,1	-53,1

В целом результаты моделирования (табл. 6.6) показали, что при увеличении  $R$ , что эквивалентно слиянию облаков, возрастают высота верхней границы облака, скорость восходящего потока, водность, ледность и радиолокационная

отражаемость, а также интенсивность осадков. Единственное исключение составляет ледность облачных кристаллов, которая, достигнув 1,25 г/кг при радиусе 3,5 км, далее несколько уменьшается.

Таблица 6.6

**Зависимость абсолютных максимумов основных характеристик облака в зависимости от его радиуса**

$R$ , м	$H_{вг}$ , км	$w$ , м/с	$Q_c$ , г/м <sup>3</sup>	$Q_r$ , г/м <sup>3</sup>	$Q_i$ , г/м <sup>3</sup>	$Q_{ic}$ , г/м <sup>3</sup>	$I$ , мм/ч	$Z$ , дБZ
200	4,0	8,2	0,90	0,05	0,01	0,00	0,0	20,1
300	4,2	11,0	1,16	0,10	0,03	0,00	0,0	23,9
400	4,4	12,9	1,33	0,13	0,07	0,00	0,0	25,6
500	4,8	14,4	1,46	0,17	0,14	0,00	0,0	26,2
1000	6,0	18,3	1,83	0,35	0,75	0,00	1,7	35,0
1500	6,6	20,0	2,02	0,66	1,47	0,00	7,4	39,9
2000	6,8	21,0	2,14	0,95	2,06	0,00	13,3	42,5
2500	7,0	21,6	2,22	1,15	2,54	0,00	18,5	44,2
3000	7,0	22,0	2,27	1,30	2,92	0,00	23,1	45,0
3500	7,2	22,3	2,31	1,42	3,25	1,25	26,9	45,5
4000	7,2	22,6	2,34	1,52	3,52	1,13	30,0	46,1
4500	7,4	22,8	2,37	1,60	3,77	1,06	32,7	46,6
5000	7,4	22,9	2,39	1,66	3,98	1,08	35,1	46,9
5500	7,6	23,1	2,41	1,71	4,15	1,11	37,5	47,2
6000	7,6	23,2	2,42	1,75	4,30	1,14	39,5	47,3

$Z$  – радиолокационная отражаемость,  $I$  – интенсивность осадков (и то, и другое – для дождя и града в сумме).

При увеличении радиуса свыше 3 км максимальные значения высоты верхней границы, скорости восходящих потоков, ледности градин и отражаемости с ростом  $R$  перестают значительно меняться. Указанный ход характеристик объясняется тем, что с ростом горизонтальных размеров облака уменьшается роль его взаимодействия с окружающей средой (вовлечение, перемешивание), и процесс его эволюции приближается к адиабатическому.

Высота верхней границы облака по результатам моделирования оказалась меньше на 1—2 км, чем по радиолокационным данным, и соответствует той, которая получена при анализе результатов радиозондирования и данным радиометрических измерений со спутника. Она меняется в пределах  $6,8 \div 7,6$  км в зависимости от радиуса облака. Слияние облаков привело к очень небольшому ее увеличению.

Значения интенсивности осадков, полученные из данных моделирования и результатов измерений, достаточно сильно различаются. Однако, если проследить за трендом изменения интенсивности осадков во времени, то видно, что после слияния облаков в течение 20 мин наблюдается увеличение интенсивности осадков примерно на 30 % по сравнению с моментом до слияния.

Для моделирования характеристик реально наблюдаемого облака в процессе слияния за каждый из рассмотренных интервалов по радиолокационным измерениям рассчитывался радиус облака  $R$  в допущении, что облако имеет форму окружности [Синькевич и др., 2018a]. Далее одновременно анализировались значения основных характеристик облаков для рассматриваемого дня по данным радиолокационных, радиометрических и грозопеленгационных измерений, а также по результатам численного моделирования с помощью полугорамерной модели (табл. 6.7) (время указано отрицательное — до момента слияния облаков, положительное

— после него). В таблице приведены максимальные значения основных смоделированных характеристик за период слияния.

Таблица 6.7

**Характеристики облаков по данным радиолокационных, радиометрических и грозопеленгационных измерений и по модельным расчетам (числитель и знаменатель — сливающиеся облака 1 и 2 соответственно)**

Время, мин	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
Площадь облака, км <sup>2</sup>	130/ 14	80/ 44	48/ 58	30/ 80	164	168	97	69	47
Максимальная радиолокационная отражаемость по натурным данным, дБZ	50,5/ 41,0	49,0/ 55,5	46,0/ 51,5	44,0/ 48,5	54,0	52,5	58,5	52,5	47,5
Максимальная радиолокационная отражаемость по данным численного моделирования, дБZ	47,3/ 42,5	46,9/ 45,5	46,1/ 46,6	45,0/ 46,9	47,9	47,9	47,2	46,6	46,1
Высота верхней границы облака по натурным данным, км	8,0/ 9,0	8,8/ 8,8	8,0/ 8,6	8,0/ 9,0	9,8	9,0	9,6	8,7	7,7
Высота верхней границы облака по данным численного моделирования, км	7,6/ 6,8	7,4/ 7,2	7,2/ 7,4	7,0/ 7,4	7,6	7,6	7,6	7,4	7,2
Высота уровня максимальной отражаемости, км	1,1/ 2,0	1,0/ 1,1	1,0/ 1,0	1,1/ 1,3	1,2	1,0	1,1	0,7	0,9
Интенсивность осадков по натурным данным, мм/ч	29,1/ 7,2	23,6/ 58,5	15,5/ 33,5	12,6/ 22,0	47,4	38,5	89,0	38,5	19,2
Интенсивность осадков по данным численного моделирования, мм/ч	39,5/ 13,3	35,1/ 26,9	30,0/ 32,7	23,1/ 35,1	45,4	45,4	37,5	32,7	30

К ним относятся: радиолокационная отражаемость, высота верхней границы облака и интенсивность осадков у земли. Из таблицы видно, что значения максимальной радиолокационной отражаемости облаков, полученные из результатов моделирования, отличаются от полученных из измерений на  $-10 \div +1,5$  дБZ. Разница весьма существенная и может быть связана со сложностью расчета радиолокационной отражаемости. В отличие от данных натуральных экспериментов, когда после слияния резко увеличилась отражаемость, в модельных расчетах это увеличение незначительно.

Высота верхней границы облака по результатам моделирования меньше на 1—2 км, чем по радиолокационным данным и соответствует той, которая получена при анализе результатов радиозондирования, и данным радиометрических измерений со спутника. Она меняется в пределах 6,8—7,6 км в зависимости от радиуса облака. Слияние облаков привело к очень небольшому ее увеличению.

Значения интенсивности осадков, полученные из данных моделирования и результатов измерений, также в большинстве случаев достаточно сильно различаются. Эти различия могут превосходить  $\pm 100$  %. Однако, если проследить за трендом изменения интенсивности осадков во времени, то видно, что после слияния облаков в течение 20 мин наблюдается ее увеличение примерно на 30 % по сравнению с моментом до слияния.

В целом результаты моделирования показали, что при увеличении  $R$ , что наблюдается при слиянии облаков, возрастают высота верхней границы объединенного облака, скорость восходящего потока, водность, ледность и радиолокационная отражаемость, а также интенсивность осадков. Единственное исключение составляет ледность облачных кристаллов, которая достигает 1,25 г/кг при  $R = 3,5$  км, а далее несколько уменьшается. При увеличении

радиуса свыше 3 км максимальные значения высоты верхней границы, скорости восходящих потоков, ледности градин и отражаемости с ростом  $R$  перестают значительно меняться. Указанный ход характеристик объясняется тем, что с ростом горизонтальных размеров облака уменьшается роль его взаимодействия с окружающей средой (вовлечение, перемешивание), и процесс его эволюции становится похож на адиабатический.

### 6.5.2. Эксперимент на Северо-Западе СССР (1985 г.)

10 июля 1985 г. выполнялся эксперимент по активному воздействию на конвективные облака. В качестве объекта исследований была выбрана группа мощных кучевых облаков [Синькевич, 2001]. Исследования осуществлялись с использованием оборудованного самолета-лаборатории Ил-14 [Звонарев и др., 1986; Довгалюк и др., 1990].

Полет проходил в районе г. Тихвин Ленинградской области. Погода в этот день определялась тыловой частью фронта окклюзии по типу теплого. В районе работы наблюдалось 8 баллов  $As$  с высотой верхней границы  $H_{вр} = 3,5$  км и несколько мощных кучевых облаков с  $H_{вр} = 4,1$  км, нижняя граница последних располагалась на высоте 1,0 км. На высоте 4,1 км был зафиксирован задерживающий слой. Его мощность составляла 0,2 км, а интенсивность по температуре (разность температур на верхней и нижней границах инверсии) —  $0,4^{\circ}C$ . Он препятствовал вертикальному развитию мощных кучевых облаков.

Для проведения эксперимента было выбрано одно из  $Cu\ congestus$ , и самолет совершил проход через облако на высоте 3,6 км. В нем было зафиксировано наличие переохлажденных капель (наблюдалось интенсивное обледенение самолета). При пересечении облака на него было проведено воздействие

льдообразующим реагентом: введено шесть пиропатронов с фтороглюцином ( $240 \text{ г}$  реагента с активностью  $4,0 \cdot 10^{13} \text{ г}^{-1}$ ). Температура на уровне воздействия составляла  $-7,8^\circ\text{C}$ . В дальнейшем наблюдения за облаком продолжались в течение 1,5 ч и закончились в 12 ч 47 мин.

Воздействие привело к резкому изменению вертикальной составляющей напряженности электрического поля (от  $-15 \text{ кВ/м}$  во время 1-го прохода до  $30 \text{ кВ/м}$  во время 2-го). Облако преодолело задерживающий слой, был отмечен его интенсивный рост, и в 11 ч 22 мин (3-й проход) оно перешло в Сб (рис. 6.24).

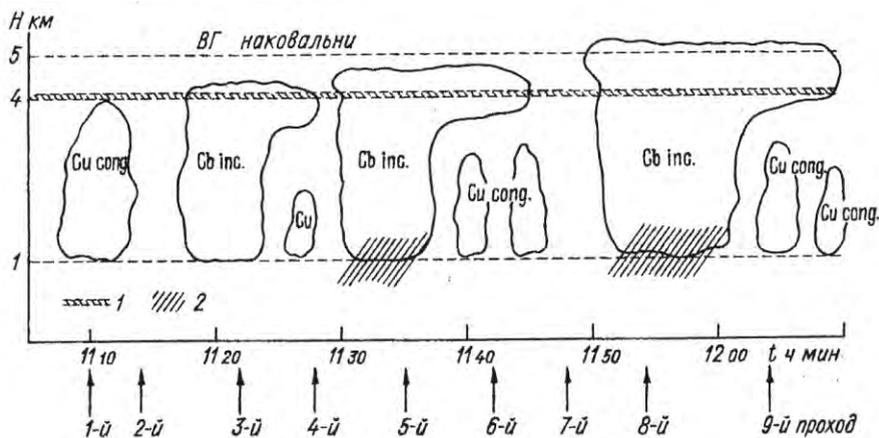


Рис. 6.24. Схема эволюции облаков в эксперименте 10 июля 1985 г.  
1 — задерживающий слой; 2 — осадки.

Во время 3-го прохода в 11 ч 14 мин произошло слияние исследуемого облака с соседним, развивавшимся в непосредственной близости. Дальнейшее его развитие было связано с процессами слияния с фидерными облаками, которые развивались в непосредственной близости.

На 8-м проходе (в 11 ч 54 мин) был зарегистрирован внутриоблачный разряд.

Было осуществлено моделирование облака. При этом его радиус  $R$  выбирался таким образом, чтобы максимальная верхняя граница облака в численном и натурном экспериментах совпадала [Довгалюк и др., 1990]. Исходя из этого были выбраны два значения  $R$  (500 м и 1000 м). Первый соответствовал облаку, подвергнутому воздействию, а второй — кучево-дождевому облаку, образовавшемуся в результате слияния нескольких.

Результаты расчетов представлены на рис. 6.25 и 6.26. Из рисунков видно, что при естественной эволюции облако с  $R = 500$  м достигает на 45-й минуте максимума вертикального развития ( $H_{\text{вг}} = 4,6$  км). Далее оно находится в стационарном состоянии. Высота его верхней границы, а также максимумы скорости, влажности облачных капель и осадков не меняются со временем.

Такой характер развития обусловлен особенностями строения атмосферы, в частности наличием задерживающего слоя, который ограничивает вертикальное развитие облаков достаточно малого радиуса.

Воздействие в численных экспериментах проводилось в момент времени, когда верхняя граница облака достигла высоты 4,1 км.

Анализ результатов расчетов показал, что воздействие приводит к резкому, хотя и непродолжительному, увеличению высоты верхней границы облака, радиолокационной отражаемости и скорости восходящего потока. Так, через 5 мин после введения реагента значение  $H_{\text{вг}}$  возросло на 800 м и составило 5 км, то есть, воздействие привело к прорыву облаком задерживающего слоя, что подтверждает данные самолетного эксперимента.

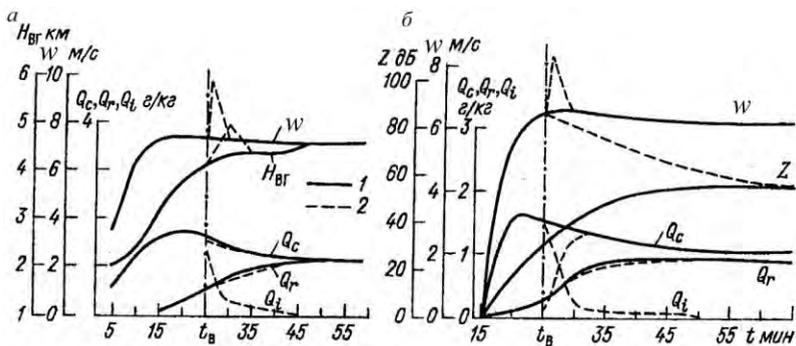


Рис. 6.25. Временной ход максимальных значений скорости восходящего потока  $w$ , отношения смеси облачных капель, дождевых капель и частиц кристаллических осадков, высоты верхней границы облака  $H_{BG}$  и радиолокационной отражаемости  $Z$  по результатам численного моделирования (а) и данным измерений на высоте полета самолета (б).

1 — естественное развитие; 2 — развитие при воздействии;  
 $t_B$  — момент воздействия.

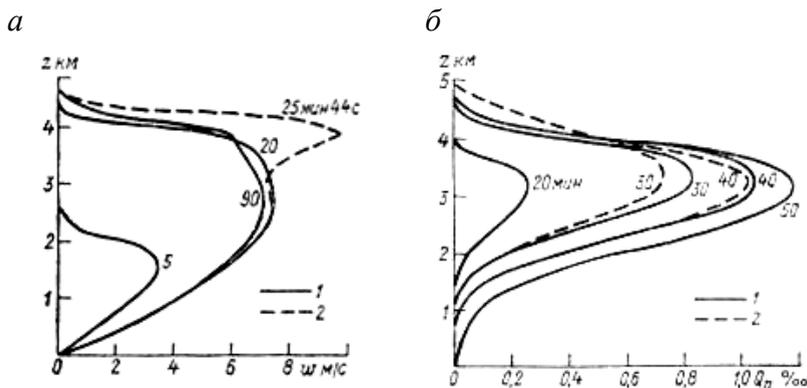


Рис. 6.26. Изменение во времени вертикального профиля скорости восходящего потока (а) и вертикального профиля отношения смеси дождевых капель (б).

1 — естественное развитие; 2 — развитие при воздействии.

После воздействия наблюдалось резкое увеличение радиолокационной отражаемости  $Z$  за счет появления частиц кристаллических осадков. В натурном эксперименте радиоэхо от облака появляется через 4 мин после введения реагента, то есть, так же, как и в расчетах, наблюдается резкое увеличение  $Z$  в результате воздействия.

Через 44 с после введения реагента значение максимума  $w$  составило 9,4 м/с, что почти на 2 м/с больше, чем значение абсолютного максимума скорости при естественном развитии (рис. 6.26а).

Проведение воздействий практически не повлияло на характеристики осадков в подоблачном слое (рис. 6.26б). Максимальная интенсивность и количество осадков на поверхности увеличились незначительно.

В рамках использованной модели в явном виде описать эволюцию сливающихся облаков не представляется возможным, поэтому процесс моделировался заданием облака с бóльшим радиусом (1000 м).

Результаты расчетов показали, что облако с таким радиусом практически «не чувствует» наличия задерживающего слоя: его верхняя граница достигает высоты 6,4 км за 45 мин и далее не увеличивается. Это совпадает с данными натурального эксперимента, в котором  $C_b$ , образовавшееся в результате слияния с облаками  $C_u$  *cong*, выросшими под наковальной материнского облака, достигает высоты 6 км.

Таким образом, в результате анализа данных численного моделирования получено:

1. Развитие моделируемого облака ( $R = 500$  м) завершается стадией стабилизации, длительность которой составляет более 1,0 ч.
2. Воздействие на облако в натурном эксперименте было проведено на стадии его стабилизации.

3. Воздействие привело к росту характеристик облака, который, однако, прекратился через 10 мин после воздействия.

4. Воздействие на облако с  $R = 500$  м не привело к выпадению осадков на подстилающую поверхность.

5. Наличие задерживающего слоя ограничивало вертикальное развитие *Cu cong*.

Совместный анализ данных натурного и численного экспериментов показал следующее.

1. После воздействия происходит рост высоты верхней границы облака, а также рост радиолокационной отражаемости.

2. В отличие от данных численного эксперимента, в котором в первые 5 мин после воздействия значения вертикальной скорости, влажности и перегрева оказались больше, чем при естественном развитии облака, в натурном эксперименте их значения после воздействия оказались меньше, чем до него. По-видимому, это связано с особенностями строения исследуемого облака (во время 2-го прохода в нем было отмечено наличие двух ячеек; вершина одной из них была закристаллизована в результате воздействия, вторая имела капельное строение).

При этом в натурном эксперименте образование облака происходило в результате слияния нескольких мощных кучевых облаков с кучево-дождевым, сформировавшимся в результате воздействия. Это привело к увеличению горизонтальной протяженности облака и прорыву его вершины через задерживающий слой. Последнее подтверждается данными численного моделирования, в результате которого получено, что облако большой горизонтальной протяженности мало ощущает наличие задерживающего слоя.

### 6.5.3. Эксперимент в центральной части Индии (2004 г.)

В работе [Краус и др., 2007] был описан случай слияния облаков, который наблюдался в центральной Индии 28.09.2004 г., его краткое описание приводится также в главе 5. Компания WMI inc в 2004 г. проводила воздействия на облака в провинциях Махараштра и Андхра Прадеш в Индии. Основной целью воздействий было увеличение количества осадков во время муссонного периода из Си. Был выполнен физический анализ изменений характеристик долгоживущего тропического кучево-дождевого облака (наблюдения выполнялись почти 6 часов), полученных радиолокационным методом, и осуществлено моделирование эволюции облака с помощью численной модели.

Моделирование активного воздействия осуществлялось путем варьирования радиуса облака  $R$ , который в модели является параметром. Тем самым воспроизводилось слияние конвективных ячеек, имевшее место в реальных условиях, в том числе и при воздействии. В результате моделирования получено, что при увеличении  $R$  возрастают мощность облака, скорость восходящего потока, водность, радиолокационная отражаемость и интенсивность осадков. Зависимость этих величин от  $R$  приведена в табл. 6.8.

Результаты расчетов естественного цикла развития облака показали следующее. Начиная с радиуса 1 км, имеет место значительное развитие облака, его верхняя граница превышает 10 км, и наблюдаются интенсивные осадки. Радиус облака оказывает существенное влияние на все характеристики. Так, начиная с  $R=10$  км, верхняя граница облака превышает 15 км (это — максимальная высота расчетной области в данной модели).

Напомним, что по результатам наблюдений  $H_{\text{вг}} > 18$  км. Вертикальные скорости в облаке очень велики и достигают

почти 50 м/с для облака с большим радиусом. Максимальное значение водности также велико — 7,7 г/м<sup>3</sup>.

Таблица 6.8

**Максимальные значения величин в облаке  
в период его развития в зависимости от радиуса облака**

$R$ , м	$H_{вг}$ , км	$w$ , м/с	$Q_w$ , г/м <sup>3</sup>	$Q_c$ , г/м <sup>3</sup>	$Q_r$ , г/м <sup>3</sup>	$Q_i$ , г/м <sup>3</sup>	$Z$ , дБZ	$Z_r$ , дБZ	$Z_i$ , дБZ	$I_r$ , мм/ч
500	4,8	13,4	1,3	1,2	0,5	0,0	37	37	0	0,0
1000	10,0	20,7	3,2	2,1	2,8	1,1	63	51	63	19,4
2000	12,6	29,6	5,1	2,6	4,9	3,0	70	55	70	60,7
3000	13,0	34,6	5,8	2,8	5,7	3,6	72	56	72	74,6
5000	13,2	40,4	6,8	3,0	6,7	4,7	74	58	74	97,6
10000	>15,0	45,3	7,3	3,1	7,3	5,4	75	58	75	116,6
25000	>15,0	49,1	7,7	3,1	7,7	5,8	75	59	75	126,8

Здесь  $Q_w$  — максимальная суммарная водность,  $Z_r$ ,  $Z_i$  — максимальная отражаемость дождевых капель и градин соответственно,  $I_r$  — интенсивность дождя.

Модель дает значительную водность как жидких, так и твердых осадков. Однако из исследуемого облака твердые осадки не выпадали, хотя крупа была зарегистрирована пилотами при пересечении облака. Высокие значения радиолокационной отражаемости, полученные из результатов расчетов, указывают на существенную роль твердых частиц в суммарном значении отражаемости облака. В реальных условиях роль ледяной фракции была значительно ниже. Однако даже если рассматривать только отражаемость, связанную с жидкими осадками, то модельные значения намного превосходят те, которые отмечались в эксперименте. Кроме

того, интенсивность осадков по результатам численного моделирования в несколько раз превосходит реально зафиксированную в облаке радиолокатором. Причина может быть связана с тем, что необходима некоторая настройка модели под специфические условия Индии, что может быть сделано на большом статистическом материале. Тем не менее, результаты моделирования качественно подтверждают то, что наблюдалось в натуральных условиях. В частности, слияние облаков при естественном развитии и после воздействия в натуральных условиях стимулировало вертикальное развитие, приводило к увеличению интенсивности осадков. Модельные расчеты подтвердили этот результат. Например, увеличение радиуса облака с 2 до 3 км (это может соответствовать процессу слияния с фидерным облаком) привело к росту высоты вершины облака на 400 м, наблюдалось увеличение максимального значения скорости восходящего потока на 5 м/с, интенсивность осадков возросла на 23 %. Последний результат важен, так как он в значительной степени определяет эффективность выполненных воздействий, которые стимулировали развитие фидерных облаков, далее наблюдалось их слияние с основным облаком и его дальнейшее развитие по вертикали, а следовательно — увеличение осадков.

Таким образом, моделирование слияния облаков параметрическим способом с помощью полуторамерной модели показало, что слияние приводит к усилению облачной конвекции за счет уменьшения потерь плавучести из-за обмена облака с окружающей атмосферой (вовлечение, перемешивание). При этом увеличение горизонтального размера облака при слиянии, начиная с некоторого момента, перестает приводить к дальнейшему увеличению характеристик облака и осадков. Связано это с тем, что при больших радиусах облака вовлечение и перемешивание становятся пренебрежимо малыми.

## Заключение

На протяжении долгого времени авторы данной монографии в экспериментах наблюдали, что конвективные облака могут сливаться. При этом происходило усиление конвекции, выражавшееся в развитии облака по вертикали и увеличении осадков. Эти явления нашли отражение в ряде статей, хотя упор в них делался на изучение других физических явлений. Обычно при анализе экспериментов авторы выполняли численное моделирование облаков. Даже относительно простая полуторамерная модель конвективного облака показывала, что слияние представляет собой очень важное физическое явление, приводящее к появлению более мощных облаков со всеми вытекающими отсюда последствиями.

В 2008—2009 гг., участвуя в работах WMI inc по воздействиям на облака в Саудовской Аравии, авторы впервые по-настоящему заинтересовались этим явлением и выполнили несколько исследований, включая статистический анализ характеристик облаков после их слияния. В дальнейшем интерес к этой проблеме нарастал, появлялись новые статьи, и результатом выполненных работ стала эта монография.

Из результатов литературного обзора и исследований авторов монографии можно сделать следующие выводы.

Слияние облаков может происходить в результате нескольких физических механизмов:

1. Если облака находятся рядом и происходит их развитие по вертикали (обычно это сопровождается и увеличением горизонтальных размеров), то они могут слиться в силу простого увеличения размеров.

2. Локальные неоднородности поля давления из-за вращения облаков или вертикальных нисходящих потоков, связанных с выпадающими осадками, также могут приводить к слиянию.

3. Движение облаков в поле ветра происходит неодинаково. Облака движутся непрямолинейно, это также является одной из возможных причин слияния.

4. В мультячейковых облаках часто происходит взаимодействие ячеек. На смену старой ячейке, из которой выпадают осадки, приходит новая – развивающаяся. Их взаимодействия приводит к слиянию; в ряде случаев формируется суперячейковое облако.

Вопрос о том, какой механизм является доминирующим, не решен, хотя, вполне возможно, что в зависимости от атмосферных условий и характеристик подстилающей поверхности может работать тот или иной из них.

Размеры сливающихся облаков сильно различаются. Это могут быть просто мощные кучевые облака небольшой вертикальной протяженности с высотой верхней границы 5—7 км, что наблюдалось на северо-западе России и в Индии, а могут быть и громадные кучево-дождевые облака тропических районов с высотой верхней границы 15—18 км (Индия, Саудовская Аравия).

При слиянии облаков между ними появляется перемычка — облачный мост. Она наблюдается либо вблизи основания облака, либо на средних высотах в тропосфере. Соединяя сливающиеся облака, она обеспечивает попадание облачных капель, кристаллов, крупы и града из одного облака (обычно более старого) в другое, тем самым существенно деформируя спектр частиц этого облака. Видимо, этот механизм может приводить к формированию крупных частиц града.

Последствия слияния облаков, как отмечено выше, связаны с существенным усилением конвекции. За счет увеличения размеров облака уменьшается взаимодействие облака с окружающей атмосферой (вовлечение, перемешивание), которое ослабляет конвекцию. Практически все исследования показывают, что после слияния происходит развитие облака по

вертикали, которое может быть весьма значительным и составлять несколько километров. Облака могут пробивать задерживающие слои и достигать тропопаузы. Увеличивается скорость вертикальных движений, водность, размеры частиц, интенсивность осадков. Это увеличение может достигать 100 и более процентов. Наличие облачных частиц, попавших из старого облака в новое, развивающиеся по вертикали, способствует формированию града. Всё это может приводить к появлению опасных явлений в облаках. Пока выполнено мало исследований, позволяющих судить об изменении электрической активности объединенного облака, однако имеющиеся данные позволяют утверждать, что происходит увеличение частоты молний примерно на 20 %.

Очень важным является вопрос об эффективности активных воздействий на облака, которые проводятся на одно из них или оба перед их слиянием. Можно ли с помощью имеющихся технологий влиять на процесс объединения облаков или получать положительный эффект после их объединения (например усиление осадков)?

Если судить по тем статистическим данным, которые приводятся в данной монографии, то ответ — нет. Нам не удалось получить положительный ответ, который имел бы уровень значимости в 5 %, принятый в статистике. Однако это не означает, что воздействия не эффективны.

Здесь надо сделать важное замечание. Использование методов математической статистики при оценке эффективности воздействий требует очень больших рядов наблюдений, которые достаточно редко удается реализовать в реальных работах по воздействиям. Авторы, используя измерения в Саудовской Аравии, попытались определить, какое количество экспериментальных единиц надо иметь для статистически обоснованных выводов об эффективности воздействий. В качестве исследуемых характеристик были взяты значения

максимальной отражаемости облака за жизненный цикл и поток осадков. Далее группы были поделены пополам и в одной из них (с воздействиями) эти характеристики были увеличены на 20 % — величину, обычно декларируемую, как эффективность воздействий. Оказалось, что для того, чтобы можно было бы статистически подтвердить эффективность воздействий, количество экспериментальных единиц в группах должно было находиться в пределах от 500 до 1000.

Этот простой пример показывает, что в большинстве экспериментов, включая рандомизированные, использование методов математической статистики для оценки эффективности воздействий имеет мало шансов на успех, а многие декларируемые результаты носят случайный характер. Вообще, вопрос о количестве экспериментальных единиц, которые необходимы для оценки эффективности воздействий, достаточно сложный, ему посвящен целый ряд исследований. Здесь можно сослаться на работу американских ученых [Breed et al., 2014], которые показали, что при определенных условиях количество экспериментальных единиц может быть в пределах 200—300 (рассматривались многолетние работы по воздействиям в штате Вайоминг, США).

Возвращаясь к полученным авторами результатам, можно отметить, что в ряде экспериментов отмечалось изменение направления движения облаков после воздействий, оно было связано со слиянием материнского облака с фидерными облаками. Во всех рассмотренных в деталях экспериментах воздействия стимулировали развитие облаков, существенно меняя характеристики объединенного облака. Здесь при анализе данных неоценимую помощь оказывают численные модели, которые позволяют моделировать облака с воздействиями и без них, получая соответствующую разницу в характеристиках, оценивать эффективность воздействий, выявлять физические причины, приводящие к объединению облаков.

Важнейший вывод, который был сделан Т. Крауссом из результатов статистического анализа эффективности воздействий в Саудовской Аравии, заключается в том, что эффект от слияния облаков существенно превосходит тот, который связан с воздействиями на облака. Это означает, что при оценке эффективности воздействий облака, которые в ходе экспериментов сливаются с другими, должны рассматриваться отдельно от основной группы.

Монография базируется на результатах, полученных при выполнении научной тематики Росгидромета, данных экспериментальных работ WMI inc (США).

Монография подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 16-05-00197\_a, 15-05-05719\_a, 17-05-00965\_a, БРИКС\_г 18-55-80020) и с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М. В. Ломоносова [Воеводин и др., 2012].

Финансирование данной публикации осуществил Росгидромет.

Авторы выражают благодарность сотруднице ГГО М. Л. Тороповой за активную помощь в подготовке материалов.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ГРОЗОГРАДОВОГО ОБЛАКА  
С РАДИОЛОКАЦИОННЫМИ  
И РАДИОМЕТРИЧЕСКИМИ (СПУТНИКОВЫМИ)**

Радиолокационная и радиометрическая информация может применяться для оценки грозовой активности облаков на основании регрессионных связей между параметрами разрядов и радиолокационными и радиометрическими характеристиками, полученными на основе данных комплексных экспериментов. В этом разделе рассматривается один из таких экспериментов, целью которого было получение таких связей. Практически впервые в рассматриваемом эксперименте удалось получить детальные данные о развитии грозы с использованием трех дистанционных методов измерений. Отметим, что данное исследование было выполнено сотрудниками ГГО в кооперации с учеными из ВГИ [Синькевич и др., 2016; Михайловский и др., 2017; Синькевич и др., 2017]. Учитывая научную значимость вопросов, связанных с формированием грозы, здесь приводится детальный анализ появления и развития электрических разрядов из выбранного облака.

В Пятигорске 29 мая 2012 г. прошел крупный град катастрофической интенсивности. В результате образовался мощный слой града, лежавший на земле несколько дней (рис. П1.1). Толщина этого слоя составляла около 20 см, диаметр градин достигал 2—3 см. Исследуемое облако развивалось южнее метеорологической станции Минеральные Воды. В период его прохождения вблизи станции зарегистрированы грозовые разряды и порывы ветра, достигающие 11 м/с.



Рис. П1.1. Град в Пятигорске (телеканал «Россия 1»).

Для исследования развития облака использованы данные радиолокационных измерений, полученные с помощью радиолокатора МРЛ-5 (канал 10 см), данные радиометрических измерений, полученные с использованием аппаратуры SEVERI, установленной на спутнике “Метеосат” и результаты измерений частоты и токов электрических разрядов с помощью грозорегистратора LS8000.

В качестве характеристик электрической активности исследуемого облака были использованы:

1. Частота молниевых разрядов в минуту в LF ( $F_{LF}$ ) и VHF ( $F_{VHF}$ ) диапазонах. Данная характеристика определялась путем деления числа разрядов, зарегистрированных в соответствующем диапазоне частот, на величину временного интервала радиолокационного обзора, т.е. на 3,3 мин. Таким образом, характеристики молниевой активности осреднялись за каждый период обзора радиолокатора.

2. Средний ток молний за минуту ( $I_{LF}$ ) получался путем деления суммарного тока за соответствующий период радиолокационного обзора на 3,3 мин. Для LF диапазона ток отдельной молнии определялся по величине тока в антенне при разряде.

3. Максимальный ток молнии ( $I_{LFmax}$ ) за весь соответствующий период обзора для LF диапазона. Молнии, регистрируемые в LF диапазоне, могли переносить на землю как положительный, так и отрицательный заряд, что и определяло их знак (далее по тексту этот знак отмечается индексом «+» и «-»).

### П1.1. Анализ развития облака

Наблюдения за облаком были начаты в 13 час 55 мин ВСВ, когда оно было впервые зафиксировано с ИСЗ “Метеосат”. Это время для удобства дальнейших рассуждений принимается за  $t = 0$ .

На рис. П1.2 приводятся результаты измерений высоты верхней границы облака, полученные из измерений радиационной температуры в канале 10,8 мкм радиометром SEVERI с учетом распределения температуры в атмосфере с высотой по данным радиозондирования.

Высота верхней границы развивающегося Cu cong составляла 5 км в нулевой момент времени (13 ч 55 мин ВСВ). На 52 мин на экране радиолокатора появилось радиоэхо от изучаемого облака. На 55 мин впервые были зарегистрированы внутриоблачные разряды с помощью высокочастотного канала VHF грозопеленгатора LS-8000. В этот момент времени максимальная отражаемость от облака составляла 29 дБZ, верхняя граница располагалась на высоте 6,8 км ( $T = -24,2$  °C). Через 11 мин (на 66 мин развития) впервые были

зарегистрированы отрицательные разряды с помощью низкочастотного канала LF.

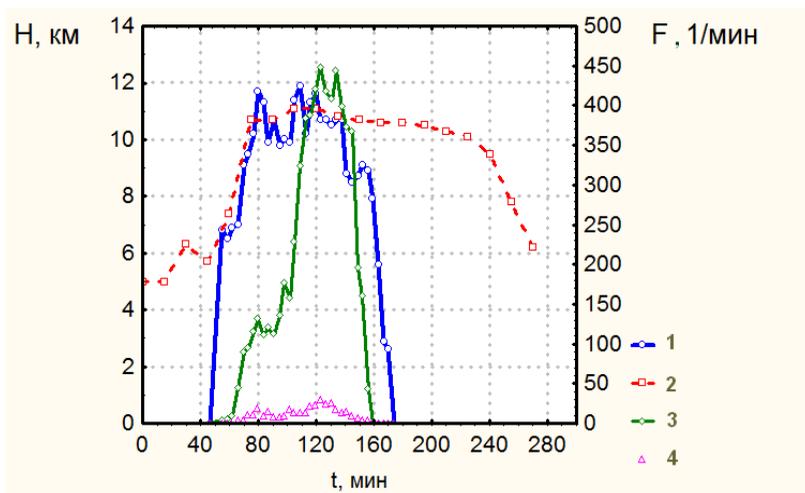


Рис. П1.2. Высота верхней границы облака по радиолокационным данным  $H_{top}$  (1) и данным радиометрических измерений  $H_{sat}$  (2), частоты разрядов  $F_{VHF}$  (3) и  $F_{LF}$  (4), измеренные в каналах VHF и LF грозопеленгатора соответственно.

Отражаемость к этому времени достигла 42 дБZ, верхняя граница облака находилась на высоте 7,0 км. Облако продолжало развиваться, его вершина достигла 10,7 км на 75 минуте наблюдений. На 105 мин развития по измерениям со спутника верхняя граница облака достигла максимальной высоты 11,1 км. Если оценивать высоту верхней границы облака по радиолокационным данным по уровню 25 дБZ, то видно, что максимальное значение высоты верхней границы наблюдается на 109 мин и равно 11,9 км. В это время было зафиксировано большое значение радиолокационной отражаемости, которое было равно 58 дБZ, через 4 мин отражаемость увеличилась до 62 дБZ. Достаточно большая разница в высоте верхней границы

по спутниковым данным и данным радиолокационных измерений может быть связана с влиянием боковых лепестков диаграммы направленности антенны [Краусс и др., 2011б]. Далее отмечался некоторый период стационарирования (отметим, что стадии жизни облака нами определялись по изменениям высоты его верхней границы). Уменьшение ее высоты, начиная со 120 мин, связано с постепенным разрушением облака. На 123 мин развития отмечался максимум в частоте разрядов, зафиксированный в обоих каналах грозопеленгатора LS8000. Максимальная отражаемость была равна в этот момент времени 56 дБZ, а верхняя граница располагалась на высоте 11,1 км ( $T = -58,9$  °C) по измерениям со спутника. На 156 мин развития были зарегистрированы последние разряды от исследуемого облака в обоих каналах измерений, максимальная отражаемость составляла 48 дБZ, высота верхней границы была равна 10,7 км. Измерения со спутника позволили проследить за эволюцией наковальни облака по 270 мин. Облако исчезло с экрана радиолокатора на 174 мин.

## **П1.2. Появление электрических разрядов**

Согласно данным грозопеленгационной сети Росгидромета на Северном Кавказе на 55 мин впервые были зарегистрированы внутриоблачные разряды с помощью высокочастотного канала VHF (табл. П1.1). В этот момент времени верхняя граница облака располагалась на высоте 6,8 км ( $T = -24,2$  °C). Осадки из облака только начинались, их интенсивность была мала, то есть, первые внутриоблачные разряды совпали по времени с началом осадков. По данным радиометрических измерений в облаке не было зарегистрировано кристаллов, присутствовала лишь жидкая фракция. Однако этот результат нельзя признать надежным, так как температура на верхней границе составляла  $-24,2$  °C, что указывало на наличие кристаллической фракции

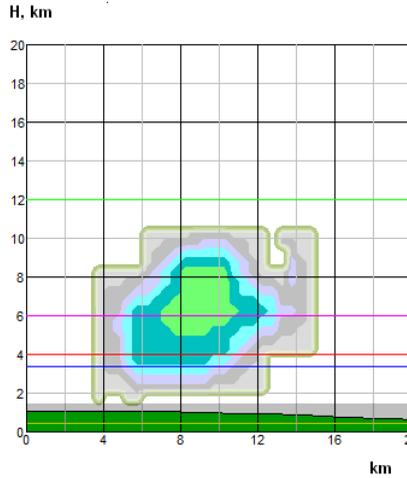
вследствие естественного процесса гетерогенной кристаллизации.

Таблица П1.1

**Характеристики кучево-дождевого облака в момент появления (55 и 66 мин) и во время максимальной интенсивности (120 мин) электрических разрядов**

Время, мин	55	66	123
Канал регистрации	VHF	LF, отрицательные разряды	VHF / LF
Частота разрядов, мин <sup>-1</sup>	4	3	448 / 23
Стадия развития	Развивающееся	Развивающееся	переход от зрелой стадии к стадии диссипации
Максимальная отражаемость, дБZ	29	42	56
Высота расположения уровня максимальной отражаемости, км	6,0	3,5	6,5
Высота верхней границы, км	6,8	7,0	10,7
Фазовый состав	жидкая фракция, смешанная	жидкая фракция, ледяная, смешанная	жидкая фракция, ледяная, смешанная
Температура на верхней границе, °C	-24,2	-33,0	-58,9
Интенсивность осадков, мм/час	1,1	15,4	56

a)



b)

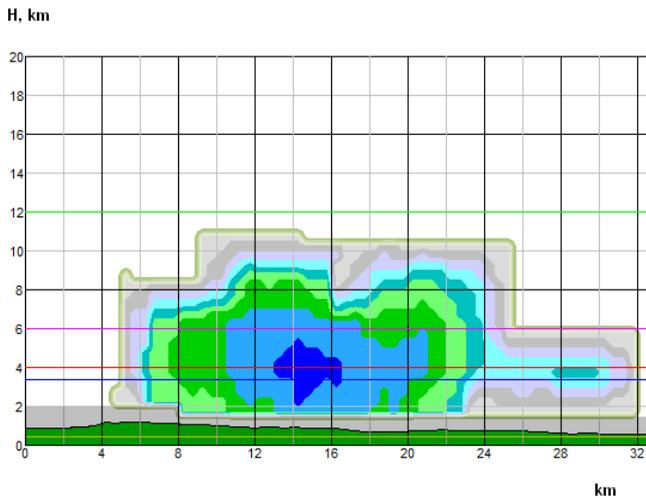
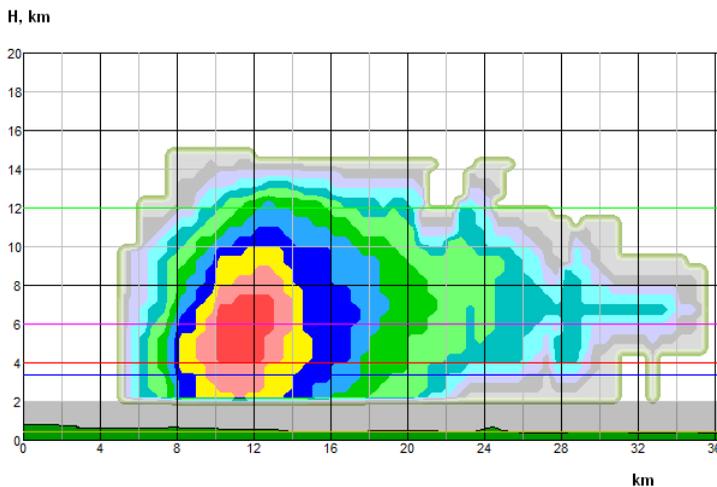


Рис. П1.3. Вертикальное сечение облака  
в разные периоды времени:  
*a* — 55 мин, *b* — 66 мин, *в* — 123 мин,  
*г* — двумерное поле радиационной температуры облака,  
полученное в канале 6,2 мкм (120 мин).  
*T* — радиационная температура в °С, оси — в пикселях.

б)



в)

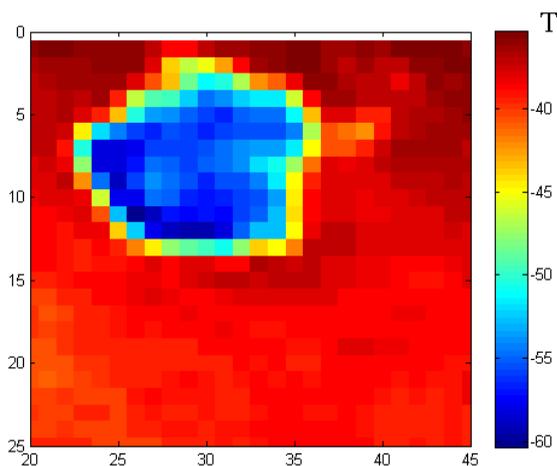


Рис. П1.3 (продолжение).

Более того, на следующем скане радиометра SEVERI уже было обнаружено большое количество пикселей, содержащих кристаллическую и смешанную фракции. Максимальная отражаемость была относительно мала, составляя 29 дБZ, максимум отражаемости располагался на высоте 6,0 км при температуре  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Представленное на рис. П1.3

радиолокационное сечение облака демонстрирует наличие зоны высокой отражаемости в его верхней части. Такое значение отражаемости характерно для мощных кучевых облаков.

В работах [Сумин, Шварц, 1971; Михайловский, 2013; Михайловский, 2016] установлено, что процесс организованной электризации облака, приводящий к росту напряженности электрического поля, начинается практически одновременно с началом кристаллизации вершины облака. Для континентальных облаков эти процессы могут начинаться уже при температуре вершины  $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \div -12\text{ }^{\circ}\text{C}$ , максимальной отражаемости порядка 10 дБZ и толщине переохлажденной части более 1,6—2 км. Появление внутриоблачных разрядов при зарегистрированных параметрах облака не прогнозировалось существующей эмпирической моделью электризации [Михайловский, 2002; Михайловский, 2015; Михайловский, 2016]. Согласно этой модели появление разрядов можно было ожидать через 11 мин, то есть, при параметрах, которые регистрировались при первом разряде в канале LF.

Через 11 мин (на 66 мин развития) произошли существенные изменения в характеристиках облака: возросла отражаемость, которая составила 42 дБZ, максимальное значение отражаемости находилось на высоте 3,5 км, т.е. область высокой отражаемости сместилась к нижней границе облака (рис. П1.3б), появились осадки, их интенсивность составила 15,4 мм/ч. В этот момент времени с использованием низкочастотного канала LF были зарегистрированы разряды. Достаточно высокое значение отражаемости указывало на появление крупных ледяных частиц, кроме того, радиометрические данные указывали на наличие пикселей с кристаллической и смешанной фракцией. Таким образом, можно полагать, что в облаке заработал механизм контактной электризации лед — лед, и усилились коронные разряды за счет появления осадков. Все это привело к

возникновению сильного электрического поля и разрядам облако – земля [Синькевич и др., 2005].

### **П1.3. Максимальная интенсивность электрических разрядов**

Максимальная частота электрических разрядов была зарегистрирована на 123 мин развития с помощью обоих каналов VHF и LF и составила соответственно  $448 \text{ мин}^{-1}$  и  $23 \text{ мин}^{-1}$  (табл. П1.1). Отношение частоты разрядов в рассматриваемых каналах равно 15, то есть, на 15 внутриоблачных разрядов приходится лишь 1 разряд облако — облако или облако — земля. В это время облако располагалось над городом Пятигорск, где выпадал крупный град. Его верхняя граница достигла максимальной высоты по измерениям со спутника. По радиолокационным данным максимум наблюдался на 3 мин раньше. Максимальное значение радиолокационной отражаемости (62 дБZ) было отмечено на 10 мин ранее, на 113 мин, а в рассматриваемый момент (123 мин) произошло существенное его уменьшение до 56 дБZ. Интенсивность осадков была равна 56 мм/ч по радиолокационным данным и 72 мм/ч по данным измерений со спутника. Отметим, что интенсивность осадков в это время уже начала уменьшаться, по результатам радиолокационных оценок она была максимальной на 3 мин ранее и составляла 100 мм/ч. Измерения со спутника показали, что в облаке присутствовала как кристаллическая фракция, так и жидкая. Горизонтальные размеры облака были велики, его площадь (вместе с наковальной) равнялась  $3375 \text{ км}^2$ . Продолжалось увеличение площади наковальни, которая через 30 минут достигла своего максимума ( $5575 \text{ км}^2$ ). Радиационная температура в канале 10,8 мкм в это время имела минимальное значение  $-58,9 \text{ }^\circ\text{C}$ , пространственный коэффициент корреляции между полями температуры в канале 10,8 мкм и 6,2 мкм был равен 0,86, его

максимальное значение 0,93 было отмечено через 30 мин. Это указывало на достаточно высокую оптическую плотность наковальни. В период 120—150 мин со спутника четко фиксировалась вершина облака (рис. П1.3з), наблюдалась минимальная разность температуры в канале 6,2 и 10,8 мкм, которая для нее составила  $-1,3\text{ }^{\circ}\text{C} \div -1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Представленный радиолокационный разрез облака показывает наличие вытянутой наковальни, области с достаточно высокой отражаемостью в облаке и под облаком. На изображении поля радиационной температуры, полученного с использованием канала 6,2 мкм, четко выделяется область с минимальной температурой, смещенная к левому нижнему краю изображения. Эта область соответствует вершине облака, указывая на продолжающееся его развитие. Здесь следует учитывать, что контуры изображения не соответствуют реальным геометрическим характеристикам облака, вследствие явления параллакса и искажений геометрических размеров пикселей изображения для данных географических координат.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что максимум электрической активности облака (имеется в виду частота разрядов) наблюдается в период перехода облака от стадии зрелости к стадии диссипации. В этот период времени облако достигло максимума в вертикальном развитии, продолжались ливневые осадки, интенсивность которых начала снижаться, присутствовали как жидкая, так и ледяная фаза в облаке, четко определялась его вершина, продолжался рост геометрических размеров наковальни. Наличие разрядов свидетельствует о том, что напряженность электрического поля в облаке достигла пробойного значения. Частота разрядов являлась достаточно высокой, что указывает на то, что в облаке происходили активные процессы электризации. Можно предположить, что существенный вклад в электризацию вносит механизм заряжения, связанный с разделением зарядов при контактах

кристаллы — крупа в присутствии жидкой фракции. Учитывая столь высокую частоту разрядов и интенсивные осадки, значительный вклад в электризацию облака могли вносить и коронные разряды: здесь возможно коронирование с отдельных градовых частиц, крупных кристаллов, а также при сближении частиц осадков [Синькевич и др., 2005].

### П1.4. Осадки и частота разрядов

Известно, что пространственное разделение зарядов в облаке тесно связано с появлением осадков. Ниже приводятся зависимости частоты разрядов в рассматриваемых каналах от интенсивности осадков, полученных из данных радиолокационных измерений (рис. П1.4).

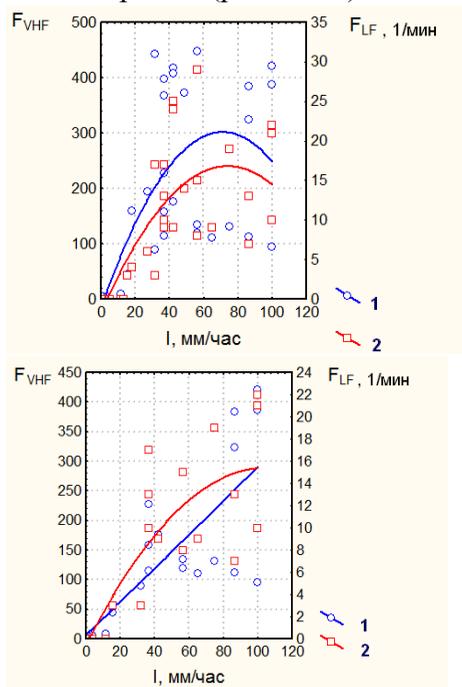


Рис. П1.4. Зависимости частот разрядов  $F_{VHF}$  (1) и  $F_{LF}$  (2) от интенсивности осадков  $I$ .

На первом графике представлены соответствующие связи за все время существования осадков (до 170 мин), второй график показывает связь между соответствующими характеристиками в период увеличения интенсивности осадков, то есть, до 120 мин. Аппроксимации соответствующих кривых (для всего времени существования осадков) выполнены полиномом второй степени:

$$F_{\text{VHF}} = -17,0 + 8,9 \cdot I - 0,06 \cdot I^2,$$

$$F_{\text{LF}} = -1,8 + 0,5 \cdot I - 0,003 \cdot I^2.$$

Аппроксимационные формулы для времени увеличения интенсивности осадков имеют вид:

$$F_{\text{VHF}} = 7,3 + 2,7 \cdot I + 0,0006 \cdot I^2,$$

$$F_{\text{LF}} = -0,5 + 0,3 \cdot I - 0,0015 \cdot I^2.$$

где  $F$  — частота разрядов ( $\text{мин}^{-1}$ ), измеренная в указанных каналах грозорегистратора,  $I$  — интенсивность осадков ( $\text{мм/ч}$ ).

Из представленных графиков видно, что по мере увеличения интенсивности осадков возрастает и частота электрических разрядов в обоих каналах, достигая максимума при интенсивности осадков около 70 мм/час, далее наблюдается некоторый период стационарирования. При этом разброс точек между частотой разрядов и интенсивностью осадков достаточно велик, как для внутриоблачных разрядов, так и для разрядов облако — облако или облако — земля. Коэффициент корреляции между частотой разрядов при измерениях в каналах VHF и LF и интенсивностью осадков составил 0,44 и 0,57 соответственно.

При рассмотрении периода, когда происходит увеличение интенсивности осадков, отмечается меньший разброс точек и полиномиальная аппроксимационная кривая приближается к линейной аппроксимации. Коэффициент корреляции между частотой разрядов при измерениях в каналах VHF и LF и интенсивностью осадков составил в этом случае 0,71 и 0,69 соответственно, указывая на то, что осадки оказывают значительное влияние на частоту электрических разрядов.

Грозопеленгатор LS8000 позволяет фиксировать полярность электрических разрядов (молний) при измерениях в канале LF. За все время измерений было зарегистрировано 336 разрядов, из них лишь 37 имели положительную полярность. Если рассмотреть зависимость отношения количества положительных разрядов к количеству отрицательных, то отмечается слабый тренд увеличения этого отношения со временем, то есть, по мере перехода облака от стадии развития к стадии разрушения. Это может указывать на большее количество разрядов из наковальни облака.

### **П1.5. Пространственная автокорреляционная функция поля радиационной температуры и частота разрядов**

Автокорреляционный анализ полей метеорологических элементов позволяет выявлять особенности их структуры. Были выполнены расчеты двумерной нормированной пространственной автокорреляционной функции для поля радиационной температуры облака, полученной при измерении в канале 10,8 мкм. С этой целью были произведены преобразования поля температуры. Температура пикселей, относящихся к облаку, была сохранена, всем остальным пикселям исследованного поля была условно присвоена температура  $-15^{\circ}\text{C}$ . Это было сделано с той целью, чтобы исключить влияние неоднородности подстилающей поверхности и соседних облаков на исследуемое поле радиационной температуры облака. При таком построении форма автокорреляционной функции в виде конуса (рис. П1.5) отражает процесс развития облака. Происходит увеличение горизонтальных размеров представленной функции по мере развития облака. С его разрушением автокорреляционная функция теряет очертание конуса. По результатам расчетов были получены 2 величины: анизотропия поля температуры, которая

находилась как отношение большой оси эллипса автокорреляционной функции к малой по уровню сигнала 0,5, а также масштаб неоднородности, под которым понималась длина большой оси автокорреляционной функции. Далее осуществлялось сравнение полученных характеристик с частотой электрических разрядов.

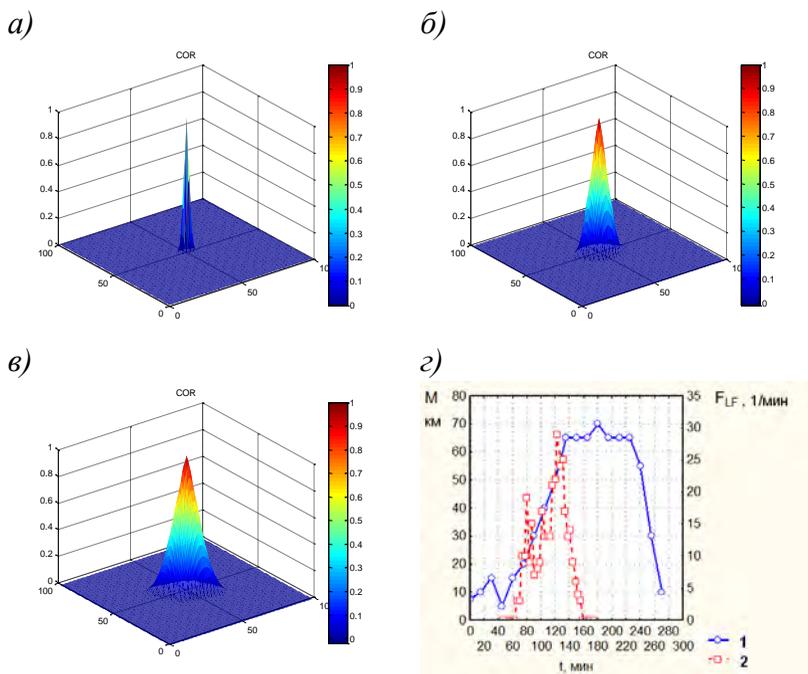


Рис. П1.5. Нормированная пространственная автокорреляционная функция для трех моментов времени:  $a$  — 60 мин,  $б$  — 120 мин,  $в$  — 150 мин (горизонтальные оси в пикселях);  $г$  — зависимости масштаба неоднородности  $M$  (1) и частоты разрядов  $F_{LF}$  (2) от времени.

Величина анизотропии была невелика и для облака в зрелой стадии и стадии диссипации находилась в пределах 1—1,3. Несколько большие значения фиксировались на стадии развития.

Результаты расчетов масштаба неоднородности приведены на рис. П1.5г. Масштаб неоднородности в большинстве случаев составлял несколько десятков километров. По мере развития облака масштаб неоднородности возрастал, достигая максимального значения (70 км) на 180 минуте развития, то есть, в период, когда вершина облака растеклась и образовалась наковальня значительных размеров. Начиная с 225 мин развития, когда шел интенсивный процесс разрушения наковальни, отмечалось заметное уменьшение масштаба неоднородности.

Сравнение полученных данных с частотой электрических разрядов показало, что существует достаточно тесная корреляционная связь между масштабом неоднородности и частотой электрических разрядов, на рисунке представлены данные канала LF. Отметим, что коэффициенты корреляции между величиной масштаба неоднородности и частотой разрядов для каналов VHF и LF для периода, когда отмечалось увеличение частоты разрядов, наблюдавшихся на стадии развития и зрелости облака, составили соответственно 0,94 и 0,84. Столь высокая корреляция между рассматриваемыми величинами объясняется тем, что они обе зависят от стадии жизни облака, увеличиваясь по мере его развития. В дальнейшем происходит разрушение облака, что сказывается на уменьшении частоты электрических разрядов, однако, наковальня, которая трансформируется в перистые облака, еще сохраняется длительное время.

### **П1.6. Токи молний и заряд**

Статистические характеристики токов молний и частоты разрядов за весь период существования рассматриваемого облака представлены в табл. П1.2. Как видно из данных

таблицы, сумма токов отрицательных молний за время существования облака была равна  $-3874$  кА, а положительных —  $+726$  кА. Максимальный ток единичной положительной молнии достигал  $110$  кА, а отрицательной  $-22$  кА. Токи молний обычно оцениваются по изменению напряженности электрического поля во время главной стадии развития молнии, так называемого возвратного удара, причем первой компоненты молнии [Аджиев и др., 2013; Михайловский и др., 2017; Системы обнаружения гроз и молний]. Эта стадия характеризуется малой длительностью и максимальными значениями протекающего по каналу тока. Оценка заряда, переносимого молнией на землю, осуществляется интегрированием тока молнии за все время разряда, что в рамках данной системы грозопеленгации не представляется возможным. Поэтому оценивать величину переносимого молнией заряда целесообразно путем умножения значения тока главной стадии первой компоненты на  $0,1$  сек, что в  $5$ — $10$  раз меньше средней длительности существования молний. Принимая этот метод оценки, получим, что общий заряд, перенесенный отрицательными молниями из данного облака, составил  $387,4$  Кл, средний заряд на 1 молнию —  $0,44$  Кл, перенесенный положительными молниями —  $72,6$  Кл и  $0,6$  Кл соответственно.

На рис. П1.6 представлены гистограммы распределений средних значений токов молний за минуту (*а*) и максимальных значений токов за период обзора (*б*) для положительных и отрицательных молний, зарегистрированных в исследуемом облаке. Положительных молний наблюдалось примерно в  $7$  раз меньше, чем отрицательных. Имеющиеся в литературе данные о том, что положительные молнии на землю представляют собой редкое явление и отличаются значительно большими токами, чем отрицательные, не подтверждаются данными анализируемого эксперимента. В исследуемом облаке

наблюдалось только три сильноточных положительных разряда, 47 кА на 91 мин, 102 кА на 105 мин и 81 кА на 123 мин.

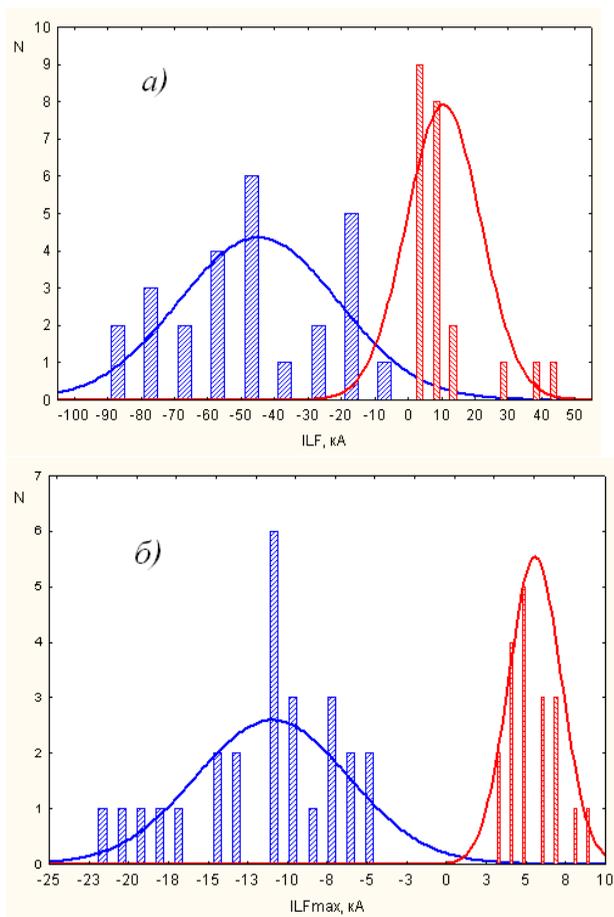


Рис. П1.6. Гистограммы распределений положительных и отрицательных суммарных токов за минуту (а) и максимальных токов молний за период обзора 3,3 мин (б) для наблюдаемого облака.

Остальные 32 положительных разряда имели токи менее 10 кА, что меньше, чем среднее из максимальных значений тока отрицательных разрядов. Возможно, эти разряды не являлись

положительными разрядами облако — земля, а положительный импульс тока в антеннах давали разряды молний типа облако — облако или внутриоблачные. Результатами эксперимента также не было подтверждено существование логнормального распределения амплитуд токов молний. Для данного облака характерно нормальное распределение токов молний, что видно (рис. П1.6) по распределению как средних суммарных, так и максимальных значений токов.

При построении гистограммы распределения максимальных значений положительных токов были исключены три периода с приведенными выше максимальными значениями токов, которые учтены в табл. П1.2.

Таблица П1.2

**Статистические параметры характеристик,  
используемых для оценки электрической активности  
исследуемого облака**

Величина	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение	Сумма за весь эксперимент
$I_{LF}^+$ , кА/мин	6,3	2,6	0	42	10,0	726 кА
$I_{LF}^-$ , кА/мин	-33,5	-33,6	-86	0	28,6	-3874 кА
$I_{LF}$ , кА/мин	39,8	42,6	0	122	34,1	4600 кА
$I_{LF\ max}^+$ , кА	9,5	4,0	0	102	22,1	1099 кА
$I_{LF\ max}^-$ , кА	-8,2	-9,0	-22	0	6,4	974 кА
$F_{LF}^+$ , мин <sup>-1</sup>	1,1	1,0	0	3	1,0	122
$F_{LF}^-$ , мин <sup>-1</sup>	7,5	7,0	0	20	6,4	871
$F_{LF}$ , мин <sup>-1</sup>	8,6	8,0	0	23	7,2	993
$F_{VHF}$ , мин <sup>-1</sup>	180	131	0	448	162	20800

Для получения связи между суммарным током разрядов  $I_{LF}$  за минуту и соответствующей частотой разрядов ( $F_{LF}$ ) выполнен анализ всего массива данных (993 разряда) для времени существования облака. Суммирование токов выполнялось по абсолютной величине.

Между суммой этих токов за минуту ( $I_{LF}$ , кА) и частотой разрядов  $F_{LF}$  наблюдается тесная линейная связь с коэффициентом корреляции, составляющим  $r = 0,97$ ,  $p = 0,000$ , где  $p$  — уровень значимости. Уравнение регрессии имеет вид:  $I_{LF} = 2,3 + 3,9F_{LF}$ .

Аналогичные расчеты выполнены для канала VHF. Между частотой разрядов  $F_{VHF}$  и током разрядов  $I_{LF}$  коэффициент корреляции  $r = 0,78$ ,  $p = 0,000$ , что позволяет считать полученные связи неслучайными. Уравнение регрессии имеет вид:  $I_{LF} = 10,2 + 0,16F_{VHF}$ .

Таким образом, значения  $I_{LF}$  тесно коррелируют с соответствующими частотами молний, фиксируемыми гронопеленгатором LS8000 как в LF, так и в VHF диапазоне. Следовательно, можно оценивать токи молний и, соответственно, мощность электрического генератора облака, как отмечалось выше, по частоте электрических разрядов как в LF, так и в VHF диапазоне.

### **П1.7. Критерии грозоопасности, базирующиеся на радиолокационных характеристиках, связь критериев с частотой электрических разрядов**

В настоящее время для контроля за электрическим состоянием облака (молниевой опасностью) применяются косвенные критерии грозоопасности на основе радиолокационных данных [Степаненко, Гальперин, 1983]. Эти критерии используются для прогноза вероятности грозовых

явлений. В авиационной метеорологии применяется комплексный критерий грозоопасности  $Y = H \lg Z_3$  [Дорофеев и др., 2014; Степаненко, Гальперин, 1983], где  $H$  — максимальная высота радиоэха (высота верхней границы);  $Z_3$  — отражаемость на высоте на 2—2,5 км выше нулевой изотермы. Уровень грозоопасности определяется соотношением  $Y$  и  $Y_k$ , который равен  $Y_k = H_{-22^\circ\text{C}}(\lg Z_3)_{\min}$ , где:  $H_{-22^\circ\text{C}}$  — высота изотермы  $-2^\circ\text{C}$ ,  $(\lg Z_3)_{\min}$  — минимальное значение  $\lg Z_3$  в грозах [Степаненко, Гальперин, 1983; Дорофеев и др., 2014]. При  $Y > Y_k + 14$  вероятность грозы составляет более 90%; если  $Y > Y_k + 6$ , то от 70 до 90%; если  $Y > Y_k$ , то менее 70%. Для исследуемого облака  $H_{-22^\circ\text{C}} = 6,7$  км,  $(\lg Z_3)_{\min} = 1,5$ , соответственно,  $Y_k = 10$  [Дорофеев и др., 2014].

В литературе предлагаются и другие критерии грозоопасности [Степаненко, Гальперин, 1983; Абшаев, Абшаев, 2013; Зимин, 1978; Дорофеев и др., 2014]. В частности,

$$Y_2 = H \lg Z_{\max} / (\lg Z_{\max} - \lg Z_i)$$

или

$$Y_3 = H_{\max} \lg H_{Z_{\max}} \lg Z_{\max} / H_0^2,$$

где  $Z_{\max}$  — максимальная отражаемость в облаке,  $H_{Z_{\max}}$  — высота максимальной отражаемости,  $Z_i$  — отражаемость на уровне  $H_i = H_{Z_{\max}} + 2$  км,  $H_0$  — высота нулевой изотермы. В зависимости от значений этих параметров или от их соотношений конвективные облака и связанные с ними осадки могут подразделяться на: 1) градоопасные облака и грозовые облака с градом; 2) грозоопасные облака и ливневой дождь с грозой и 3) негрозоопасные конвективные облака и ливни [Степаненко, Гальперин, 1983, Дорофеев и др., 2014]. При этом

устанавливается факт существования отмеченных выше явлений в зоне приблизительно  $30 \times 30$  км с вероятностью, определяемой значениями параметров. Критерии носят вероятностно-статистический характер. Физические основы, определяющие выбор тех или иных критериев, не всегда четко сформулированы. Тем не менее, можно ожидать, что данные критерии должны коррелировать с частотой электрических разрядов (молний), то есть, указывать на степень электрической опасности облака.

Рассмотрим связь отмеченных критериев грозоопасности  $Y$ ,  $Y_2$  (критерий Сальмана),  $Y_3$  (критерий Зимина) с параметрами  $F_{LF}$  и  $F_{VHF}$  для изучаемого облака (табл. П1.3 и рис. П1.7а).

Через 3 мин после появления облака на экране радиолокатора (во время второго обзора пространства) были зарегистрированы 4 молниевых разряда (канал VHF), через 14 мин (во время четвертого обзора) — 3 разряда (канал LF) (рис. П1.7а, табл. П1.3). Регистрация разрядов на ранней стадии развития облака свидетельствует о том, что используемые в грозопеленгаторе LS800 технологии позволяют обнаруживать электрическую активность облака практически одновременно с радиолокатором и делают возможным их использование для сверхкраткосрочного прогноза опасных явлений погоды. Общее число разрядов VHF к четвертому обзору пространства превысило 18. Критерий грозоопасности  $Y$  на 4 минуте наблюдения был равен 20, превысив граничное значение 8, что, по данным работы [Дорофеев и др., 2014], означает вероятность грозы, равную 70 %. На 10 мин параметр  $Y$  превысил граничное значение 24, что соответствует вероятности грозы 90 %. Значения  $Y_2$  и  $Y_3$  на 4 мин при втором обзоре составили соответственно 17 и 12, что указывает на наличие грозы [Дорофеев и др., 2014].

Радиолокационные и электрические характеристики исследуемого облака на стадии развития (52—70 мин), зрелости (109—123 мин) и диссипации (149—162 мин)

$t$ , мин	52	55	59	62	66	70	109	113	116	120	123	149	152	156	159	163
$F_{VHF}^{\vee}$ , мин <sup>-1</sup>	0	4	5	9	44	90	384	387	421	448	417	160	43	0	0	0
$F_{LF}^{\vee}$ , мин <sup>-1</sup>	0	0	0	0	3	3	13	19	21	23	21	4	3	0	0	0
$I_{LF}^+$ , кА/мин	0	0	0	0	0	0	1	2	1	3	3	1	0	0	0	0
$I_{LF}^-$ , кА/мин	0	0	0	0	15	13	59	87	89	122	88	13	7	0	0	0
$I_{LF}^{\ominus}$ , кА/мин	0	0	0	0	15	13	53	78	84	86	76	11	7	0	0	0
$Y$	5,4	20	20	25	25	47	67	64	75	68	60	35	46	41	30	18
$Y_2$	5,4	17	14	33	49	37	96	60	164	55	42	37	17	38	24	28

t, мин	52	55	59	62	66	70	109	113	116	120	123	149	152	156	159	163
$Y_3$	6	12	13	10	10	27	27	28	28	32	37	19	32	21	17	4
$F_Y$ , мин <sup>-1</sup>	0	0	0	0	0	29	65	60	81	68	52	6	26	17	0	0
$F_{lgZ_m}$ , мин <sup>-1</sup>	0	0	9	27	33	54	81	93	87	87	74	51	51	51	36	9
$Z_m$ , дБЗ	22	29	34	40	42	49	58	62	60	60	56	48	48	48	43	34
$H_{top}$ , км	5,4	8	7,9	8,2	8,2	10,5	13,3	11,6	13,7	13,7	12	10,1	10,2	10,3	10	7,3
$dV_{35}$ , км <sup>3</sup>	0	0	0	13	72	218	523	563	587	549	556	181	193	114	43	0
рлк	сл	ос	гза	гза	гза	гза	гдс	гдс	гду	гду	гдс	гза	гза	гза	гза	ко

В последней строке представлены оценки состояния исследуемого облака по радиолокационным параметрам (рлк): сл — слоистое облако, ос — облако с осадками, гза — гроза, гдс — град слабый, гду — град умеренный, ко — конвективное облако.

Для характеристики грозоопасности облака ранее было введено такое понятие, как заблаговременность предупреждения о грозоопасности — время между достижением выбранным критерием грозоопасности критического значения и реальным появлением молниевых разрядов.

Для всех анализируемых критериев отмечается малая или даже отрицательная заблаговременность предупреждения о грозоопасности, особенно для разрядов VHF, то есть, разряды фиксируются раньше момента превышения критериями грозоопасности критических значений.

Из рис. П1.7а следует, что измеряемое число разрядов (канал LF) имеет два выраженных максимума — на 80 и 123 мин развития облака. На 123 мин было отмечено 23 разряда в минуту. В это же время наблюдался максимум интенсивности разрядов в VHF диапазоне, равный  $448 \text{ мин}^{-1}$ . Значения рассчитанных критериев также неравномерно распределены во времени. Максимумы этих критериев в целом соответствуют ходу значений  $F_{LF}$ , хотя имеются и значительные различия, в частности, для критерия  $Y_2$  они отмечаются в области максимума  $F_{LF}$ .

Для оценки частоты электрических разрядов по параметрам  $Y$  были получены линейные регрессионные уравнения ( $Y = A + Bx$ ), связывающие исследуемые критерии с реально наблюдаемой частотой разрядов в обоих каналах. Результаты соответствующих расчетов представлены в табл. П1.4.

Как видно из данных табл. П1.4, для LF диапазона максимальный коэффициент корреляции  $r$  ( $r = 0,83$ ,  $p = 0,000$ ) наблюдается для критерия  $Y$ , минимальный ( $r = 0,59$ ,  $p = 0,000$ ) — для критерия  $Y_2$ . Для диапазона VHF закономерность аналогична. Таким образом, критерий грозоопасности  $Y$ , используемый в настоящее время на оперативной сети МРЛ, лучше (по сравнению с  $Y_2$  и  $Y_3$ ) коррелирует с реально наблюдавшимися разрядами исследуемого облака. Полученные

линейные регрессионные уравнения можно использовать для оценки частоты электрических разрядов облака; при этом следует иметь в виду, что выводы базируются на одном конкретно рассмотренном случае развития Сб.

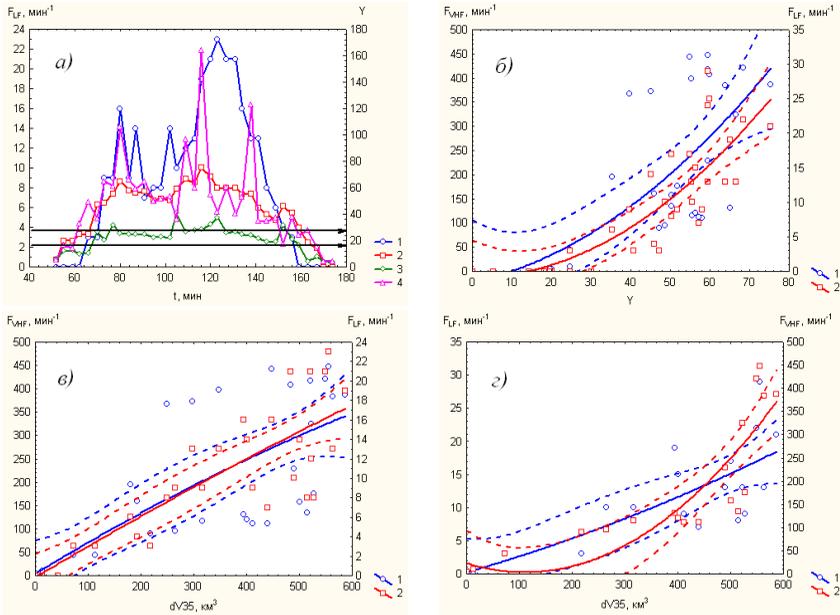


Рис. П1.7. Временной ход частоты разрядов и критериев грозоопасности, взаимосвязи между указанными величинами.

- а) — изменение во времени критериев грозоопасности:  $Y$  (2),  $Y_2$  (3),  $Y_3$  (4) и наблюдаемой частоты разрядов  $F_{LF}$  (1); черные стрелки означают уровни грозоопасности от 70% до 90%.
- б) — зависимость частоты электрических разрядов в LF (2) и VHF (1) диапазонах от критерия грозоопасности  $Y$ .
- в) — зависимость частоты электрических разрядов в LF (2) и VHF (1) диапазонах от объема переохлажденной части облака с отражаемостью более 35 дБZ.
- г) — зависимость частоты электрических разрядов в LF (1) и VHF (2) диапазонах от объема переохлажденной части облака с отражаемостью более 35 дБZ на стадии развития (с 40 по 130 мин эксперимента).

Таблица П1.4

**Коэффициенты линейных регрессионных уравнений ( $A$ ,  $B$ ), коэффициент корреляции ( $r$ ) и уровень значимости ( $p$ ).**

Частота разрядов	$r$	$p$	$A$	$B$
	$Y$			
$F_{LF}, \text{мин}^{-1}$	0,83	0,000	23,8	0,50
$F_{VHF}, \text{мин}^{-1}$	0,72	0,000	27,3	0,09
	$Y_2$			
$F_{LF}, \text{мин}^{-1}$	0,59	0,000	25,3	0,28
$F_{VHF}, \text{мин}^{-1}$	0,50	0,002	29,9	0,10
	$Y_3$			
$F_{LF}, \text{мин}^{-1}$	0,79	0,000	12,5	0,22
$F_{VHF}, \text{мин}^{-1}$	0,67	0,000	14,2	0,04

Из рис. П1.7б видно, что зависимости  $F_{LF}$  и  $F_{VHF}$  от  $Y$  имеют нелинейный характер. Их можно аппроксимировать, например, с помощью уравнений второй степени, которые имеют вид:

$$F_{VHF} = -22,6 + 1,7Y + 0,055Y^2,$$

$$F_{LF} = -0,9 - 0,0003Y + 0,0046Y^2.$$

Критерий  $Y$  давно и достаточно успешно применяется на оперативной сети МРЛ. В то же время очевидно, что критерий  $Y$ , как и другие критерии, появился в период использования радиолокаторов с индикаторами кругового обзора. Разработанные к настоящему времени средства и методы обработки радиолокационной информации дают возможность применять гораздо более сложные критерии, учитывающие

физику процессов электризации облаков и ее связи с осадкообразованием.

Авторы работ [Михайловский и др., 2013; Михайловский и др., 1990; Гальперин и др., 2005; Михайловский, 2013; Михайловский, 2016], основываясь на результатах самолетных экспериментов с синхронным измерением радиолокационных характеристик и напряженности электрического поля, для описания характеристик электрического состояния облака предлагали использовать интегральные радиолокационные параметры, характеризующие количество в нем крупных ледяных частиц. К таким параметрам, в частности, относится объем переохлажденной части облака. Выбор этого критерия основан на принятой в настоящее время гипотезе об определяющей роли ледяных частиц в электризации облаков [Сумин, Шварц, 1971; Михайловский, Кашлева, 2012; Кашлева и др., 2016, Михайловский, 2013; Михайловский, 2016; Михайловский и др., 1990; Михайловский и др., 2013; Михайловский и др., 2017; Пономарев, Синькевич, 1997; Pruppacher, Klett, 1997; Cecil et al, 2005; Gungle, Krider, 2006]. Используя этот подход, были определены статистические связи частоты разрядов в VHF и LF диапазоне с объемом переохлажденной части облака с отражаемостью более 35 дБZ ( $dV_{35}$ , км<sup>3</sup>) за весь цикл жизни облака (рис. П1.7в). Следует отметить, что полученные результаты во многом сходны с данными работ [Михайловский и др., 1990; Михайловский и др., 2013; Михайловский, 2013; Михайловский, 2016]. Коэффициенты корреляции  $dV_{35}$  с FLF и FVHF превышают аналогичные для  $Y$ :

$$F_{LF} = -0,04 - 0,00dV_{35}, \quad r = 0,88, \quad p = 0,00,$$

$$F_{VHF} = 9,7 + 0,58dV_{35}, \quad r = 0,77, \quad p = 0,00.$$

Важным фактором, влияющим на взаимосвязь характеристик облака, является период его существования, состоящий из стадий развития (индекс «р»), зрелости и разрушения. На рис. П1.1г представлены связи интенсивности молниевых разрядов в LF и VHF диапазоне с объемом переохлажденной части облака с отражаемостью более 35 дБZ на стадии развития (с 40 по 130 мин эксперимента). Видно, что на стадии развития грозового облака связь  $F_{LF}$  с  $dV_{35}$  близка к линейной, а связь  $F_{VHF}$  с  $dV_{35}$  хорошо описывается квадратичным полиномом. Линейные и квадратичные регрессионные уравнения, аппроксимирующие связь  $F_{LF}$  с  $dV_{35}$  и  $F_{VHF}$  с  $dV_{35}$ , представлены ниже:

$$r = 0,81, \quad p = 0,000, \quad F_{LF_p} = -0,21 - 0,031 dV_{35},$$

$$r = 0,82, \quad p = 0,000, \quad F_{VHF_p} = -25,52 - 0,549 dV_{35},$$

$$F_{VHF_p} = 22,71 - 0,36 dV_{35} + 0,0016 (dV_{35})^2,$$

$$F_{LF_p} = 0,21 + 0,023 dV_{35} + 1,4 \cdot 10^{-5} (dV_{35})^2.$$

### **П1.8. Радиолокационные методы определения частоты разрядов**

Попытки оценки частоты электрических разрядов по радиолокационным параметрам облаков предпринимались у нас в стране и за рубежом [Степаненко, Гальперин, 1983, Price, Rind, 1992, 1993]. В работе [Степаненко, Гальперин, 1983] предлагается использовать регрессионные соотношения частоты молниевых разрядов  $F$  в зависимости от  $Y$  и  $\lg Z_{\max}$  для облака, находящегося в стадии развития. Авторы указанной работы

фиксировали молнии радиолокатором метрового диапазона. Были получены следующие соотношения:

$$F_Y = 1,9Y - 6,$$

$$F_{\lg Z_{\max}} = 30 \lg Z_{\max} - 93.$$

Имеющиеся данные позволяют проверить эти соотношения. Результаты такой проверки показали, что расчетные и измеренные значения существенно различаются, как для LF разрядов, так и, особенно, для VHF разрядов. В частности, максимальные расчетные значения частоты разрядов составляют:  $F_Y = 81 \text{ мин}^{-1}$ ,  $F_{\lg Z_{\max}} = 93 \text{ мин}^{-1}$ . В анализируемом эксперименте отмечались максимальные значения  $F_{LF} = 23 \text{ мин}^{-1}$  и  $F_{VHF} = 448 \text{ мин}^{-1}$ . Таким образом, если считать, что рассматриваемые соотношения получены для молний типа облако — земля (соответствует измерениям в канале LF), то расчетные значения частоты молний превосходят измеренные примерно в 4 раза. Вместе с тем, отмечается достаточно тесная корреляционная зависимость между указанными критериями и наблюдаемой частотой  $F_{LF}$ . Коэффициент корреляции между  $F_Y$  и  $F_{LF}$  равен 0,80 ( $p = 0,00001$ ), а между  $F_{\lg Z_{\max}}$  и  $F_{VHF}$  0,73 ( $p = 0,0002$ ). Таким образом, связь между исследуемыми характеристиками является тесной.

Регрессионные соотношения между рассматриваемыми расчетными и реально наблюдаемыми частотами разрядов  $F_{LF}$  для данного облака на стадии его развития следующие

$$F_Y = -4,97 + 3,49F_{LF}, \quad F_{\lg Z_{\max}} = 28,9 + 3,0F_{LF}$$

Таким образом, полученные нами данные отличаются от данных [Степаненко, Гальперин, 1983]. При этом следует иметь в виду, что наши данные получены по результатам одного

эксперимента, но при этом, в отличие от работы упомянутых авторов, они являются результатом измерений электрических разрядов грозопеленгатором.

Авторы работ [Price, Rind, 1992; Price, Rind, 1993; Price et al, 2011] на основании данных четырехлетних наблюдений, которые в дальнейшем были подтверждены результатами многолетних наблюдений [Price, Rind, 1992; Price, Rind, 1993; Demetriades, Holle, 2006], предлагают рассчитывать частоту разрядов континентального грозового облака в средних широтах Северного полушария только на основании высоты верхней границы облака по следующей формуле:

$$F = 3,44 \cdot 10^{-5} H^{4,9}$$

$F$  — частота молниевых разрядов в минуту,  $H$  — высота вершины облака по радиолокационным данным (км).

Предлагаемый подход, особенно с учетом проблемы определения верхней границы облака радиолокатором [Степаненко, Гальперин, 1983], представляется сомнительным, несмотря на значительный объем использованных данных. На рис. П1.8 представлены данные измеренных и рассчитанных по данной формуле частоте молний. Ход кривых заметно различается. При использовании данных о высоте верхней границы облака по результатам радиометрических наблюдений со спутника различия становятся еще значительнее.

Авторами работы [Demetriades, Holle, 2006] на основании радиолокационных измерений 139 грозовых облаков был предложен полином, выражающий зависимость отношения частоты разрядов IC/CG (отношения частоты внутриоблачных молниевых разрядов к частоте разрядов молний типа облако — земля) от толщины переохлажденной части облака  $dH$  (от изотермы 0 °C до вершины облака). Значение  $dH$  изменялось в диапазоне 5,5—14 км.

$$Z = AdH^4 + BdH^3 + CdH^2 + DdH + E,$$

$$Z = IC/CG, \quad A=0,021, \quad B=-0,648,$$

$$C=7,493, \quad D=-36,54, \quad E=63,09.$$

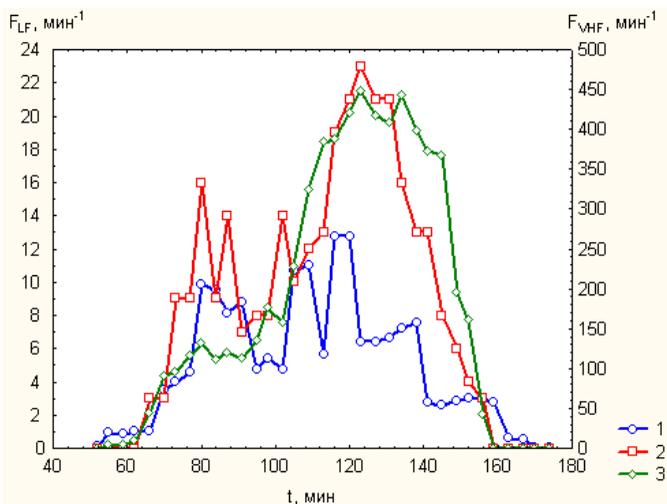


Рис. П1.8. Временной ход частот молний, наблюдаемых в LF (2) и VHF (3) диапазонах и по формуле [Price, Rind, 1992] (1).

Полагая, что в VHF диапазоне измеряются в основном внутриоблачные разряды, а в LF диапазоне разряды типа облако — земля, можно верифицировать этот полином по данным наших измерений. Проведенное сравнение показало, что наблюдаются существенные различия кривых, полученных по данной формуле и зарегистрированных LS8000 в LF и VHF диапазонах. Отношения IC/CG, рассчитанные по приведенной формуле, изменяются от 0 до 5 при определении  $dH$  по спутниковым данным, и от 0 до 10 при определении  $dH$  по данным радиолокатора. При расчете по данным измерений гронопеленгатора отношение  $F_{LF}/F_{VHF}$  изменяется от 0 до 40.

Максимум (40) был отмечен на 150 мин наблюдений; отношение IC/CG, рассчитанное по приведенной выше формуле, в это время имело значение менее 5. Допускаем, что эта проверка не совсем корректна, так как грозопеленгатор LS8000 не позволяет достоверно разделять внутриоблачные разряды и разряды на землю.

## ЛИТЕРАТУРА

*Абшаев М. Т.* (1984). Структура и динамика развития грозоградовых процессов Северного Кавказа // Труды ВГИ. Вып. 53. С. 6—22.

*Абшаев М. Т., Каплан Л. Г., Несис Е. И.* (2000). Полуэмпирическая модель мощного конвективного облака // Метеорология и гидрология. № 3. С. 48—60.

*Абшаев А. М., Абшаев М. Т.* (2013). Программа обработки информации различных МРЛ / В сб.: Труды XXVIII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». — СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского. С. 214—222.

*Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Аджиев А. Х., Геккиева Ж. М.* (2015). Изменение грозовой активности облаков при активных воздействиях на град / В сб.: Доклады Всероссийской открытой конференции по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Ч. 2. С. 44—50.

*Абшаев А. М., Абшаев М. Т., Аджиев А. Х., Садыхов Я. А., Чочаев А. Б., Синькевич А. А., Михайловский Ю. П.* (2017). Анализ развития и взаимодействия ячеек в грозоградовых облаках // Труды ГГО. Вып. 586. С. 93—116.

*Аджиев А. Х., Тапасханов В. О., Стасенко В. Н.* (2013). Система гронопеленгации на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. № 1. С. 5—11.

*Андреев В., Панчев С.* (1975). Динамика атмосферных термик. — Л.: Гидрометеиздат. 152 с.

*Анискина О. Г., Михайловский Ю. П., Пачин В. А.* (1990). О расчете параметров, характеризующих электрическое состояние облаков по измерениям напряженности электрического поля / 4-й Всесоюзный симпозиум по атмосферному электричеству. — Нальчик: ВГИ. С. 13—14.

*Ашабоков Б. А., Шаповалов А. В.* (2008). Конвективные облака: численные модели и результаты моделирования в естественных условиях и при активном воздействии. — Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН. 254 с.

*Бекряев В. И., Пономарев Ю. Ф., Синькевич А. А., Чубарина Е. В.* (1987). Результаты исследований процесса кристаллизации конвективных облаков после воздействий / В сб.: Вопросы физики облаков. С. 131—136.

*Беляев В. П., Петров В. В., Перес К., Мартинес Д., Пуэнтэ Г.* (1992). Результаты самолетных исследований засеянных и контрольных облаков в опытах по искусственному регулированию осадков на Кубе // Труды ЦАО. Вып 177. С. 62—80.

*Берюлев Г. П., Беляев В. П., Данелян Б. Г., Зимин Б. И., Колосков Б. П., Черников А. А.* (1995). Оценка эффективности воздействий и количества дополнительных осадков из конвективных облаков // Метеорология и гидрология. № 4. С. 66—86.

*Богачук В. С., Михайловский Ю. П.* (1986). Об определении координат и величины зарядов, нейтрализуемых в разрядах молнии / 3-й Всесоюзный симпозиум по атмосферному электричеству. — Тарту: ТГУ. С. 157.

*Бусыгина Д. И.* (1970). Диссипация слоистой облачности в нисходящих вертикальных токах // Метеорология и гидрология. № 7. С. 35—44.

*Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Затевахин М. А., Игнатьев А. А., Морозов В. Н., Пастушков Р. С.* (2016). Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака // Труды ГГО. Вып. 582. С. 45—91.

*Воеводин Вл. В., Жуматий С. А., Соболев С. И., Антонов А. С., Брызгалов П. А., Никитенко Д. А., Стефанов К. С., Воеводин Вад. В.* (2012). Практика суперкомпьютера «Ломоносов» // Открытые системы. — М.: Изд. дом «Открытые системы». 7 с.

Гальперин С. М., Михайловский Ю. П., Стасенко В. Н., Фролов В. И. (2005). Сопоставление результатов самолетных измерений напряженности электрического поля конвективных облаков с их радиолокационными характеристиками // Труды НИЦ ДЗА (ГГО). Вып. 6 (554). С. 134—149.

Довгалоук Ю. А., Егоров А. Д., Станкова Е. Н., Синькевич А. А., Степаненко В. Д., Шумаков Л. И. (1990). Исследование процесса перехода мощного кучевого облака в кучево-дождевое после воздействий / В сб.: Активные воздействия на гидрометеорологические процессы. — Л.: Гидрометеиздат. С. 265—270.

Довгалоук Ю. А., Синькевич А. А., Степаненко В. Д. (1993). Способ контроля активного воздействия на облака. Патент № 1811618 // Бюл. изобретений. № 15. Приор. 9.11.89.

Довгалоук Ю. А., Веремей Н. Е., Владимиров А. С., Дрофа А. С., Затевахин М. А., Игнатъев А. А., Морозов В. Н., Пастушков Р. С., Синькевич А. А., Стасенко В. Н., Степаненко В. Д., Шаповалов А. В., Щукин Г. Г. (2008). Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака. I. Структура модели и основные уравнения гидротермодинамического блока // Труды ГГО. Вып. 558. С. 102—142.

Довгалоук Ю. А., Веремей Н. Е., Владимиров С. А., Дрофа А. С., Затевахин М. А., Игнатъев А. А., Морозов В. Н., Пастушков Р. С., Синькевич А. А., Стасенко В. Н., Степаненко В. Д., Шаповалов А. В., Щукин Г. Г. (2010). Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака. II. Микрофизический блок модели // Труды ГГО. Вып. 562. С. 7—39.

Довгалоук Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А. (2013). Применение полуторамерной модели для решения фундаментальных и прикладных задач физики облаков. Второе издание. — СПб: Моби Дик. 220 с.

Довгалоук Ю. А., Веремей Н. Е., Владимиров С. А., Дрофа А. С., Затевахин М. А., Игнатъев А. А., Морозов В. Н., Пастушков Р. С., Синькевич А. А., Шаповалов А. В. (2016a).

Концепция разработки численной нестационарной трехмерной модели эволюции осадкообразующего конвективного облака в естественных условиях и при активных воздействиях // Труды ГГО. Вып. 582. С. 7—44.

*Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Владимиров А. С., Дрофа А. С., Затевахин М. А., Игнатъев А. А., Морозов В. Н., Пастушков Р. С., Синькевич А. А., Шаповалов А. В.* (2016б). Перспективы развития численной трехмерной модели конвективного облака // Труды ГГО. Вып. 582. С. 202—213.

*Довгалюк Ю. А., Ивлев Л. С.* (1998). Физика водных и других атмосферных аэрозолей. — СПб: Изд-во СПбГУ. 322 с.

*Дорофеев Е. В., Львова М. В., Попов И. Б., Тарабукин И. А.* (2014). Применение критериев распознавания грозовых кучево-дождевых облаков в алгоритмах вторичной обработки радиолокационной информации, получаемой с помощью метеорадиолокаторов нового типа // Труды ГГО. Вып. 572. С. 140—153.

*Звонарев В. В., Лядов В. С., Синькевич А. А., Пономарев Ю. Ф., Степаненко В. Д.* (1986). Особенности самолета-лаборатории ГГО Ил-14 // Труды ГГО. Вып. 497. С. 51—62.

*Зимин Б. И.* (1978). Регулирование развития грозовой активности конвективных облаков при воздействии льдообразующими аэрозолями // Труды ЦАО. Вып. 136. С. 104.

*Имамджанов Х. А.* (1984). Параметрическая модель грозоградовых облаков // Труды САНИИ. Т. 100 (181). С. 14—21.

*Имамджанов Х. А.* (1990). Суперъязычковый градовый процесс на севере Ферганской долины // Труды САНИИ. Т. 110 (191). С. 78—87.

*Имянитов И. М.* (1970). Электризация самолетов в облаках и осадках. — Л.: Гидрометеиздат. 210 с.

*Имянитов И. М., Чубарина Е. В., Шварц Я. М.* (1971). Электричество облаков. — Л.: Гидрометеиздат. 93 с.

*Инюхин В. С., Макитов В. С., Куцев С. А.* (2017). Радиолокационные исследования формирования и развития градовых очагов в мощных конвективных облаках // *Метеорология и гидрология*. № 7. С. 103—111.

*Каплан Л. Г.* (1990). О движении грозоградового процесса в атмосфере со сдвигом ветра // *Труды ВГИ*. Вып. 81. С. 92—98.

*Качурин Л. Г.* (1990). Физические основы воздействия на атмосферные процессы. — Л.: Гидрометеиздат. 463 с.

*Кашлева Л. В., Михайловский Ю. П., Михайловский В. Ю.* (2016). Механизмы электризации облачных гидрометеоров в грозовых облаках // *Ученые записки РГГМУ*. № 45. С. 118—131.

*Кобзарь А. И.* (2006). Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников — М.: Физматлит. С. 454—458.

*Коган Е. Л., Мазин И. П., Сергеев Б. Н., Хворостьянов В. И.* (1984). Численное моделирование облаков. — М.: Московское отделение Гидрометеиздата. 185 с.

*Краус Т. В., Синькевич А. А.* (2007). Исследование движения кучево-дождевых облаков в Канаде (провинция Альберта) // *Метеорология и гидрология*. № 2. С. 30—42.

*Краус Т. В., Синькевич А. А., Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Степаненко В. Д.* (2007). Исследование развития сверхмощного кучево-дождевого облака (провинция Андхра Прадеш, Индия, 28 сентября 2004 г.) // *Метеорология и гидрология*. № 1. С. 30—42.

*Краус Т. В., Синькевич А. А., Бургер Р., Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Степаненко В. Д.* (2011а). Исследование влияния динамических факторов на развитие кучево-дождевого облака в Саудовской Аравии // *Метеорология и гидрология*. № 10. С. 5—19.

*Краус Т. В., Синькевич А. А., Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Макитов В. С., Степаненко В. Д.* (2011б). Комплексное исследование характеристик кучево-дождевого облака, развивавшегося над Аравийским полуостровом

в условиях большого дефицита точки росы в атмосфере. Часть 1. Натурные наблюдения и численное моделирование // Метеорология и гидрология. № 2. С. 44—59.

*Краус Т. В., Синькевич А. А., Гхулам А. С.* (2012). Радиолокационные исследования слияния облаков // Метеорология и гидрология. № 9. С. 42—57.

*Краус Т. В., Шоу В., Синькевич А. А., Макитов В. С.* (2006). Воздействия на облака в Индии, физическая и статистическая оценка результатов // Метеорология и гидрология. № 7. С. 24—33.

*Мальбахов В. М.* (1978). О взаимодействии термикров // Труды ЗСР НИГМИ. Вып. 41. С. 67—74.

*Марчук Г. И.* (1967). Численные методы в прогнозе погоды. — Л.: Гидрометеиздат. 353 с.

*Матвеев Л. Т.* (1981). Динамика облаков. — Л.: Гидрометеиздат. 306 с.

*Мейсон Б. Дж.* (1961). Физика облаков. — Л.: Гидрометеиздат. 541 с.

*Михайловский Ю. П.* (2002). Эмпирическая модель электрически активных конвективных облаков и возможности ее использования для тестирования численной модели // Труды НИЦ ДЗА (ГГО). Вып. 5 (552). С. 66—75.

*Михайловский Ю. П.* (2013). Дистанционные исследования электризации конвективных облаков радиофизическими методами с использованием самолетов / В сб.: Вопросы радиометеорологии, посвященном 90-летию со дня рождения В. Д. Степаненко. — СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского. С. 238—252.

*Михайловский Ю. П.* (2014). О технологии контроля напряженности электрического поля атмосферы и облаков с помощью самолетов-лабораторий // Методы и устройства передачи и обработки информации. № 16. С. 41—45.

*Михайловский Ю. П.* (2015). Методика и результаты самолетных воздействий на электризацию конвективных облаков // Труды ГГО. Вып. 577. С. 197—211.

*Михайловский Ю. П.* (2016). О верификации численных моделей конвективных облаков на основе результатов самолетных исследований электризации // Труды ГГО. Вып. 580. С. 125—138.

*Михайловский Ю. П., Гальперин С. М., Кашлева Л. В., Степаненко В. Д.* (1990). Электризация конвективных облаков в естественном цикле развития и при активных воздействиях / В сб.: Самолетные исследования. Проблемы атмосферного электричества. — Л.: Гидрометеиздат. С. 89—112.

*Михайловский Ю. П., Ефременко А. Н., Жуков В. Ю., Караваев Д. М., Лобанов К. А., Щукин Г. Г.* (2013). Параметризация электрического состояния конвективных облаков на основе данных пассивно-активной радиолокации / В сб.: Труды XXVIII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». Т. 2. — СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского. С. 359—366.

*Михайловский Ю. П., Синькевич А. А., Довгальюк Ю. А., Веремей Н. Е., Абшаев А. М., Торгунаков Р. Е.* (2017а). Параметризация молниевой активности грозо-градового облака на основе грозопеленгационных, радиолокационных и спутниковых данных / В сб.: Труды XXX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». Вып. 12. Т. 2. — СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского. С. 262—275.

*Михайловский Ю. П., Синькевич А. А., Павар С. Д., Гоналакришнан В., Довгальюк Ю. А., Веремей Н. Е., Богданов Е. В., Куров А. Б., Аджиев А. Х., Малкарова А. М., Абшаев А. М.* (2017б). Исследования развития грозо-градового облака. Часть 2. Анализ методов прогноза и диагноза электрического состояния облаков // Метеорология и гидрология. № 6. С. 31—45.

*Михайловский Ю. П., Кашлева Л. В.* (2012). Методика и результаты исследований электризации конвективных облаков с помощью

самолетов / В сб.: Радиолокационная метеорология и активные воздействия. — СПб: ГГО. С. 98—114.

Облака и облачная атмосфера (справочник) (1989) / Под ред. И. П. Мазина, А. Х. Хргиана. — Л.: Гидрометеиздат. 647 с.

*Пачин В. А.* (1984). К оценке параметров электрического состояния облаков по данным о напряженности электрического поля // Труды ГГО. Вып. 474. С. 38—46.

*Пирнач А. М., Буйков М. В.* (1983). Некоторые результаты численных экспериментов по моделированию воздействия на зимние фронтальные облака с целью увеличения осадков // Труды УкрНИГМИ. Вып. 193. С. 53—63.

*Пономарев Ю. Ф., Синькевич А. А., Толкачев В. К.* (1991). Результаты исследований водности мощных кучевых облаков Северо-Запада ЕЧС // Труды ГГО. Вып. 534. С. 10—17.

*Пономарев Ю. Ф., Синькевич А. А.* (1997). Электризация конвективных облаков на северо-западе России // Метеорология и гидрология. № 6. С. 73—80.

*Попов В. Б., Синькевич А. А.* (2017). Исследование слияния конвективных облаков на северо-западе России // Труды ГГО. Вып. 585. С. 39—55.

*Поташник Э. Л., Кузнецов А. Д.* (2010). Математическое моделирование облачных процессов. Учебное пособие. — СПб: РГГМУ. 444 с.

*Пушистов П. Ю., Мальбахов В. М., Кононенко С. М., Васкевич Л. А.* (1980). Численная модель конвекции с образованием и развитием кучевых облаков // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. Т. 16. № 1. С. 3—10.

*Роджерс Р. Р.* (1979). Краткий курс физики облаков. — Л.: Гидрометеиздат. 230 с.

*Синькевич А. А.* (2001). Конвективные облака северо-запада России. — Л.: Гидрометеиздат. 106 с.

*Синькевич А. А., Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Степаненко В. Д.* (2005). Лабораторное моделирование коронного разряда в облаках. — СПб: Астерион. 62 с.

*Синькевич А. А., Краус Т. В., Степаненко В. Д., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Куров А. Б., Пивоварова Л. В.* (2009). Исследование динамики наковальни кучево-дождевого облака большой вертикальной протяженности // *Метеорология и гидрология*. № 12. С. 5—17.

*Синькевич А. А., Михайловский Ю. П., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Богданов Е. В., Аджиев А. Х., Малкарова А. М., Абшаев А. М.* (2016). Исследование развития грозо-градового облака. Часть 1. Развитие облака и формирование электрических разрядов // *Метеорология и гидрология*. № 9. С. 27—40.

*Синькевич А. А., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Куров А. Б., Михайловский Ю. П., Богданов Е. В., Торопова М. Л., Игнатъев А. А., Аджиев А. Х., Малкарова А. М., Абшаев А. М., Гопалакришнан В., Муругавел П., Павар С. Д.* (2017). Исследование развития грозо-градового облака. Часть 3. Численное моделирование эволюции облака // *Метеорология и гидрология*. № 8. С. 18—28.

*Синькевич А. А., Боу Б., Михайловский Ю. П., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Гопалакришнан В., Муругавел П., Павар С. Д.* (2018). Исследование эффекта воздействий на мощные кучевые облака в Индии с целью увеличения осадков // *Метеорология и гидрология*. В печати.

*Синькевич А. А., Попов В. Б., Тарабукин И. А., Дорофеев Е. В., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Михайловский Ю. П., Снегуров В. С., Снегуров А. В.* (2018a). Влияние процесса слияния конвективных облаков на осадки из них и другие характеристики // *Метеорология и гидрология*. В печати.

*Синькевич А. А., Довгалюк Ю. А.* (2013). Коронный разряд в облаках // *Радиофизика*. Т. LVI. № 11—12. С. 1—12.

*Синькевич А. А., Краус Т. В.* (2010). Воздействия на облака в Саудовской Аравии, статистическая оценка результатов // Метеорология и гидрология. № 6. С. 26—37.

*Синькевич А. А., Краус Т. В.* (2012). Эффективность воздействий кристаллизующими реагентами на конвективные облака с целью увеличения осадков / В сб.: Радиолокационная метеорология и активные воздействия. — СПб: Изд. «Д'АРТ». С. 30—49.

*Снегуров А. В.* (2010). Опыт построения экспериментальной грозопеленгационной сети // Труды ГГО. Вып. 562. С. 190—200.

*Снегуров А. В., Снегуров В. С.* (2012). Экспериментальная грозопеленгационная система // Труды ГГО. Вып. 567. С. 188—200.

*Степаненко В. Д., Гальперин С. М.* (1983). Радиотехнические методы исследования гроз. — Л.: Гидрометеиздат. 204 с.

*Сумин Ю. П., Шварц Я. М.* (1971). Электрическое поле в окрестности кучевых облаков, подвергнутых воздействию // Труды ГГО. Вып. 262. С. 157—162.

*Тараненко А. Н.* (1989). Численное моделирование развития мультячейковых конвективных облаков // Метеорология и гидрология. № 1. С. 42—50.

*Торгунаков Р. Е., Михайловский Ю. П., Синькевич А. А.* (2015). О методике измерения напряженности электрического поля атмосферы и заряда летательного аппарата // Труды ГГО. Вып. 579. С. 214—231.

*Чалмерс Дж. А.* (1974). Атмосферное электричество. — Л.: Гидрометеиздат. 422 с.

*Шишкин Н. С.* (1964). Облака, осадки и грозное электричество. — Л.: Гидрометеиздат. 401 с.

*Шметер С. М.* (1972). Физика конвективных облаков. — Л.: Гидрометеиздат. 220 с.

*Шметер С. М.* (1987). Термодинамика и физика конвективных облаков. — Л.: Гидрометеиздат. 287 с.

*Baker M. B., Christian H. J., Latham J.* (1995). A computational study of the relationship linking lightning frequency and other thundercloud parameters // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* V. 121. № 527. P. 1525—1548.

*Battan L. J.* (1973). *Radar Observation of the Atmosphere.* — University of Chicago Press. 324 p.

*Bovalo C., Barthe C.* (2014). Lightning activity in tropical cyclones in the South-West Indian ocean / XV International Conference on Atmospheric Electricity, 15—20 June 2014, Norman, Oklahoma, USA. <http://icae2014.nwc.ou.edu/index.php>.

*Breed D., Rasmussen R., Weeks C., Boe B., Deshler T.* (2014). Evaluating Winter Orographic Cloud Seeding: Design of the Wyoming Weather Modification Pilot Project (WWMPP) // *Journal of Applied Meteorology and Climatology.* V. 53. № 2. P. 282—299.

*Carey L. D., Petersen W. A., Rutledge S. A.* (2003). Evolution of cloud-to-ground lightning and storm structure in the Spencer, South Dakota, tornadic supercell of 30 May 1998 // *Mon. Wea. Rev.* V. 131. P. 1811—1831.

*Carey L. D., Rutledge S. A.* (1998). Electrical and multiparameter radar case study of the microphysical evolution of a lightning producing storm // *Meteor. Atmos. Phys.* V. 59. P. 33—64.

*Carey L. D., Rutledge S. T.* (2000). The relationship between precipitation and lightning in tropical island convection: AC-band polarimetric radar study // *Mon. Wea. Rev.* V. 128. № 8. P. 2687—2710.

*Cecil D. J., Goodman S. J., Boccippio D. J., Zipser E. J., Nesbitt W. N.* (2005). Three years of TRMM precipitation features. Part I: Radar, radiometric and lightning characteristics // *Mon. Wea. Rev.* V. 133. № 3. P. 543—566.

*Cecil D. J., Zipser E. J.* (2002). Reflectivity, ice scattering and lightning characteristics of hurricane eyewalls and rainbands. Part II: Intercomparison of observations // *Mon. Wea. Rev.* V. 130. № 4. P. 785—801.

*Changnon S. A., Gabriel K. R., Westcott N. E., Czys R. R.* (1995). Exploratory analysis of seeding effects on rainfall: Illinois 1989 // *J. Appl. Meteor.* V. 34. P. 1215—1224.

*Cheng L.* (1989). Numerical simulations of hailstorm feeder-cloud initiation // *Atmosphere — Ocean.* V. 27. Is. 2. P. 279—305. DOI: 10.1080/07055900.1989.9649337.

*Chin H.-N. S., Wilhelmson R. B.* (1998). Evolution and structure of tropical squall line elements within a moderate CAPE and strong low-level jet environment // *J. Atmos. Sci.* V. 55. P. 3089—3113.

*Chisholm A. J., Renick J. H.* (1972). Supercell and multicell Alberta hailstorms / *Proc. Intern. Cloud Physics Conf. London.* P. 67—68.

*Courant R., Friedrichs K., Lewy H.* (1928). Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik // *Mathematische Annalen.* T. 100. № 1. C. 32—74.

*Cunning J. B., Holle R. H., Gannon P. T., Watson A. I.* (1982). Convective evolution and merger in the FACE experimental area: Mesoscale convection and boundary layer interactions // *J. Appl. Meteor.* V. 21. P. 953—977.

*Czys R. R., Changnon S. A., Westcott N. E., Scott R. W., Petersen M. S.* (1995). Responses of warm-based, midwest cumulus congestus to dynamic seeding trials // *J. Appl. Meteor.* V. 34. P. 1194—1214.

*Danhong F., Xueliang G.* (2006). A Cloud-resolving Study on the Role of Cumulus Merger in MCS with Heavy Precipitation // *Advances in atmospheric sciences.* V. 23. № 6. P. 857—868.

*Deierling W., Petersen W. A.* (2008). Total lightning activity as an indicator of updraft characteristics // *J. Geophys. Res.* V. 113. Is. D16. 11 p. DOI: 10.1029/2007JD009598.

*De Leonibus L., Biron D., Giorgi C., Mäkelä A., Tuomi T., Pylkkö P., Haapalainen J.* (2007). Study on the Present Status and Future Capabilities of Ground-based Lightning Location Networks. Final Report. — Published by EUMETSAT, Darmstadt, Germany. 62 p. EUM/CO/06/1584/KJG.

*Demetriades N. W. S., Molinari J., Holle R. L.* (2006). Long-range lightning nowcasting applications for tropical cyclones / Proceedings of 2nd Conference on the Meteorology Application of Lightning Data, Atlanta, USA, 29 January — 2 February 2006. P. 1—8.

*Dennis A. S., Schock C. A., Koscielski A.* (1970). Characteristics of hailstorms of western South Dakota // *J. Appl. Met.* V. 9. P. 127—135.

*Dixon M., Wiener G.* (1993). TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting — A Radar-based Methodology // *J. Atmos. and Oceanic Technol.* V. 10. № 6. P. 785—797.

*Favre A.* (1969). Equations statistiques des las turbulents // В сб.: Проблемы гидродинамики и механики сплошной среды. — М.: Наука. С. 483—511.

*Fehr T., Dotzek N., Höller H.* (2005). Comparison of lightning activity and radar-retrieved microphysical properties in EULINOX storms // *Atmospheric Research.* V. 76. № 2. P. 167—189.

*Finley C. A., Cotton W. R., Pielke R. A. Sr.* (2001). Numerical simulation of tornadogenesis in a high precipitation supercell. Part I: Storm evolution and transition into a bow echo // *J. Atmos. Sci.* V. 58. P. 1597—1629.

*Foote Brant G., Wade C. G.* (1982). Case Study of a Hailstorm in Colorado. Part I: Radar Echo Structure and Evolution // *JAS.* V. 39. P. 2828—2846.

*Frank H., Lhermitte R. M.* (1976). Cell interaction and merger in a south Florida thunderstorm // Preprints. 17th Conf. on Radar Meteorology, Seattle, WA. — Amer. Meteor. Soc. P. 151—156.

*Futyan J. M., Del Genio A. D.* (2007). Relationships between lightning and properties of convective cloud clusters // *Geophys. Res. Lett.* V. 34. 5 p. L15705. DOI: 10.1029/2007GL030227.

*Gilbert D. B., Boe B. A., Krauss T. W.* (2016). Twenty Seasons of Airborne Hail Suppression In Alberta, Canada // *Journal of Weather modification.* V. 48. № 1. P. 68—87.

*Gungle B., Krider E. P.* (2006). Cloud to ground lightning and surface rainfall in warm season Florida thunderstorms // *J. Geophys. Res.* V. 111. № D19. 15 p. DOI: 10.1029/2005JD006802.

*Hill G. E.* (1974). Factors controlling the size and spacing of cumulus clouds as revealed by numerical experiments // *J. Atm. Sci.* V. 31. P. 646—673.

*Karacostas T., Spiridonov V., Bampzelis D., Pytharoulis I., Tegoulas I., Tympanidis K.* (2016). Analysis and numerical simulation of a real cell merger using a three-dimensional cloud resolving model // *Atmospheric Research.* V. 169. P. 547—555.

*Klimowski B. A., Hjelmfelt M. R., Bunkers M. J.* (2004). Radar observations of the early evolution of bow echoes // *Wea. Forecasting.* V. 19. P. 727—734.

*Kogan Y. L., Shapiro A.* (1996). The simulation of a convective cloud in a 3D-model with explicit microphysics. Part II: Dynamical and microphysical aspects of cloud merger // *J. Atmos. Sci.* V. 53. P. 2525—2545.

*Krauss T. W., Santos J. R.* (2004). Exploratory analysis of the effect of hail suppression operations on precipitation in Alberta // *Atmospheric Research.* V. 71. P. 35—50.

*Krauss T. W., Sinkevich A. A., Ghulam A. S.* (2010). Precipitation Characteristics of Natural and Seeded Cumulus Clouds in the Asia Region of Saudi Arabia // *Journal of Weather Modification.* V. 42. P. 61—77.

*Krauss T. W., Sinkevich A. A., Ghulam A. S.* (2011). Effects of Feeder Cloud Merging on Storm Development in Saudi Arabia // *JKAU: Met., Env. & Arid Land Agric. Sci.* V. 22. № 2. P. 23—39. DOI: 10.4197/Met.22-2.2.

*Lang T. J., Rutledge S. A.* (2002). Relationships between convective storm kinematics, precipitation and lightning // *Mon. Wea. Rev.* V. 130. P. 2492—2506.

*Lee B. D., Jewett B. F., Wilhelmson R. B.* (2006). The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part I: Cell evolution and supercell isolation // *Wea. Forecasting.* V. 21. P. 433—448.

*Levy G., Cotton W. R.* (1984). A numerical investigation of mechanisms linking glaciation of the ice-phase to the boundary layer // *J. Climate Appl. Meteorol.* V. 23. P. 1505—1519.

*Lin Y.-L., Joyce L. E.* (2001). A further study of the mechanisms of cell regeneration, propagation and development within two-dimensional multicell storms // *J. Atmos. Sci.* V. 58. P. 2957—2988.

*Liu C., Cecil D. J., Zipser E. J., Kronfeld K., Robertson R.* (2012). Relationships between lightning flash rates and radar reflectivity vertical structures in thunderstorms over the tropics and subtropics // *J. Geophys. Res.* V. 117. № D06. DOI: 10/1029/2011JD017123.

*Lopez R. E.* (1976). Radar characteristics of the cloud populations of tropical disturbances in north-west Atlantic // *Mon. Wea. Rev.* V. 104. P. 268—283.

*Lopez R. E.* (1978). Internal structure and development processes of C-scale aggregates of cumulus clouds // *Mon. Wea. Rev.* V. 106. P. 1488—1494.

*MacCormack R. W.* (1969). The effect of viscosity in hypervelocity impact cratering // *AIAA.* P. 69—354.

*MacGorman D. R., Rust W. D.* (1999). *The Electrical Nature of Storms.* — New York: Oxford Univ. Press. 422 p.

*Malkus J. S., Riehl H.* (1964). *Cloud Structure and Distribution over the Tropical Ocean.* — University of California Press, Berkeley and Los Angeles. 229 p.

*Marwitz J. D.* (1972). The structure and motion of severe hailstorms. Parts I—III // *J. Appl. Meteorol.* № 11. P. 1966—2010.

*Mather G. K., Dixon M. J., de Jager J. M.* (1996). Assessing the potential for rain augmentation — The Nelspruit randomized convective cloud seeding experiment // *J. Appl. Meteor.* V. 35. P. 1465—1482.

*Matrosov S. Y., Korolev A. V., Heymsfield A. J.* (2002). Profiling Cloud Ice Mass and Particle Characteristic Size from Doppler Radar Measurements // *J. Atmospheric and Oceanic Technology.* V. 19. № 6. P. 1003—1018.

*Mazur V.* (1988). Lightning Initiation on Aircraft in Thunderstorm / Proc. 8th Intern. Conf. Atmosph. Electricity. Uppsala. P. 347—357.

*McNider R. T., Kopp F. J.* (1990). Specification of the scale and magnitude of thermals used to initiate convection in cloud models // J. Appl. Meteor. V. 29. P. 99—104.

*Meiyuan Huang, Xu Huaying, Ji Wusheng* (1987a). A study on numerical simulation of cloud mergers and interactions // Science in China (B). V. 17 (2). P. 214—224.

*Meiyuan Huang, Hong Yanchao, Xu Huaying, Zhou Heng* (1987b). The effects of the existence of stratiform cloud on the development of cumulus cloud and its precipitation // Acta Meteorologica Sinica. V. 45 (1). P. 72—77.

*Orville H. D., Kopp F. J.* (1977). Numerical simulation of the life history of a hailstorm // J. Atmos. Sci. V. 34. P. 1596—1681.

*Orville H. D., Kopp F. J., Myers C. J.* (1975). The dynamics and thermodynamics of precipitation loading // Pure Appl. Geophys. V. 113. P. 983—1004.

*Orville H. D., Kuo Y.-H., Farley R. D., Hwang C. S.* (1980). Numerical simulation of cloud interactions // J. Rech. Atmos. V. 14. P. 499—516.

*Pessi A. T., Businger S.* (2009). Relationships among lightning, precipitation and hydrometeor characteristics over the North Pacific Ocean // J. Appl. Meteorol. Climatol. V. 48. № 4. P. 833—848.

*Petersen W. A., Christian H. J., Rutledge S. A.* (2005). TRMM observations of the global relationship between ice water content and lightning // Geophys. Res. Lett. V. 32. № 14. 4 p. DOI:10.1029/2005GL023236.

*Pozo D., Borrajero I., Marin J. C., Raga G. B.* (2006a). A numerical study of cell merger over Cuba. Part I: Implementation of the ARPS/MM5 models // Ann. Geophys. V. 24. P. 2781—2792. DOI:10.5194/angeo-24-2781-2006.

*Pozo D., Borrajero I., Marín J. C., Raga G. B. (2006̄).* A numerical study of cell merger over Cuba. Part II: Sensitivity to environmental conditions // *Ann. Geophys.* V. 24. P. 2793—2808.

*Price C., Rind D. (1992).* A simple lightning parameterization for calculating global lightning distributions // *J. Geophys. Res.* V. 97. № D9. P. 9919—9933.

*Price C., Rind D. (1993).* What determines the cloud-to-ground lightning fraction in thunderstorms? // *Geophys. Res. Lett.* V. 20. № 6. P. 463—466.

*Price C., Yair Y., Lynn B., Reicher N., Khain A., Diner L. (2011).* Lightning Activity in Hurricanes / XIV International Conference on Atmospheric Electricity. August 08—12, 2011, Rio de Janeiro, Brazil. <http://www.icae2011.net.br>.

*Pruppacher H. R., Klett J. D. (1978).* Microphysics of Clouds and Precipitations. — D. Reidel Publishing Company. 714 p.

*Pruppacher H., Klett J. (1997).* Microphysics of Clouds and Precipitations. — Kluwer Academic Publishers. 954 p.

*Rosenfeld D., Woodley W. L. (1989).* Effects of cloud seeding in west Texas // *J. Appl. Meteor.* V. 28. P. 1050—1080.

*Rosenfeld D., Woodley W. L. (1993).* Effects of cloud seeding in west Texas: Additional results and new insights // *J. Appl. Meteor.* V. 32. P. 1848—1866.

*Simpson J. (1980).* Downdrafts as linkages in dynamic cumulus seeding effects // *J. Appl. Meteor.* V. 19. P. 477—487.

*Simpson J., Keenan T. D., Ferrier B., Simpson R. H., Holland G. J. (1993).* Cumulus mergers in the maritime continent region // *Meteor. Atmos. Phys.* V. 51. P. 73—99.

*Simpson J., Westcott N. E., Clerman R. J., Pielke R. A. (1980).* On cumulus mergers // *Arch. Meteor. Geophys. Bioklim.* V. 29A. P. 1—40.

*Simpson J., Woodley W. L., Miller A. H., Cotton G. F. (1971).* Precipitation results of two randomized pyrotechnic cumulus seeding experiments // *J. Appl. Meteor.* V. 10. P. 526—544.

*Sinkevich A. A., Krauss T. W.* (2014). Changes in thunderstorm characteristics due to feeder cloud merging // *J. of Atmospheric Research*. V. 142. P. 124—132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres>.

*Stalker J. R., Knupp K. R.* (2003). Cell merger potential in multicell thunderstorms of weakly sheared environments: Cell separation distance versus planetary boundary layer depth // *Mon. Wea. Rev.* V. 131. P. 1678—1695.

*Tao W. K., Simpson J.* (1984). Cloud interactions and merging: Numerical simulations // *J. Atmos. Sci.* V. 41. P. 2901—2917.

*Tao W. K., Simpson J.* (1989). A further study of cumulus interactions and mergers: Three-dimensional simulations with trajectory analyses // *J. Atmos. Sci.* V. 46. P. 2974—3004.

*Turpeinen O.* (1982). Cloud interactions and merging on day 261 of GATE // *Mon. Wea. Rev.* V. 110. P. 1238—1254.

*Turpeinen O., Yau M. K.* (1981). Comparison of results from a three-dimensional cloud model with statistics of radar echoes on 261 day of GATE // *Mon. Wea. Rev.* V. 109. P. 1495—1511.

*Ushio T., Heckman S. J., Boccippio D. J., Christian H. J., Kawasaki Z. I.* (2001). A survey of thunderstorm flash rates compared to cloud top height using TRMM satellite data // *J. Geophys. Res.* V. 106. № D20. P. 24089—24095.

*Vasiloff S. V., Brandes E. A., Davies-Jones R. P., Ray P. S.* (1986). An Investigation of the Transition from Multicell to Supercell Storms // *J. Atmos. Sci.* V. 25. P. 1022—1036.

*Westcott N. E.* (1977). Radar characteristics of south Florida convective rainfall / *Proc. Sixth Conf. on Planned and Inadvertent Weather Modification, Champaign-Urbana, IL.* — Amer. Meteor. Soc. P. 190—191.

*Westcott N. E.* (1984). A historical perspective on cloud mergers // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* V. 65. P. 219—227.

*Westcott N. E.* (1994). Merging of convective clouds: Cloud initiation, bridging and subsequent growth // *Mon. Wea. Rev.* V. 122. P. 780—790.

*Westcott N. E., Kennedy P. C.* (1989). Cell Development and Merger in an Illinois Thunderstorm Observed by Doppler Radar // *J. Atmos. Sci.* V. 46 (1). P. 117—131.

*Wiggert V. G., Lockett J., Ostlund S. S.* (1981). Rainshower growth histories and variations with wind speed, echo motion, location and merger status // *Mon. Wea. Rev.* V. 109. P. 1467—1494.

*Wilkins E. M., Sasaki Y. K., Gerber G. E., Chaplin W. H.* (1976). Numerical simulation of the lateral interactions between buoyant clouds // *J. Atm. Sci.* V. 33. P. 1321—1329.

*Williams E. R.* (1985). Large-scale charge separation in thunderclouds // *J. Geophys. Res.* V. 90. № D4. P. 6013—6025.

*Wong J., Barth M. C., Noone D.* (2013). Evaluating a lightning parameterization based on cloud-top height for mesoscale numerical model simulations // *Geosci. Model Dev.* № 6. P. 429—443.

*Woodley W. L., Jill J., Barnston A., Simpson J., Biondini R., Flueck J.* (1982). Rainfall results of the Florida Area Cumulus Experiments, 1970—1976 // *J. Appl. Meteor.* V. 21. P. 139—164.

*Yair Y., Lynn B., Price C., Kotroni V., Lagouvardos K., Morin E., Mugnai A., Llasat M. C.* (2010). Predicting the potential for lightning activity in Mediterranean storms based on the Weather Research and Forecasting (WRF) model dynamic and microphysical fields // *J. Geophys. Res.* V. 115. D04205. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008JD010868/full>.

*Zatevakhin M. A.* (2015). Multiphase convective flow with steady sedimentation and equilibrium condensation / *AIP Conference Proceedings.* V. 1648. Is. 1. DOI: 10.1063/1.4912496. P. 230004-1—230004-4

*Zipser E. J., Lutz K. R.* (1994). The vertical profile of radar reflectivity of convective cells: A strong indicator of storm intensity and lightning probability? // *Mon. Weather Rev.* V. 122. № 8. P. 1751—1759.



Научное издание

*Синькевич Андрей Александрович,  
Довгалоук Юлия Александровна,  
Веремей Николай Евгеньевич,  
Михайловский Юрий Павлович*

## **СЛИЯНИЕ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ**

Оригинал–макет подготовлен в ООО «Амирит»

Подписано в печать 05.06.2018 г.

Формат 70×100 1/16. Гарнитура Times New Roman. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 16,275. Тираж 300 экз. Заказ № 47/29117.

Отпечатано в типографии ООО «Амирит»,  
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 88.

Тел.: 8-800-700-86-33 | (845-2) 24-86-33

E-mail: [zakaz@amirit.ru](mailto:zakaz@amirit.ru)

Сайт: [amirit.ru](http://amirit.ru)