

СТАСЕНКО ВАЛЕРИЙ НИКИФОРОВИЧ

**МНОГОВОЛНОВОЕ АКТИВНО-ПАССИВНОЕ
ЗОНДИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНЫХ (ГРОЗОВЫХ)
ОБЛАКОВ**

25.0030 — Метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

**ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

Нальчик-2004 г.

Работа выполнена в филиале ГГО им. А.И.Воейкова -
Научно-исследовательском центре дистанционного зондирования атмосферы

Научный консультант: доктор физико-математических наук,
профессор **Георгий Георгиевич Щукин**

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор **Неон Александрович Арманд**

доктор физико-математических наук
Мусаби Ногманович Бейтуганов

доктор физико-математических наук
Николай Сергеевич Ким

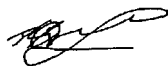
Ведущая организация: **Военно-Космическая Академия им. А.Ф.Можайского**
(г.Санкт-Петербург)

Защита состоится «28» декабря 2004 года в 13.00 часов на заседании
Диссертационного совета Д 327.001.01 при Высокогорном геофизическом институте
по адресу: 360030, КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Высокогорного геофизического
института по адресу: 360030, КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 2.

Автореферат разослан «25» ноября 2004 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета,
доктор географических наук



В.В.Разумов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

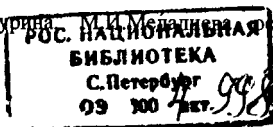
Актуальность темы

Грозы сопровождают многие опасные атмосферные явления и процессы: градо- и торнадосодержащие облака, мезомасштабные конвективные комплексы, циклоны умеренных и тропических широт. Применение дистанционных методов обнаружения гроз (РЛС различных диапазонов радиоволн, системы и датчики типа ALDF, LDAR, SAFIR, OLS, LIS и др.) показало, что электрические процессы в облаке свидетельствуют не только о его существенной микрофизической перестройке, но и предшествуют опасным явлениям погоды (ОЯ), т.е. они фактически являются предикторами ОЯ. К таким предикторам можно отнести резкое увеличение числа внутриоблачных молний (до 60 р/мин и более) за 10-15 мин до появления торнадо или за 5-10 мин до формирования опасных для авиации шквалов (микробарстов). В градовых облаках происходит реверс полярности молний с преимущественно отрицательной на положительную (в период формирования градовых частиц и выпадения града) и обратно (после его окончания).

Внедрение в мировую практику гидрометеорологического обеспечения новых технологий дистанционного наблюдения гроз сопровождается накоплением фактических данных об особенностях электрической активности облаков, которые в силу определенных причинно-следственных связей с некоторой заблаговременностью дают информацию об ОЯ. Исследование физического существа и устойчивости таких связей в различных синоптических и физико-географических условиях является актуальной задачей. Однако до настоящего времени методические подходы к ее решению недостаточно проработаны, т.к. не установлены закономерности эволюции грозовой активности (ГА) в облаках различного происхождения (внутримассовых, фронтальных), причины большой изменчивости пространственно-временных характеристик грозových разрядов (ГР) в таких облаках.

В многочисленных программах исследования гроз используются разнообразные технические средства и при сопоставлении их результатов следует учитывать, что разные датчики «видят» грозу по-разному и, в свою очередь, гроза опасна для различных производств, служб и населения также по-разному. К интерпретации данных наблюдательных систем необходим подход, основанный на возможно более полном учете динамических и физических свойств атмосферных явлений и процессов, в которых имеют место грозы.

В СССР получили развитие специализированные наблюдения за грозowymi облаками и молниями с помощью метеорологических и имеющихся у служб управления воздушным движением РЛС, радиоприемных устройств различного диапазона радиоволн. Коллективы под руководством В.Д.Степаненко, Л.Г.Качурова, М.И.Мельникова осуществляли измерения



параметров эхо-сигналов молний и их электромагнитного излучения (ЭМИ), что позволило в сопоставлении с радиоэхо облаков и осадков изучать закономерности ГА облаков на севере и юге ЕТС. Однако физико-географические условия районов работ и значительно отличающиеся по своим динамическим, микрофизическим и электрическим свойствам облака придали определенную специфику этим исследованиям. Фактически решались разные задачи: изучение грозо-градовых процессов, поиск физических предикторов предгрозового состояния облаков в горных условиях; исследование грозовой активности облаков на равнине

Исследованию грозовых облаков посвящено много работ. Однако, несмотря на появление более точных методов и средств обнаружения ГР, построения каналов молний в пространстве, взаимосвязь динамики облака, степени его опасности с ходом в нем грозы во многом остается областью предположений. Это связано, прежде всего, с отсутствием в Российской Федерации сети автоматических грозопеленгаторов-дальномеров (АГПД), которая совместно с оперативными МРЛ штормоповещения позволила бы решить такую задачу. Поэтому результаты специально организованных исследований грозовых облаков на полевых экспериментальных базах по активному воздействию на гидрометеорологические процессы (АВ) Росгидромета в 80 - 90-х годах и реализованный при этом научно-методический подход не утратили своей актуальности и могут быть положены в основу концепции создания оперативной сети АГПД. Кроме того, недостаточный уровень теоретических исследований, численного моделирования электрического состояния облаков придает большую значимость достоверным экспериментальным данным о закономерностях грозы.

Таким образом, в связи с интенсивным развитием в последние годы дистанционных методов обнаружения грозовых облаков, своевременный диагноз и прогноз опасных явлений, связанных с облачной атмосферой, приобретают большое научное и практическое значение как для физики облаков в целом, так и для оперативного штормоповещения различных отраслей экономики и населения, управления и контроля эффективности АВ.

Цель работы состоит в исследовании закономерностей развития грозовых облаков, эволюции их радиолокационной структуры и грозовой активности на протяжении периода существования с помощью комплекса наземных радиотехнических средств (РТС) и самолетов-метеолабораторий.

Для достижения данной цели поставлены и решены следующие задачи:

- выделение с наибольшей достоверностью предгрозовой, грозоактивной и послегрозовой стадий конвективных облаков;
- определение статистических характеристик параметров радиоэхо облаков, соответствующих этим стадиям;

- разработка метода идентификации в грозовых облаках источников радиолокационных отражений на $\lambda = 11,35$ и 200 см при одновременной регистрации их ЭМИ;
- определение параметров радиоэхо грозовых разрядов на $\lambda = 11, 35$ и 200 см и их сопоставление с эволюцией радиоэхо облаков на $\lambda = 3,2$ и 10 см;
- разработка методологии проведения синхронных наземных и самолетных измерений электрических характеристик облаков.

Научная новизна

Впервые выполнены комплексные исследования закономерностей грозовой активности облаков с использованием активно-пассивных наземных РТС и самолетов-лабораторий на севере ЕТС. В том числе, создана полевая экспериментальная база (ПЭБ Тургош) Росгидромета по АВ на 60° с.ш. и выполнены многолетние (1973-1996) исследования естественного хода грозовой активности в облаках внутримассового и фронтального происхождения.

В результате выполнения работ:

- усовершенствован метод многоволнового активно-пассивного зондирования грозовых облаков, основанный на комплексном и синхронном усвоении радиолокационных, радиотеплолокационных, радиоприемных и самолетных данных;
- создан комплекс РТС обнаружения облаков и ионизированных каналов молний различного типа (внутриоблачных разрядов и разрядов на землю), что позволило выполнить ряд исследований прикладного характера в области грозового электричества;
- получены новые физические данные об электрическом состоянии облаков с помощью наземного комплекса РТС и самолетов-лабораторий.
- определены параметры радиоэхо облаков в предгрозовой, грозоактивной и послегрозовой стадиях при достоверном контроле времени начала и окончания грозовой активности в облаке;
- установлено взаимное расположение в облаках зон различной отражаемости, интенсивности осадков, повышенной турбулентности и молниевой активности. Разработан и защищен патентом РФ способ уменьшения обледенения самолетов путем АВ на переохлажденную часть облака;
- определены закономерности грозовой активности в одно- и многоячейстых облаках внутримассового и фронтального происхождения.

Практическая значимость работы

Полученный в работе опыт комплексных исследований мощных конвективных облаков может быть использован в программах и проектах, связанных с: а) изучением опасных и

стихийных явлений (грозо-градовые и смерчсодержащие облака, мезомасштабные конвективные комплексы, тропические циклоны); б) оценкой влияния гидрометеорологических условий на распространение радиоволн; в) определением работоспособности (вероятности обнаружения, точностных характеристик) датчиков молний различного типа (в т.ч. и космических); г) проведением ракетных и самолетных работ по воздействию на облака, осадки, грозы и др.

На базе созданного на ПЭБ по АВ (Тургош) ГГО комплекса РТС на протяжении 1973-1996 гг. в интересах различных заказчиков:

- проведены сравнительные испытания, в т.ч. государственные, автоматических грозопеленгаторов различного типа: Оранж и Очаг-2П (НИИ ИТ, г. Челябинск), Верей-М (12 ГУМО РФ), малая сеть грозопеленгаторов (ОКТЬ ЛГУ);
- проведены первые наземные сравнительные испытания бортовых РЛС типа РОЗ-1, Эмблема, Гроза-62 и МРЛ-1 (ГосНИИ ГА);
- проведены испытания сети приборов измерения напряженности электрического поля, оснащенной телеметрическими каналами (МЭИ);
- испытаны счетчики молниевых разрядов в интересах защиты высоковольтных линий электропередач (Томский политехнический институт);
- разработаны методические рекомендации по метеобеспечению взлета и посадки космического корабля «Буран», основанные на использовании наземных РТС и самолета-лаборатории (НПО «Энергия»);
- разработаны методические указания по обходу зон грозовых облаков в целях обеспечения безопасности полетов авиации (ГосНИИ ГА, г. Санкт-Петербург);
- проведены многолетние совместные исследования различных метеобразований наземными РТС ПЭБ и самолетами-лабораториями ЦАО (Н-16), НПО «Ленинец» (Ан-26), НПО «Взлет» (Ил-18, Ан-12) и ряда других организаций, в том числе по специальным программам.

На защиту выносятся следующие положения и результаты работ:

1. Усовершенствованный метод многоволнового активно-пассивного дистанционного зондирования (ДЗ) грозовых облаков и его техническая реализация в виде комплексов РТС ВИКИ им. А.Ф.Можайского и ГГО им. А.И.Воейкова.
2. Новые закономерности и результаты в области физики грозы, динамики развития и грозовой активности мощных конвективных облаков внутримассового и фронтального происхождения.
3. Пространственно-временные характеристики грозовой активности, наблюдаемой РЛС различных диапазонов радиоволн (11, 35 и 200 см).

4 Методология организации и результаты исследований грозовых облаков с помощью наземного комплекса РТС и самолетов-лабораторий

5 Метод проверки точностных характеристик и вероятности обнаружения грозовых разрядов грозопеленгаторами-дальномерами, грозорегистраторами различных конструкций при их работе совместно с комплексом РТС ПЭБ

Личный вклад и апробация работы

Основные научно-методические и технические результаты работы получены автором лично или под его руководством в ходе создания и проведения наблюдений на комплексах РТС на полигоне ВИКИ им А Ф Можайского и экспериментальных базах ГГО им А И Воейкова (в Ленинградской области и Крыму), на которых выполнялись работы по исследованию грозовых облаков, АВ на них и изучению влияния метеообразований на распространение радиоволн Наряду с этим, автором разработаны алгоритмы синхронной обработки с помощью ПЭВМ информации РЛС различных диапазонов радиоволн об эволюции грозовой активности Автором проведен анализ и интерпретация всех вошедших в диссертационную работу результатов, получены физические выводы и дано их обоснование, подготовлены предложения по дальнейшему развитию работ в области исследования грозо-градовых облаков и АВ на них

Результаты диссертационной работы опубликованы в 65 научных трудах

Основные результаты работы были представлены на **I, II и III** Всесоюзных симпозиумах по атмосферному электричеству (г Ленинград, 1976 и 1984гг, г Тарту, 1986г), **I** Всесоюзном симпозиуме по радиофизическим методам исследования (г Ленинград, 1977г), **IV, VI и VII** Всесоюзных совещаниях по радиометеорологии (г Москва, 1978г, г Таллинн, 1982г, г Суздаль, 1986г), **I** Всесоюзной научно-технической конференции по безопасности полетов (Киев, 1981г), Всесоюзном семинаре по техническим средствам для государственной системы контроля природной среды (г. Обнинск, 1981г), **IV** Всесоюзной научно-практической конференции по безопасности полетов (г Ленинград, 1985г), **VIII, IX, X и XII** Международных конференциях по атмосферному электричеству (г Уппсала, 1988г , г Санкт-Петербург, 1992г , г Осака, 1996 г, г Версаль, 2003г), Технической конференции ВМО по инструментам и методам наблюдений (ТЕСО-92, г Вена, 1992г), 26-й Международной конференции по радиолокационной метеорологии (г Бостон, 1993г), Совещании ВМО по измерениям характеристик облаков (г. Мехико, 1997г), 7 и 8-й Научных конференциях ВМО по активным воздействиям (г. Чианг Май, 1999г, г Касабланка, 2003г), Всероссийской научной конференции по дистанционному зондированию земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами (г Муром, 2001 г), XV Международной конференции по плановым и непреднамеренным воздействиям (г. Альбукерк, 2001г), Всероссийской

конференции по физике облаков и активного воздействия на гидрометеорологические процессы (г.Нальчик, 2001г.); XXI Всероссийском симпозиуме «Радиолокационное исследование природных сред» (г.С.Петербург, 2003г.), V Российской конференции по атмосферному электричеству (г.Владимир, 2003г.).

Содержание работы.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, библиографии (191 наименование); содержит 241 страницу, включая 89 рисунков и 38 таблиц.

В первой главе сделан краткий обзор параметров, характеризующих электрическое состояние облаков, и возможностей их дистанционного измерения. Рассмотрены существующие методы измерения таких параметров и их ограничения при исследовании эволюции грозовой активности.

Наиболее приемлемыми для контроля электрических характеристик облаков являются самолетные и наземные (сетевые) измерения напряженности электрического поля (E_p). Однако здесь возникает ряд методических и технических проблем: проведение бортовых измерений должно сопровождаться измерением параметров облаков по траектории полета самолета (электрические характеристики часто определялись без анализа отражаемости и других пространственно-временных параметров облака, т.е. без надлежащего учета свойств объекта, в котором имеют место электрические процессы), а использование нескольких ПНП вызывает необходимость создания единого пункта сбора информации от отдельных датчиков, т.к. одиночные ПНП имеют ограниченный радиус действия (не более 4-5 км) и на их показания влияет эффект перемещения облака: его приближение сопровождается ростом E_p , а удаление - уменьшением E_p , что искажает реальную картину электрического состояния облака.

Измерение электрического поля конвективного облака с помощью специальных радиозондов, доставляемых самолетами или ракетами, не всегда позволяет получить достоверные данные, т.к. они могут не пройти через области основных зарядов облака.

Отмечено, что в части определения взаимосвязи электрических, микрофизических и динамических характеристик облаков наиболее обобщенными остаются данные самолетных наблюдений И.М.Имянитова, позволившие на ограниченном материале систематизировать электрические свойства конвективных облаков на разных стадиях развития и начать сопоставление электрических и других (метеорологических) характеристик таких облаков. Известные ограничения контактных методов исследования гроз определили необходимость применения средств дистанционного зондирования.

В конце 60-х - начале 70-х годов в СССР получили развитие специализированные

наблюдения за грозowymi облаками и молниями с помощью РЛС. Измерение параметров эхосигналов молний и их ЭМИ позволило в сопоставлении с радиоэхо облаков и осадков изучать закономерности грозовой активности таких облаков.

В Ленинградской области комплексные радиотехнические исследования гроз были начаты под руководством В.Д.Степаненко и С.М.Гальперина в ВИКИ им. А.Ф.Можайского и имели своей целью, в частности: изучение радиолокационных характеристик грозowych разрядов в метровом и дециметровом диапазонах, параметров ЭМИ ГР в КВ, СВ и СДВ диапазонах; определение параметров радиоэхо кучево-дождевых облаков в сантиметром и дециметровом диапазонах радиоволн.

В восточной Грузии (Алазанской долине) и в Ставропольском крае (в районе Ессентуков) ЛГМИ под руководством Л.Г.Качурина и ВГИ под руководством М.И.Медалиева были организованы радиолокационные комплексы в горных районах, отличающихся интенсивной грозовой деятельностью. В последствии исследования гроз были продолжены ВГИ на полигонах в Республике Кабардино-Балкария.

Состав используемых для наблюдений за грозowymi облаками в указанных районах радиотехнических средств был примерно одинаков (РЛС МРЛ-1; 2; 5, ДРЛ-7, ПРВ-10, П-15, П-12), что определило некоторое сходство реализованных программ исследований. Однако физико-географические условия районов работ придали определенную специфику этим исследованиям. Отличия в динамике и пространственной структуре облаков на юге и севере ЕТР сказываются на характерном пространственно-временном масштабе и интенсивности гроз. В Ленинградской области (на равнине) наблюдаются одно- и многоячейстые грозowe облака, на юге России (в предгорьях и горных районах) грозо-градовые процессы имеют преимущественно многоячейстую и суперъячейстую радиолокационную структуру. На 60° с.ш. впервые были обнаружены аномально активные грозowe облака (с интенсивностью грозы 60 р/мин и более), в которых отмечались зоны постоянного отражения на $\lambda = 2$ м.

В Ставропольском крае и Республике Кабардино-Балкария велись наблюдения за трансформацией радиолокационных характеристик градowych облаков, выпадением града и грозовой активностью. Было установлено, что облако становится градоопасным, если интенсивность грозы превышает 20 р/мин. При очень интенсивном (катастрофическом) градобитии в облаке фиксируется до 80-100 р/мин. В целом отмечена тесная взаимосвязь между появлением в облаке частиц твердых осадков и грозовой активностью. Установлен факт сдвига максимума ГА в тыловую часть грозowego очага и постепенного увеличения линейного размера ГР к окончанию грозы.

С.М.Сижажевым указывается на наличие прямой связи между интенсивностью грозы и размером градowych частиц. Гроза обычно начинается за 5-10 мин до начала градообразования и

продолжается 10-15 мин после его завершения. В 84% случаев диаметр градин достигает максимальных размеров на 5-17 мин раньше, чем ГА достигнет своего максимума.

На полигоне ЛГМИ в Алазанской долине в рамках изучения особенностей ГА в горных условиях, поиска предикторов предгрозового состояния облаков активно-пассивные радиолокационные наблюдения показали:

наличие электрически активных ячеек - локальных областей в общем пространственно-временном распределении эхо-сигналов ГР - размером 2-10 км и продолжительностью 10-15 мин;

- смещение центра ГА (максимума повторяемости молний по дальности) до 15 км относительно расположения максимума отражаемости ($Z_{\text{макс}}$) облака в его тыловую часть;

- наличие нетеплового радиоизлучения (НТРИ), обнаруживаемого в R до 50 км остронаправленными антеннами с коэффициентом усиления $G = 100-200$ и имеющего достаточно стационарный характер. Л.Г.Качуриным с соавторами вводится обобщенная функция, количественно характеризующая степень грозовой опасности каждой точки пространства - комплексный критерий грозоопасности, который может иметь практическое значение для авиации при идентификации условий возможного поражения самолета молнией.

Анализ данных об условиях возникновения ГР, полученных доступными для различных исследователей средствами, показывает, что в облаках существуют электрически активные области (зоны) формирования зарядов, достаточных для возникновения и поддержания молний, и эти зоны имеют определенную взаимосвязь с ОЯ. В основу разработок в США новых наземных и спутниковых грозопеленгационных систем закладывается задача идентификации опасных свойств (состояний) конвекции. Открываются специальные программы по исследованию корреляции между параметрами ГА и конвективными особенностями шторма.

В плане обоснования физических свойств электроактивных зон (ЭАЗ) облака в работе рассматривается возможность существования объемов облака, где одновременно находятся кристаллические, поликристаллические и жидко-капельные частицы при температуре от -10° до -40°C , пропорциональная концентрация которых обеспечивает эффективный процесс увеличения зарядов облака определенного знака путем соударения частиц. Отмечена необходимость применения дистанционных методов зондирования грозовых облаков как для исследования физических свойств ЭАЗ в облаках, так и для анализа особенностей развития облаков в мезомасштабе.

Во второй главе проводится научно-методическое обоснование применения активно-пассивных РТС для измерения параметров грозовых облаков, находящихся на различных

II

стадиях развития. Для этого на основании существующих данных о предгрозовой, грозоактивной и послегрозовой стадиях облаков выбраны технические средства, способные достоверно идентифицировать эти стадии. При этом реализован метод многоволнового активно-пассивного зондирования облаков и грозовых процессов в них, обеспечивший физическую интерпретацию экспериментальных данных.

Радиолокаторы сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов радиоволн (МРЛ-1, ПРВ-10, ДРЛ-7 и П-12) измеряли параметры облаков, осадков и грозовых разрядов различного типа, а радиоприемные устройства УКВ, КВ, СВ, и СДВ диапазонов и регистратор формы импульсов (РФИ-860) - амплитудно-частотные характеристики ЭМИ грозовых облаков. Автоматические грозопеленгаторы-дальномеры различной конструкции (ПАГ-1, Очаг-2П, Оранж, Веря-М, ALDF-141Т) осуществляли контроль за развитием грозовой активности в R до 200 км от ПЭБ. Работа АГПД совместно с комплексом РТС позволила, в свою очередь, определить их работоспособность (вероятность обнаружения ГР и точностные характеристики). Внешний вид комплекса активно-пассивных РТС приведен на рис.1, его блок-схема - на рис. 2.

Объединение данных РТС осуществлено на основании изучения особенностей раздельного обнаружения грозовых облаков и разработки метода комплексирования данных, способствующего дальнейшему пониманию существа наблюдаемых процессов, разнообразие которых еще не находит адекватного объяснения.

Усвоение (документирование) и последующая обработка разнообразной информации стали возможными после решения следующих научно-методических задач:

- достоверного выделения предгрозовой, грозоактивной и послегрозовой стадий конвективных облаков;
- определения статистических характеристик параметров радиоэхо облаков, соответствующих этим стадиям;
- определения параметров радиоэхо ГР в метровом и дециметровом диапазонах и сопоставления их с эволюцией облаков, наблюдаемых МРЛ;
- разработки метода идентификации в грозовых облаках источников радиолокационных отражений в метровом и дециметровом диапазонах при одновременном использовании данных регистрации ЭМИ;
- определения закономерностей эволюции радиоэхо облаков и ГР.

Это стало, в свою очередь, возможным благодаря решению ряда технических вопросов, в частности:

- организации единого запуска всех РЛС для обеспечения электромагнитной совместимости и возможности многоканальной регистрации данных;
- осуществлению преобразования аналоговых выходных сигналов РЛС в цифровые для

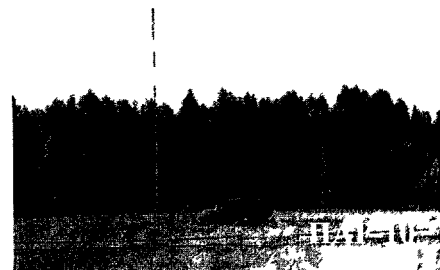
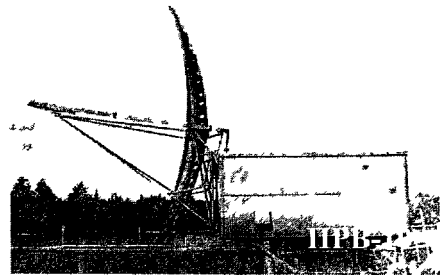
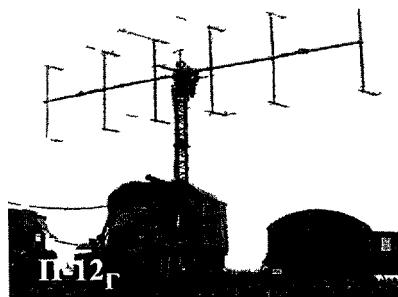
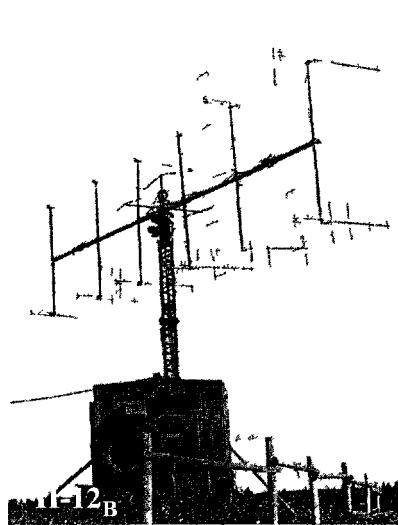
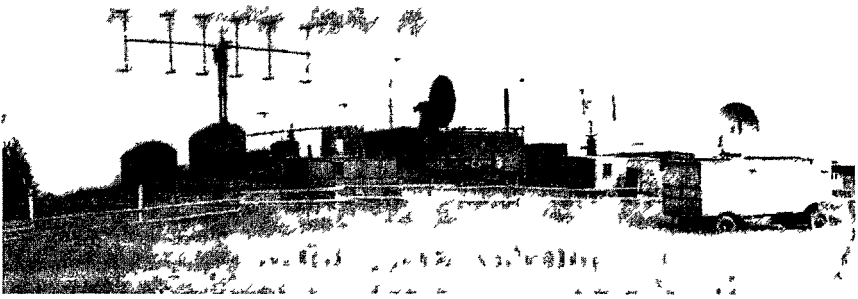


Рис 1 Комплекс радиотехнических средств ПЭБ по АВ Тургош ГГО им А И Воеикова

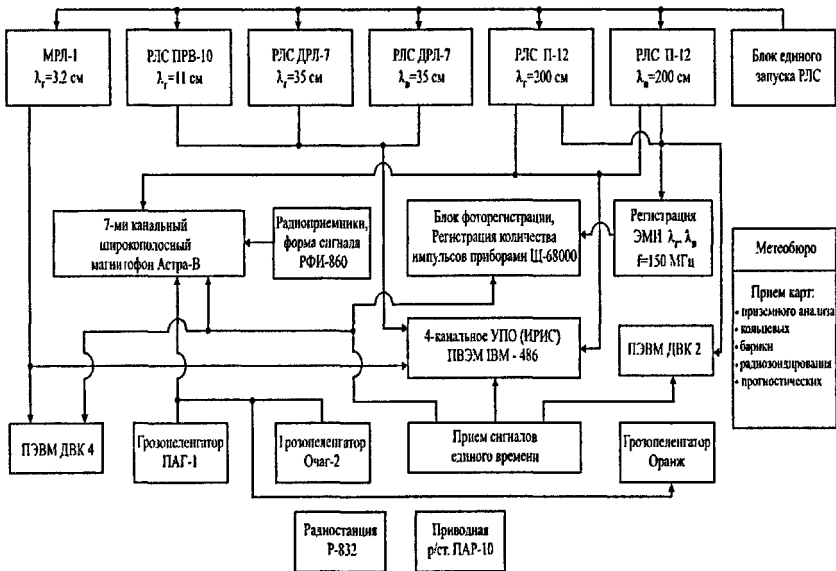


Рис. 2. Блок-схема активно-пассивных радиотехнических средств, используемых для исследования грозовых облаков

обработки данных с помощью ПЭВМ;

- совмещения во времени поимпульсной регистрации радиоэхо молний с записью их ЭМИ и сигналов точного времени.

Принцип совмещения радиолокационной и радиоприемной информации о ГР отражен на рис. 3, где в качестве примера приводятся результаты одновременного обнаружения на $\lambda = 11$ и 200 см вспышки молнии, состоящей из 3-х обратных ударов (ОУ), и соответствующая последовательность импульсов их ЭМИ на частотах 7 и 500 кГц. Временная последовательность максимумов радиоэхо (Рг макс) и импульсов ЭМИ иллюстрирует процесс развития каналов молнии внутри облака между локальными зонами электрических зарядов, прерываемый обратными ударами. Сравнительный анализ радиоэхо ГР на различных λ с их излучением в разных диапазонах радиоволн позволяет достовернее идентифицировать источник радиолокационного отражения: ГР различного пространственно-временного масштаба и типа, количество ОУ и их расположение в облаке.

Возможности обнаружения облаков, осадков и грозовых разрядов с помощью РЛС МРЛ-1, ПРВ-10, ДРЛ-7 и П-12 определены с помощью уравнений радиолокации объемной и

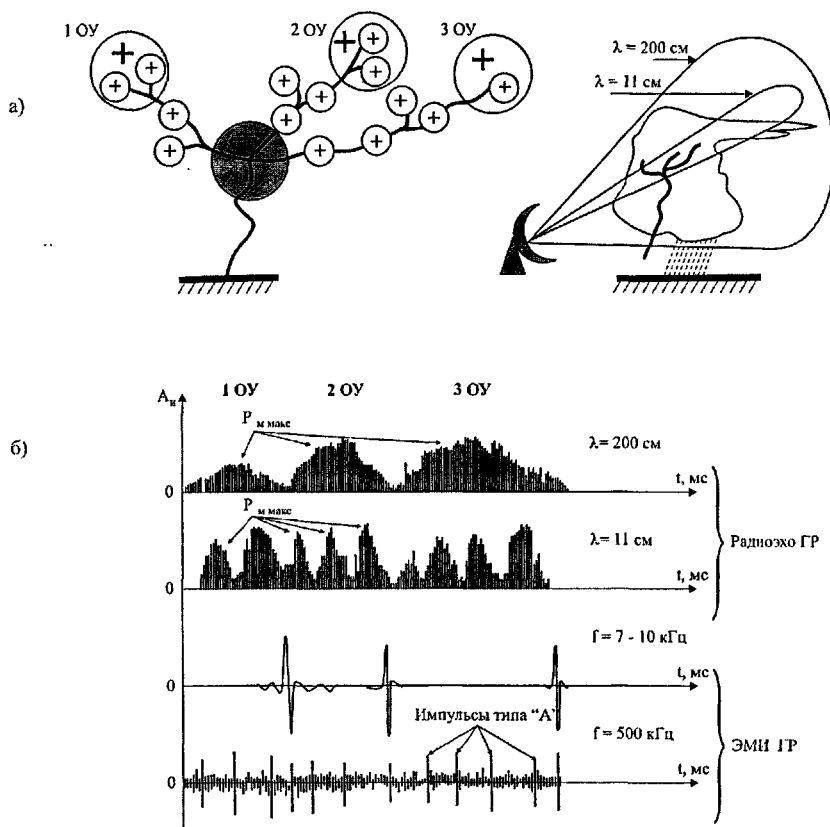


Рис. 3. Принцип совмещения радиолокационной и радиоприемной информации о вспышке молнии, состоящей из 3 обратных ударов:

а) схематическое представление молнии и ее наблюдения различными РЯС,
 б) поимпульсная последовательность радиоэхо и сигналов ЭМИ молний

одиночной цели, что позволило оценить их метеорологическую эффективность (способность обнаруживать указанные метеоцели на различном удалении и измерять их амплитудно-временные характеристики). Экспериментальная проверка этих расчетов путем измерения эффективной поверхности рассеивания (σ) ГР с помощью РЛС П-12 и ДРЛ-7 показала, что диапазон изменения σ молний достигает 4-х порядков (до 10 м), а за время существования радиоэхо ГР ($\tau = 0,6-0,8$ с и более) радиолокатор фиксирует 150-200 отраженных от

ионизированных каналов ГР импульсов. В связи с тем, что ГР имеют сложную конфигурацию, в двух дополнительных РЛС П-12 и ДРЛ-7 была изменена поляризация радиоволн (с горизонтальной - λ_r на вертикальную - λ_v). Эта мера способствовала увеличению на 17 % общего числа фиксируемых РЛС разрядов, т.е. приблизиться к истинному количеству ГР, имевших место в облаке. В целом разработанный метод применения активно-пассивных РТС обеспечил достоверное обнаружение облаков, осадков и ГР, а также комплексирование данных с целью изучения динамических, микрофизических и электрических свойств облаков на протяжении периода их существования.

Данные о расположении в облаках ГР были использованы в испытаниях, в т.ч. государственных, АГПД Очаг-2П и Оранж, системы Верея-М, а также серийного грозоупеленгатора ALDF-141Т (производство США). Испытания показали неспособность Очага-2П и Оранжа достоверно определять начало и окончание грозы (начало грозы фиксировалось с запаздыванием до 12 и более минут), т.е. непригодность их к оперативной работе. Испытания большебазовой (расстояние между пунктами ~ 800 км) грозоупеленгационной системы следующего поколения «Вереи-М» показали достаточно высокую точность этой системы (координаты ГР ложились в поле радиоэхо молнии, зафиксированной РЛС П-12). Результаты испытаний в июле-августе 1996 г. ALDF-141Т дали представление о распределении параметров ГР (полярность, количество ОУ, величина тока в ОУ и др.) в облаках внутримассового происхождения в R до 200 км от ПЭБ. Оказалось, что количество ОУ во вспышке молнии на 60° с.ш. достигает 8-10, а разброс в 3-7 раз средних значений тока, времени роста амплитуды тока до максимума в различные дни может свидетельствовать об отличиях микрофизических и динамических свойств облаков. Это требует дальнейшего исследования.

В третьей главе приведены результаты измерений характеристик грозовой активности облаков с помощью РТС ПЭБ, в частности, параметры ЭМИ и эхо-сигналов молний, измерявшихся РЛС метрового и дециметрового диапазонов (рис. 4).

Наблюдения молний РЛС П-12 и ДРЛ-7 с разной поляризацией радиоволн показали, что: средние значения ЭПР на $\lambda = 200$ см (σ_{200}) и на $\lambda = 35$ см (σ_{35}) в R до 100 км на обеих поляризациях составили 50-370 м². Максимальные значения σ_m вспышек молний достигали 10³ м², а радиус радиолокационного обнаружения молний не превысил 150-200 км; средние значения длительности существования радиоэхо τ_{200} и τ_{35} в R до 120 км составили 470 и 300 мс соответственно, при этом на $\lambda = 35$ и 200 см отличия τ на обеих поляризациях достигают 60-80 мс ($\tau_r > \tau_v$). Эти данные свидетельствуют о пригодности РЛС метрового и дециметрового диапазонов для исследования ГР и значительном (пространственно-временном) разнообразии процессов грозовой активности в облаках.

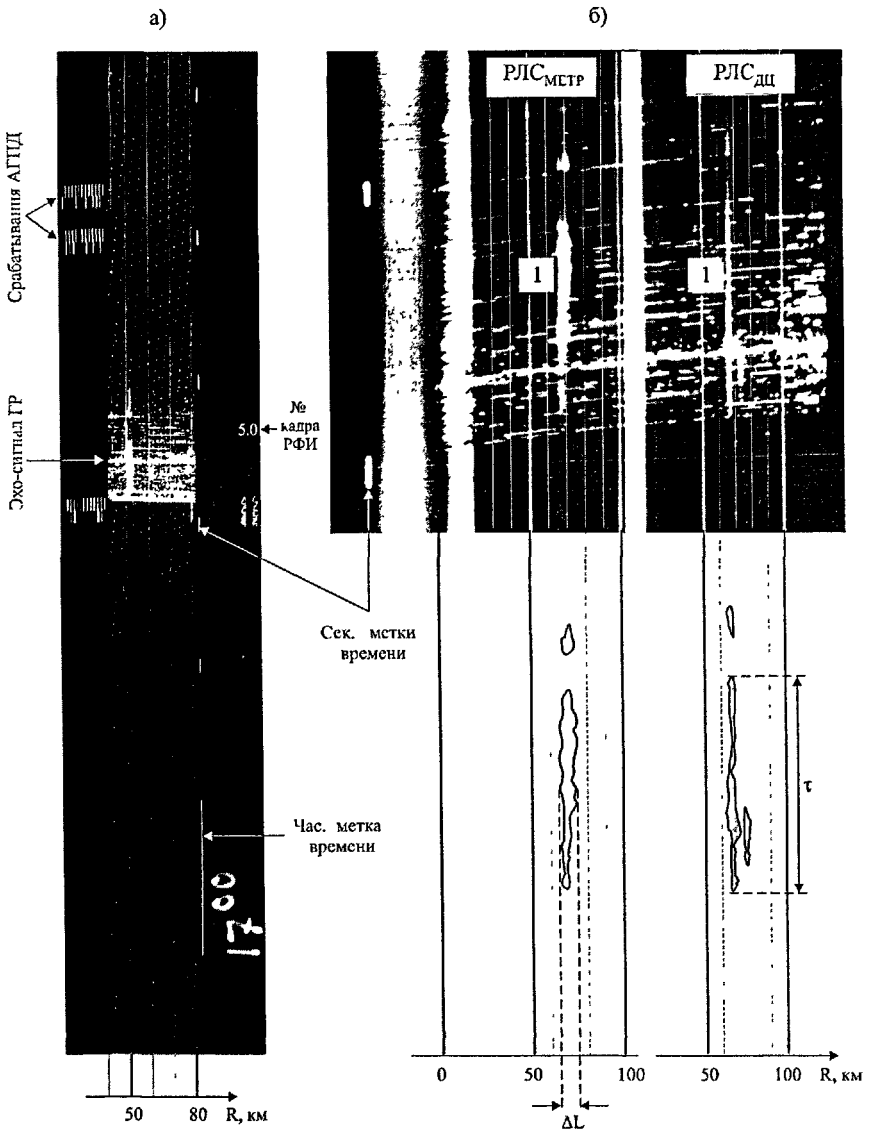


Рис. 4. Примеры фоторегистрации радиоэхо вспышек молний РЛС метр (а), одновременно РЛС_{МЕТР} и РЛС_{ДИ} (б)

Пространственный (радиальный) размер радиоэхо ГР (L_p) позволяет:

- оценить размеры зон, в которых происходит накопление электрических зарядов, приводящих к возникновению ГР, т.к. вспышка молнии проходит через области основных зарядов облака (иллюстрирует зарядовую структуру облака);

- сформулировать требования к точности определения местоположения молний с помощью АГПД, которые представляют молнию как точечный источник ЭМИ, несмотря на то, что эти источники являются разветвленными излучателями и занимают объемы в сотни км³.

В течение 1985-1988 гг. исследованы возможности по наблюдению гроз РЛС с $\lambda = 11$ см (ПРВ-10). Установлено, что каналы молнии она обнаруживает на расстоянии до 250 км в тех случаях, когда антенна РЛС направлена неподвижно на верхнюю часть грозового облака.

В 80% случаев τ_{11} не превышает 300 мс ($\bar{\tau}_{11} = 150$ мс), $L_{p11} < 6$ км, а $\sigma_{11} \leq 38$ м², но может достигать 76 м². Одновременная регистрация молний на $\lambda = 11$ и 200 см показала, что РЛС ПРВ-10 способна обнаруживать в промежутках между ОУ слаботочные разряды, которые "подключают" новые области зарядов в облаке к каналу ОУ. На это указывают импульсы ЭМИ на частоте 500 кГц, которые совпадают с максимумами радиоэхо молнии $R_{\Gamma_{\max}}$, следующими на $\lambda = 11$ см через ~ 30 мс (рис. 3). Аналогичные результаты получены с помощью радиоинтерферометрической системы SAFIR, которая обнаруживает маломасштабные внутриоблачные разряды длительностью 10-30 мс в промежутках между повторными разрядами вспышки молнии.

С учетом этих фактов в 1990 году исследования были продолжены на МРЛ-5 в г. Хайфоне (СРВ). В соответствии с методом, разработанным на ПЭБ Тургош, в станции были установлены регулируемая задержка импульсов запуска станции для увеличения обзора до 400 км и аппаратура фотосъемки экрана ИКО/ИДВ. На рис. 5 приведено радиоэхо молнии (для выделения ГР на фоне сигнала облака в приемник введено ослабление 12 дБ) на $R = 200-220$ км. Видно, что радиоэхо ГР размером 20 км и продолжительностью ~ 1 с состояло из 7 ОУ (запись ЭМИ ГР в этих экспериментах не велась). МРЛ-5 фиксировала молнии на R до 360 км.

Особый интерес с точки зрения изучения местоположения ЭАЗ в облаке представляет процесс формирования радиоэхо ГР. Распространение по дальности плазменных каналов стримеров внутриоблачного ГР (или внутриоблачных составляющих разряда на землю) имеет ступенчатый характер с шагом 2-3 км, при этом области максимальных амплитуд радиоэхо ($R_{\Gamma_{\max}}$) хорошо различимы и сохраняют свое расположение в течение вспышки молнии. Здесь заметны 8 областей $R_{\Gamma_{\max}}$, которые можно считать центрами зарядов (или ЭАЗ), вовлеченными во вспышку молнии. Эти области представляют наибольший интерес для изучения с применением доплеровских и поляризационных (радиолокационных и радиометрических) методов ДЗ, в том числе и в интересах АВ.

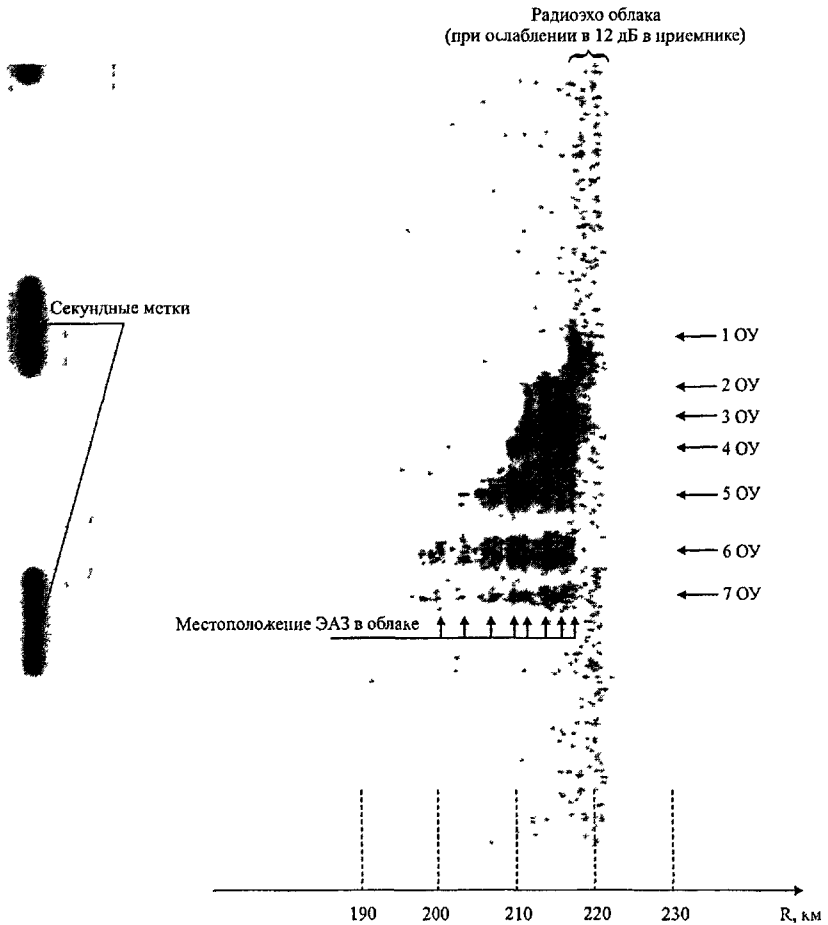


Рис 5 Местоположение электроактивных зон в облаке, иллюстрируемое вспышкой молнии длительностью ~ 1 сек, состоящей из 7 ОУ по данным МРЛ-5

В экспериментах по исследованию ЭМИ грозовых облаков с помощью РЛС П-12 определялись длительность порций ЭМИ грозовых облаков, их связь с интенсивностью грозы, с временем существования радиозэх молний и радиус обнаружения ЭМИ таких облаков. Эти эксперименты проводились только в те дни, когда по данным МРЛ в R до 300 км наблюдались одно-два облака. Установлено, что длительность ЭМИ молний близка к времени существования их радиозэх и зависит от числа повторных разрядов во вспышке молнии, а интенсивность

излучения грозových облаков достигает 400 имп/с и уменьшается всего в 2 раза по мере их удаления от 100 до 250 км.

В этой главе также рассматриваются вопросы, связанные с моделированием процессов электризации облаков, что необходимо для интерпретации экспериментальных данных, в частности, об ЭАЗ. Наиболее эффективным механизмом электризации в настоящее время считается электризация, возникающая при столкновениях с отскоком ледяных кристаллов с частицами крупы/града. Этот механизм исследовался в лабораторных условиях в Англии и России и в натурных экспериментах в США, включавших радиолокационные наблюдения, самолетные и наземные измерения электрических зарядов ледяных облачных и электрических полей, создаваемых ими.

Предварительные теоретические оценки, основанные на использовании этого механизма, показывают возможность роста электрических зарядов облака до 10-20 Кл. Более строгое решение задачи об электризации ЭАЗ облака, представляющей цилиндрическую область радиуса R и высотой H, на основе данного механизма электризации проводится с использованием следующей системы уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(w - \bar{v}_1)\rho_1 + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r u \rho_1) &= S_1 - \gamma_1 \rho_1 \\ \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(w - \bar{v}_2)\rho_2 + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r u \rho_2) &= -S_2 - \gamma_2 \rho_2 \\ \frac{\partial \rho_3}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(w - \bar{v}_3)\rho_3 + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r u \rho_3) &= -S_3 - \gamma_3 \rho_3 \quad \text{О)} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} &= -4\pi(\rho_1 + \rho_2 + \rho_3) \\ E_r &= -\frac{\partial \varphi}{\partial r}, \quad E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} \end{aligned}$$

где ρ_1, ρ_2, ρ_3 - плотности электрического заряда, сосредоточенные на частицах крупы, ледяных кристаллов, водяных капельках;

w, u - составляющие скорости конвективных движений в цилиндрической системе координат (r, ϕ, z) ;

$\bar{v}_1, \bar{v}_2, \bar{v}_3$ - скорости седиментации частиц, усредненные по функциям распределения;

S_1, S_2, S_3 - столкновительные интегралы, описывающие электризацию частиц крупы/града, ледяных кристаллов и водяных капель при столкновениях с отскоком;

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ - коэффициенты, определяющие потери электрического заряда при столкновениях и за счет электрической проводимости;

E_r, E_z - радиальная и вертикальная составляющие напряженности электрического поля;

φ - потенциал электрического поля, создаваемый облачными электрическими зарядами.

Для интегралов S_1, S_2, S_3 использовалось представление

$$S_1 = \frac{\pi}{4} \iint E_{21}(D_2 + D_1)^2 |\bar{v}_1 - \bar{v}_2| N_1(D_1) N_2(D_2) \delta q_{12} dD_1 dD_2 + \frac{\pi}{4} \iint E_{31}(D_3 + D_1)^2 |\bar{v}_1 - \bar{v}_3| \delta q_{13} N_1(D_1) N_3(D_3) dD_1 dD_3, \quad (2)$$

где E_{21}, E_{31} - коэффициенты столкновения с отскоком частиц крупы/града с ледяными кристаллами и водяными каплями, $\delta q_{12}, \delta q_{13}$ - заряд, которым обмениваются частицы при одном столкновении; D_1, D_2, D_3 - диаметры частиц.

С использованием (1) и (2) и в предположении $u = 0, \delta q_{13} = 0$, т.е. в случае одномерного движения воздушного потока и отсутствия электризации при столкновении частиц крупы/града с водяными частицами были рассчитаны стационарные распределения плотности электрического заряда крупы и мелких ледяных частиц с высотой z . При этом для δq_{12} использовалось представление

$$\delta q_{12} = 7,3 \times 10^{-14} D_2^4 [v_1(D_1) - v_2(D_2)] \delta L f(\tau) \quad [\text{Кл}],$$

где $\delta L = LWC - LWC_{\text{крит}}$, $LWC_{\text{крит}}$ - критическая водность облака, равная $0,1 \text{ г/см}^3$, $f(\tau)$ - функция переохлаждения облака, определяемая выражением

$$f(\tau) = a\tau^3 + b\tau^2 + c\tau + d, \quad a = -1,7 \times 10^{-5}, \quad b = -0,003, \quad c = -0,05, \quad d = 0,13$$

$$\tau = T - T_0, \quad T_0 = 273^\circ \text{C}$$

а также предполагалось, что размеры частиц крупы распределены по экспоненциальному закону, а распределение размеров ледяных кристаллов - монодисперсно.

Найденные распределения ρ_1 и ρ_2 с высотой использовались для расчетов напряженности электрического поля на оси цилиндра, с помощью четвертого уравнения системы (1). Проведенные расчеты показали, что в процессе эволюции облака развивается дипольная структура с зарядами $Q_+ = |Q_-| = (55-550) \text{ Кл}$, а при $Q_+ = |Q_-| = 110 \text{ Кл}$ внутри облака достигается напряженность поля $E \approx 360 \text{ кВ/м}$, т.е. величина E_p близка к пробойному значению. Из этих расчетов следует вывод, что уже при небольшом расхождении областей, заряженных противоположными знаками, возникают условия для развития внутриоблачных разрядов, которые, как правило, предшествуют разрядам облако-земля. Полученные в этой главе результаты также могут свидетельствовать о взаимосвязи напряженности электрического поля с интенсивностью выпадающих осадков (плотность электрического заряда $\rho \sim N_1$) с учетом того, что жидкие осадки образуются из твердой фазы.

В четвертой главе приведены результаты исследований закономерностей эволюции грозовой активности одноячеистых конвективных облаков.

Успешный диагноз и прогноз грозовых облаков, которые в Ленинградской области в 80% случаев развиваются на холодных фронтах и являются многоячейстыми, зависит от понимания закономерностей эволюции элементов конвенции - конвективных ячеек (КЯ) - локальных максимумов отражаемости (Z), существующих 20-40 минут, а также многоячейстых облаков, являющихся суперпозицией КЯ. Поэтому в данной главе проанализированы одноячейстые облака и определены особенности их грозовой активности.

Метод исследований предусматривал горизонтальные разрезы КЯ на 5 уровнях высоты (3, 5, 7, 9 и 11 км) с интервалом 5-7 мин и вертикальные разрезы через зону $Z_{\text{макс}}$. На основе 2-3 таких обзоров определялась тенденция эволюции КЯ, в т.ч. изменение во времени профиля $Z = f(H)$ и верхней границы радиоэхо ($H_{\text{вр}}$). Наблюдения за ГР начинались при $H_{\text{вр}} \geq 7$ км и $\lg Z \geq 2$ на высоте 5 км. Разделение предгрозовой, грозоактивной и послегрозовой стадий осуществлялось по времени обнаружения в ячейке первой и последней молний с использованием 2-х РЛС П-12 и 2-х ДРЛ-7, при этом общий сектор наблюдений в азимутальной плоскости составил $\sim 35^\circ$. Это позволило контролировать грозовую активность в нескольких облаках (или участке атмосферного фронта) одновременно. Таким образом были определены средние значения и дисперсии параметров радиоэхо КЯ на указанных стадиях. Ячейки согласно известному радиолокационному критерию грозоопасности Y разделялись на группы (I группа: $Cu\text{ cong} \rightarrow Cb$, II группа: $Cb_{\text{в}}$ и грозовые $Cb_{\text{р}}$). У ячейки определялись: период существования радиоэхо T , время достижения $Z_{\text{макс}} - t_1$, время диссипации - t_2 и отношение t_1/T . Исследовано 110 внутримассовых ячеек. Средние значения и СКО параметров радиоэхо КЯ разных групп приведены в табл.1, а аналогичные статистические характеристики грозовых ячеек в предгрозовой, грозоактивной и послегрозовой стадиях - в табл. 2.

Установлено, что период развития ячеек до $Z_{\text{макс}} (t_1)$ равен 16-24 мин и составляет 0,3-0,4 T . Для получения зависимости $Z = f(t)$ ячеек определялись средние значения и СКО параметров радиоэхо в следующие моменты времени: 0,5 t_1 (рост), t_1 (стадия максимального развития), 0,5 t_2 (диссипация).

На рис. 6 в качестве примера приведены значения $Z(t)$, построенные по 5 точкам для ячеек различных групп. Видно, что $Z = f(t)$ можно аппроксимировать квадратичной функцией вида $y(x) = ax^2 + bx + c$ с быстрым переходом от стадии роста к стадии диссипации.

Обобщенные данные показывают, что:

- скорость изменения Z на стадии развития КЯ всех групп в 2-2,5 раза больше, чем на стадии диссипации;
- у ячеек всех групп на стадии диссипации σ_z в 2 раза больше, чем на стадии роста;
- выделенные по величине $Y = 25$ ячейки $Cb_{\text{р}}$ облаков имеют в 1,5-3 раза большие значения всех параметров радиоэхо по сравнению с ячейками $Cb_{\text{в}}$ облаков;

Таблица 1

Средние значения и СКО параметров радиоэхо конвективных ячеек

Группа ячеек Параметр радиоэхо	I			II ($\nabla \gamma$)			II (K_{γ})			Одноячейстые облака			Многоячейстые облака			Фронтальные ячейки (II)			Фронтальные ячейки (I)		
	0,5t ₁	t ₁	0,5t ₂	0,5t ₁	t ₁	0,5t ₂	0,5t ₁	t ₁	0,5t ₂	0,5t ₁	t ₁	0,5t ₂	0,5t ₁	t ₁	0,5t ₂	0,5t ₁	t ₁	0,5t ₂	0,5t ₁	t ₁	0,5t ₂
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$Z_{\text{мак}}$, мм ⁶ /м ³	64	460	90	140	1700	230	300	4400	680	200	1500	240	550	4400	1300	600	4300	960	92	450	160
$\sigma_{Z_{\text{мак}}}$, мм ⁶ /м ³	37	240	87	73	800	180	320	3400	790	340	2100	250	680	3500	1200	800	4500	400	52	228	152
$\frac{dz}{dt}$, мм ⁶ /м ³ ·мин	50	-	18	130	-	52	200	-	90	90	-	46	200	-	95	350	-	170	36	-	20
$\sigma_{dz/dt}$, мм ⁶ /м ³ ·мин	40	-	9	47	-	36	190	-	78	85	-	39	240	-	120	200	-	150	24	-	11
dR , мм ⁶ /м ³ ·км	-	220	-	-	900	-	-	1300	-	-	640	-	-	1200	-	-	1800	-	-	205	-
$\sigma_{dz/dR}$, мм ⁶ /м ³ ·км	-	150	-	-	770	-	-	1000	-	-	760	-	-	970	-	-	950	-	-	153	-
H , км	-	6,5	-	-	7,5	-	-	11,0	-	-	8	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-
σ_H , км	-	2,1	-	-	1,5	-	-	3,5	-	-	1,7	-	-	6,3	-	-	-	-	-	-	-
D , км	-	6	-	-	6	-	-	8	-	-	6,5	-	-	8,5	-	-	8,5	-	-	5,8	-
σ_D , км	-	2,2	-	-	1,5	-	-	4	-	-	2,2	-	-	3,5	-	-	2,5	-	-	1,9	-

Таблица 2

Статистические характеристики параметров радиоэхо грозových ячеек

Параметр	Предгрозовая стадия					Грозоактивная стадия								Послегрозовая стадия			
	t, мин																
	-25	-20	-15	-10	-5	t _H	5	10	15	-15	-10	-5	t _K	5	10	15	20
\bar{A}	1,8	2,1	2,4	2,7	3,0	3,2	3,4	3,5	3,6	3,4	3,1	2,9	2,7	2,4	2,2	2,0	1,8
σ_A	0,2	0,4	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4
V _A , %	11	19	17	15	10	6	6	9	6	12	13	15	22	25	27	20	22
\bar{B}	1,8	2,2	2,3	2,6	2,9	3,2	3,4	3,5	3,5	3,3	3,0	2,8	2,7	2,3	2,3	1,9	1,8
σ_B	0,4	0,4	0,6	0,6	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,2
V _B	22	18	26	23	14	6	6	6	6	12	13	21	22	26	17	21	11
\bar{C}	-	1,8	1,8	2,1	2,4	2,6	2,8	3,0	3,0	2,7	2,5	2,3	2,1	1,9	1,7	1,7	-
σ_C	-	0,5	0,6	0,6	0,6	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	-
V _C , %	-	28	33	29	25	12	11	7	7	11	16	17	24	26	29	24	-
\bar{E}	-	-	1,6	1,8	2,0	2,3	2,5	2,6	2,8	2,0	1,8	1,6	1,4	1,4	1,1	-	-
σ_E	-	-	0,4	0,5	0,5	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	-	-
V _E , %	-	-	25	28	25	17	12	15	11	20	17	19	21	14	18	-	-
\bar{H}_1 , км	8,5	8,5	9,2	10,2	10,9	11,5	11,9	12,1	12,2	11,4	10,8	10,1	9,2	8,3	7,6	6,9	6,1
σ_{H_1} , км	1,2	1,6	1,4	1,2	1,0	1,0	1,4	1,2	1,2	2,0	2,2	2,2	2,4	2,4	2,4	2,2	1,8
V _{H1} , %	14	19	15	12	9	9	12	10	10	18	20	22	26	29	32	32	30
\bar{D}_1 , км	5,0	5,8	6,8	7,5	7,8	8,5	9,6	10,3	11,7	11,1	10,6	9,6	9,2	8,6	8,4	6,9	5,8
σ_{D_1} , км	1,2	1,3	1,3	1,7	1,9	2,2	2,4	2,4	2,2	2,9	3,0	2,8	2,8	2,8	2,2	1,5	1,2
V _{D1} , %	24	22	22	23	24	26	25	23	19	26	28	29	30	33	26	22	21

Примечание: в таблице обозначено: A = lg Z_{макс}, B = lg Z₃, C = (d lg Z / dR)₃, E = (d lg Z / dR)₇

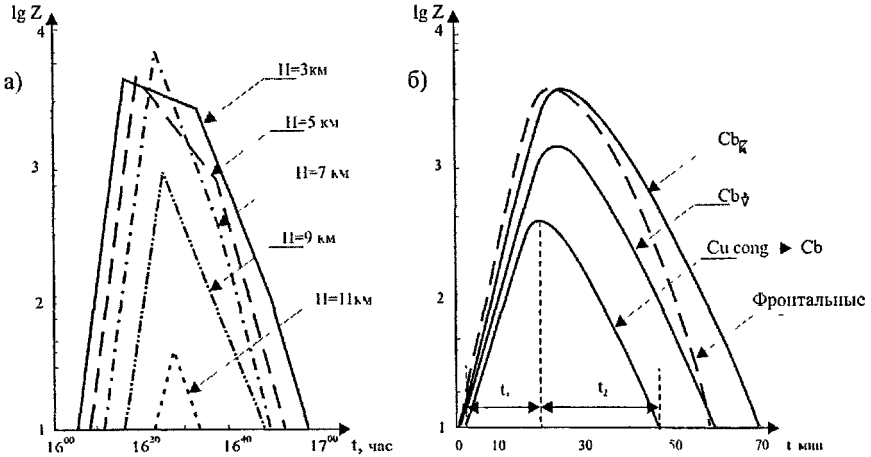


Рис. 6 Эволюция радиоэхо конвективной ячейки на различных уровнях высоты (а) и средних значений $\lg Z_{\max}$ различных групп ячеек (б)

- ячейки Cb_R облаков характеризуются наибольшим рассеиванием параметров радиоэхо;

- рассеивание параметров $\lg Z_{\max}$, $\lg Z_3$, dZ/dR , $H_{вг}$ грозовых ячеек в предгрозовой стадии в 1,5-2 раза меньше по сравнению с послегрозовым периодом;

- значительное увеличение рассеивания параметров радиоэхо в 2-3 раза имеет место к окончанию грозоактивного периода;

- к моменту появления ГР рассеивание параметров $\lg Z_{\max}$, $\lg Z_3$, dZ/dR , $H_{вг}$ уменьшается, приобретая наименьшее значение в первые 15 мин грозы;

- в среднем значения параметров $\lg Z_{\max}$, $\lg Z_3$, dZ/dR , $H_{вг}$ в начале грозы в 1,2-1,6 раза больше, чем в ее окончании;

- первые ГР в ячейке появляются через 15-20 мин после начала осадков и за ~ 10 мин до того момента, когда параметры Z , dZ/dR , $H_{вг}$ достигают максимальных значений, а продолжаться гроза в ячейке может в течение 30-40 мин после этого;

- достоверность значения $Y = 25$, указывающего на переход облака в грозовое состояние, подтверждается РЛС П-12. Однако в финальной стадии грозы, когда уменьшается частота ГР, величина Y может составлять 5-10 и давать ложную информацию об отсутствии грозовой опасности;

- в первые 15-25 мин развития грозовой ячейки зона Z_{\max} находится на высоте ~ 7 км и

затем смещается в ее нижнюю часть;

- в 73% случаев максимум грозы в ячейках наблюдался при $H_{Z_{\max}} \geq 5$ км.

Для оценки взаимного расположения в КЯ зон осадков и ГР:

- определялось количество ГР, обнаруженных в зонах осадков различной интенсивности (I), а также за их пределами как во фронтальной, так и тыловой частях облака;
- устанавливалось расстояние ΔR между радиоэхо ГР и зоной I_{\max} ;
- определялась зависимость $N_{гр}/N_{гр \max} = \varphi(\lg Z_{\max} - n)$, где $n = 0, 1, 2, 3, 4$ и 5 , которой характеризуется распределение ГР в ячейке на стадии грозы относительно зон различной отражаемости.

В целом в 53 грозовых облаках с $I_{\max} \geq 15$ мм/час 82 % ГР обнаружены в зоне осадков с $I \leq 10$ мм/час и только 18 % - в более интенсивных осадках. Разряды вне осадков распределились следующим образом: 11 % в передней части движущейся ячейки, а 89 % - в тыловой. ГР выходят за пределы зоны осадков: опережают эту зону на $\Delta R \leq 5$ км и распространяются в тыловую часть облака на $\Delta R \leq 20$ км (имели место удаления до 40 км).

Сопоставление местоположения ГР с полем отражаемости облака показало, что молнии могут появляться как в зоне Z_{\max} , так и в областях с отражаемостью на 3-4 порядка ниже. В первом случае обнаружено 28 % ГР, а 72 % ГР зафиксировано там, где $\lg Z < \lg Z_{\max} - 1$. Оказалось, что распределение молний в облаке зависит от стадии его развития (на стадии роста расположение молний более компактно, чем на стадии диссипации). Появление молний как в зонах Z_{\max} , так и в областях слабой отражаемости, по-видимому, объясняет смысл рекомендаций летчикам ГА США обходить внешний контур радиоэхо грозового облака с $\lg Z = 1$ на различных удалениях в зависимости от величины $\lg Z_{\max}$.

Сопоставление местоположения ГР с зонами повышенной турбулентности облака проводилось с использованием метода В.М. Мельникова, основанного на увеличении частоты следования зондирующих импульсов МРЛ-1 до 1200 Гц.

При этом ширина спектра флуктуации отраженного сигнала считается пропорциональной разности скоростей движения частиц в рассеивающем объеме (пороговое значение $\sigma_v > 1,5$ м/с), которая, в свою очередь, при ряде допущений может быть связана с величиной турбулентности.

Установлено, что:

- зоны повышенной турбулентности располагаются в верхней половине грозового облака и сосредоточены, в основном, в его передней части;
- во время грозовой активности зоны повышенной турбулентности занимают относительно устойчивое положение в верхней части облака. Спустя ~ 10 мин после

прекращения молний наблюдается значительное уменьшение размеров этих зон, несмотря на то, что в течение этого промежутка времени области повышенной Z облака и его H_{gr} оставались неизменными;

- зоны повышенной отражаемости и турбулентности в целом не совпадают, однако наиболее близкое расположение, а местами и перекрытие этих зон наблюдается в грозоактивной стадии;

- в передней части облака молнии наблюдаются вблизи зон повышенной турбулентности.

Оценка микрофизических свойств КЯ проводилась согласно метода, разработанного авторским коллективом под руководством Г.Г.Шукина с использованием СВЧ радиометра ($\lambda = 3,2$ см), совмещенного с радиолокатором МРЛ-2 и имевшего с ним общую диаграмму направленности. Интенсивность радиотеплового излучения облака пересчитывалась в интегральную водность в направлении визирования W (g/m^3).

На рис. 7 приведены вертикальные профили отражаемости и водности грозовой КЯ, исследовавшейся 10.07.1991 на протяжении 60 минут (40 минут продолжалась гроза).

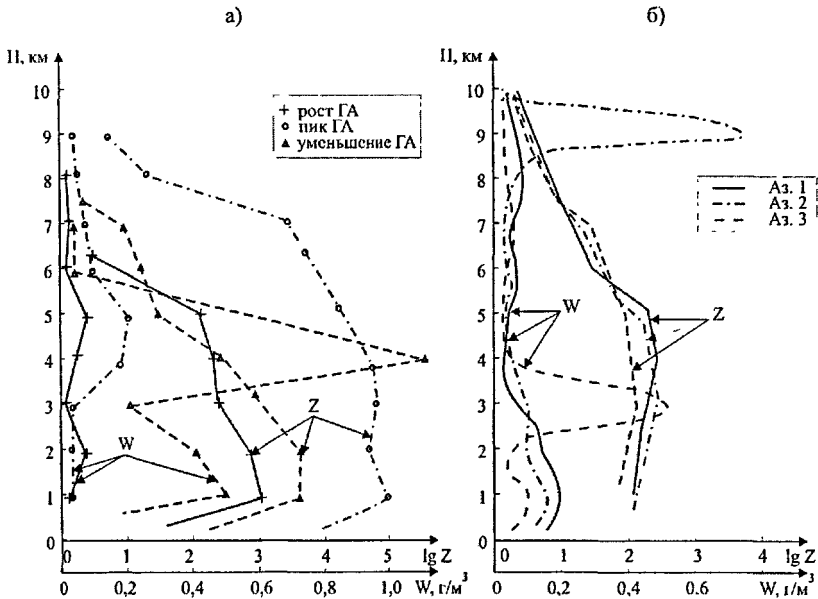


Рис 7. Вертикальные профили $Z(H)$ и $W(H)$ в периоды роста (+), пика (o) и уменьшения (Δ) грозовой активности 10.07.91 (а) и для трех соседних азимутов в облаке 13.07.92 (б)

Профили $Z(H)$ и $W(H)$ соответствуют периодам роста, пика и уменьшения грозовой активности. За время грозы $Z(H)$ и $W(H)$ имели большие отличия и несовпадающие в пространстве и времени максимумы. В этой КЯ, высотой 10 км, было зафиксировано несколько максимумов W размером 1-3 км: на высоте 1-2 км (связанный с зоной осадков) и на высоте 4-5 км. Количество ГР в указанные периоды ГА ячейки составило 4, 18 и 1 разрядов за 5 минутный интервал. Соответствующие этим интервалам значения $W_{\text{макс}}$ составили 0,07, 0,25 и 1,1 г/м³. Очевидно временное несовпадение максимумов грозовой активности и W , т.е. водность увеличилась к окончанию грозы.

В грозовой ячейке 13.07.1992 профили $W(H)$, полученные в трех соседних азимутальных разрезах с шагом 1°, показали наличие максимума водности 0,77 г/м³ на высоте 9 км размером около 1 км, существовавшего не более 5 минут (рис. 76).

Эти экспериментальные данные позволяют сделать следующие выводы:

- пространственно-временное распределение водности грозового облака не имеет тесной взаимосвязи с распределением его отражаемости;

- максимумы ГА и водности не совпадают во времени: начало и пик грозовой активности имеет место при относительно малых значениях W , т.е. зоны интенсивной электризации содержат, в основном, кристаллические и поликристаллические облачные частицы. Этот факт также подтверждается измерениями Т.Такахаши фазового состава частиц в тропических грозовых облаках;

- в верхней части облака на высоте 7-9 км могут появляться области переохлажденных капель размером около километра. Время их существования на этой высоте в восходящем потоке составляет несколько минут. Такая возможность также подтверждается в самолетных экспериментах Д.Розенфельда и В.Вудли в Аргентине, где зафиксированы переохлажденные капли в вершине конвективных облаков при -38°C.

Таким образом, на ПЭБ по АВ разработан и реализован метод комплексного активно-пассивного зондирования облаков, позволивший впервые получить данные о взаимном расположении ГР, зон повышенной отражаемости, турбулентности и водности облаков.

Регулярные наблюдения за ГР в районе ПЭБ выявили случаи аномально сильных гроз, интенсивность которых превышает среднее значение для этих широт. Такие облака впервые были зафиксированы с помощью РЛС П-12 в 1972 году на удалении до 50-70 км и имели вид зон постоянного (слабо флуктуирующего) отражения (ЗПО), существовавших от 5 до 50 минут. С.М. Гальперин и В.Д. Степаненко предположили, что источником ЗПО на $\lambda = 200$ см могут быть очень интенсивные осадки в виде ливня и града или области коронных разрядов.

В 1982 году эти исследования были продолжены и показали, что при появлении ЗПО в облаке молнии следуют с интервалом 1-3 с. Вспышки молний охватывают значительно

больший объем облака по сравнению с менее интенсивными грозами. С исчезновением ЗПО частота молний уменьшается в 3-4 раза в течение 10 мин. В Ленинградской области в июне-июле аномально активные грозовые облака имеют $H_{\text{вр}} > 10$ км, а зоны $\Delta gZ > 3,5$ и га ют высоты 7-9 км. Относительное расположение ЗПО и $Z_{\text{макс}}$ облака не имеет четко выраженной закономерности, такие отражения могут занимать значительные объемы облака. Существующие в течение десятков минут и имеющие флуктуирующий характер по амплитуде и в пространстве, ЗПО можно рассматривать как суперпозицию ЭАЗ, формируемых в мощных конвективных облаках интенсивными восходящими потоками, в которых величина $E_{\text{п}}$ способствует появлению маломасштабных форм разрядов. Изучение начала электрического разряда с деформированных капель и ледяных частиц, условий возникновения лавинной и стримерной форм коронного разряда, выполненное М.Н.Бейтугановым, показало, что на концах этих деформированных частиц происходит локальное усиление поля и при $E_{\text{п}} \geq 4,5$ кВ/см начинается распространение стримерных разрядов.

Следовательно, ЗПО на $\lambda = 2$ м могут являться совокупностью множества лавин, не переходящих в лидерную фазу развития внутриоблачного разряда при $E_{\text{п}} < E_{\text{кр}}$ из-за отсутствия достаточно крупных (градовых) зародышей. «Производительность» ЭАЗ высока и поддерживает уровень генерации электрических зарядов, достаточный для длительного коронного разряда на каплях, однако из-за того, что в наших широтах в облаках мало ледяных крупноразмерных частиц, способных создать локальное усиление $E_{\text{п}} > E_{\text{кр}}$, интенсивность ГА в облаках значительно ниже, чем на юге ЕТР. Дальнейшее изучение физических свойств ЗПО может быть связано с применением поляризационных радиолокационных и СВЧ-радиометрических наблюдений, регистрацией их ЭМИ. О начале коронного разряда в лавинной и стримерной форме можно судить по появлению излучения на частотах 250 кГц - 30 МГц.

В пятой главе рассмотрены результаты исследования закономерностей грозовой активности многоячейстых облаков фронтального и внутримассового происхождения. Они имеют ряд отличий от одноячейстых облаков, которые должны учитываться при прогнозе эволюции и организации АВ. Отличия имеют место как в динамике облаков, так и в ходе грозовой активности.

В 1975-1976 годах было исследовано 190 фронтальных и ПО внутримассовых КЯ. Средние значения и дисперсия параметров радиоэхо этих КЯ приведены в табл.1. Видно, что параметры радиоэхо КЯ многоячейстых облаков фронтального и внутримассового происхождения больших отличий между собой не имеют. Этот факт требует дальнейшего изучения с учетом термодинамических свойств атмосферы. В то же время, как показывают

наши экспериментальные данные, многоячеестое облако является динамической структурой с большой степенью внутренней организации, определяющей место, скорость и параметры роста последовательности КЯ.

Процесс формирования многоячеестых облаков (с момента появления первого радиоэхо и до полной диссипации) исследовался следующим образом: определялись расстояние r_1 от существующей ячейки и область Z_1 где появляется новая ячейка, а также скорость объединения соседних ячеек изолиниями $Z_i = 1, 10, 10^2$ и $10^3 \text{ мм}^6/\text{м}^3$ в единый очаг радиоэхо. Время объединения соседних ячеек изолиниями Z_i является информативным признаком, который может быть использован при радиолокационном контроле результатов АВ. По нашим данным скорость формирования многоячеестого облака пропорциональна скорости развития КЯ и, в свою очередь, определяет степень опасности явлений, которые имеют в нем место (шквалы и смерчи, интенсивные и продолжительные осадки, град).

При внутримассовом развитии облаков в 80 % случаев новые ячейки появлялись на $r_1 = 13 \text{ км}$. При этом 92% ячеек появились за пределами $Z_1 = 10 \text{ мм}^6/\text{м}^3$ преимущественно в фронтальной и тыловой частях многоячеестого облака (r_1 составило 14 и 9 км соответственно). Расстояние между зонами $Z_{\text{макс}}$ новой и старой ячеек достаточно часто (63 % случаев) уменьшалось, при этом они объединялись изолиниями Z_i , формируя многоячеестое облако. Средние значения интервалов времени объединения ячеек изолиниями $Z_i = 1, 10, 10^2 \text{ мм}^6/\text{м}^3$, а также соответствующие этим интервалам расстояния между зонами $Z_{\text{макс}}$ ячеек указаны крестиками на рис.5. Следует отметить, что КЯ с $Z_{\text{макс}} > 10^3\text{-}10^4 \text{ мм}^6/\text{м}^3$ редко объединяются $Z_i = 10^3 \text{ мм}^6/\text{м}^3$, т.е. они существуют изолированно на протяжении периода существования. Расстояние между центрами таких (как правило, грозových) ячеек равно 6-8 км. В большинстве случаев одна из ячеек (чаще всего старшая) через 30-40 мин диссипирует.

Период существования фронтальных КЯ в среднем на 10-15 мин меньше внутримассовых. Они также чаще всего появляются во фронтальной и тыловой частях очага радиоэхо, однако среднее расстояние до новых ячеек составляет 6 км и мало изменяется от места появления. Ячейки на фронте в 63 % случаев появлялись за пределами $Z_i = 10 \text{ мм}^6/\text{м}^3$, в 27 % - в зоне $10 \leq Z_i < 10^2 \text{ мм}^6/\text{м}^3$. Видно, что во фронтальных Сб значительно возрастает число КЯ, появляющихся в зоне $10 \leq Z_i < 10^2 \text{ мм}^6/\text{м}^3$, т.е. область слабого радиоэхо между соседними ячейками на фронте является местом интенсивных воздушных движений, приводящих к возникновению новых КЯ.

Изменение расстояния между центрами соседних фронтальных ячеек наблюдалось в 85 % случаев. Средние значения интервалов времени объединения ячеек изолиниями $Z_i = 1, 10, 10^2$ и $10^3 \text{ мм}^6/\text{м}^3$ и соответствующие этому расстояния между зонами $Z_{\text{макс}}$ ячеек указаны кружками на рис. 8. Заметно, что процесс формирования многоячеестых облаков на фронте и

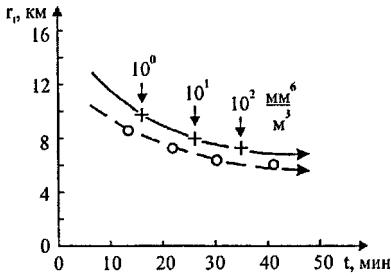


Рис. 8. Пространственно - временные параметры формирования многоячейкового грозового облака

характеризующий динамику развития ячейки - скорость роста Z (dZ/dt), у многоячейковых облаков составил в среднем $200 \text{ мм}^6/\text{м}^3\text{-мин}$ при максимальном значении $600\text{-}800 \text{ мм}^6/\text{м}^3\text{-мин}$. У одноячейковых облаков его среднее значение - $90 \text{ мм}^6/\text{м}^3\text{-мин}$ при максимуме $200\text{-}300 \text{ мм}^6/\text{м}^3\text{-мин}$. Следовательно, переход структуры поля радиоэхо от одноячейковой к многоячейковой является признаком того, что процесс развития облаков будет более скорым и вероятность ОЯ повышается.

На это указывает также зафиксированная тенденция увеличения dZ/dt соседних ячеек по мере уменьшения расстояния между центрами (зонами $Z_{\text{макс}}$) этих ячеек. В случаях удаления ячеек друг от друга наблюдалось замедление роста dZ/dt и у них быстрее наступала стадия диссипации. Эти данные не противоречат известному механизму роста КЯ, при котором микрофронт нисходящих воздушных потоков одной ячейки стимулирует «подпитку» соседней развивающейся ячейки воздухом из приземного слоя.

Для целей радиолокационного контроля результатов АВ на конвективные облака создана

достаточно простая статистическая модель ячейки в стадии максимального развития. По интегральным распределениям $Z_{\text{макс}}$ на высотах 3, 5, 7, 9 и 11 км в 300 ячейках указанных выше групп установлена величина этого параметра в 50, 75 и 90 % случаев, а также вероятность появления Z_i на H_i . Видно, что грозовые и ливневые ячейки имеют существенно отличающиеся вертикальные профили Z (рис. 9): у первых $H_{Z_{\text{макс}}} \approx 5 \text{ км}$, у вторых - смещен в область нулевой изотермы. У ливневой ячейки в первые 5-10 мин $H_{Z_{\text{макс}}} = 5 \text{ км}$, к 12-14 мин $H_{Z_{\text{макс}}} = 7 \text{ км}$, затем по мере роста величины $Z_{\text{макс}}$ ячейки эта зона опускается и через 30 мин $H_{Z_{\text{макс}}} \leq 3 \text{ км}$.

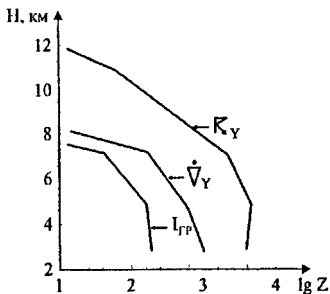


Рис. 9. Вертикальные профили $\lg Z$ КЯ различных групп

Осадки в ячейке появляются через 15-18 мин после того, как $Z_{\max} \geq 10 \text{ мм}^6/\text{М}^3$ Через 40-50 мин одиночная ливневая ячейка диссипирует

По интегральным распределениям Z_{\max} и H_{\max} (рис. 10) грозовых и ливневых ячеек

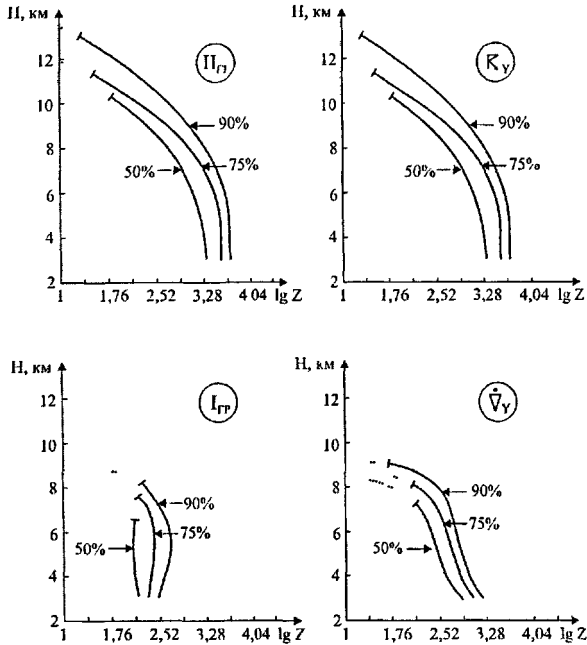


Рис 10 Вертикальные профили $\lg Z$ КЯ различных групп (вероятностные распределения)

построены профили $Z = f(H)$ с 50, 75 и 90 % вероятностью реализации до высот, которые также наблюдаются в 50, 75 и 90 % случаев у ячеек указанных групп. Заметно существенное отличие указанных профилей у грозовых ячеек Z мало изменяется до высоты 7 км, а у ливневых значительно уменьшается уже до 5 км. На основе подобной модели КЯ можно оценить значения параметров радиоэхо, которые будут они иметь в стадии максимального развития (что важно при планировании и оценке эффективности АВ).

Сопоставление числа, размеров и местоположения ГР с ячеистой структурой облака дало возможность проанализировать особенности грозовой активности в многоячеистых облаках, в которых число ГР может достигать 60 и более в минуту по сравнению с несколькими разрядами за такой же интервал в одноячеистых облаках. Для выяснения причин таких явлений

рассмотрены изменения числа ГР, обнаруженных в соседних грозových ячейках, в зависимости от расстояния между центрами ячеек (зонами $Z_{\text{макс}}$).

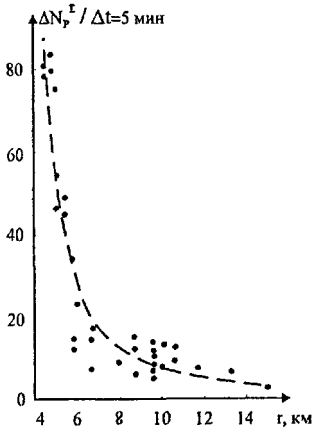


Рис. 11. Взаимосвязь $(\Delta N_p^\Sigma / \Delta t)$ в соседних ячейках с $r_{\text{мин}}$ между ними

Оказалось, что по мере уменьшения расстояния между $Z_{\text{макс}}$ соседних ячеек до $r_1 = 6-7$ км наблюдается рост в 4-5 раз суммарного числа ГР в ячейках $(\Delta N_p^\Sigma / \Delta t)$ без соответствующего увеличения параметров радиоэхо ячеек (рис. 11). У одиночных грозových ячеек $\Delta N_p^\Sigma / \Delta t$ не превышает 1-4 р/мин. По-видимому, рост N_p^Σ вызван увеличением числа межоблачных разрядов между соседними ячейками. Это явление необходимо исследовать с применением грозо-регистрационных систем, способных восстанавливать в облаке структуру

ионизированных каналов ГР различных типов, с учетом того, что реальная зарядовая структура многоячейкового облака значительно сложнее упрощенной дипольной.

Эти выводы были получены, когда в единой системе координат совместились радиальные размеры: зон различной Z ячеек; эхо-сигналов ГР (L_p); области (R_N) облака, которая охватывается ГР (начиная с самого ближнего и заканчивая самым дальним), а также рассмотрены расстояния r , между зонами $Z_{\text{макс}}$ ячеек на протяжении периода ГА. Здесь все процессы, наблюдавшиеся различными РЛС в пределах ДН антенны РЛС П-12, строились с точностью 1 км по дальности и 1 с во времени.

Методику обработки данных поясним на примере облака 27.07.75. На рис. 12а приведено количество ГР, суммированное по интервалам 2 минуты. В момент максимума грозоактивности $\Delta N_p^\Sigma / \Delta t = 28$ р/мин. На рис. 12б нанесены радиальные размеры зон различной отражаемости Z , облака на высоте 7 км через порядок величины, начиная с $Z_{\text{мин}}$ ($Z_{\text{мин}}, 10, 10^2, 10^3, 10^4$ мм⁶/м³), и части из 625 зафиксированных в этом очаге ГР, которые изображены вертикальными линиями. На рис. 12в и г приведены изменения размеров зоны R_N , в которой обнаруживались ГР, а также размеров L_p , осредненных за тот же интервал времени, соответственно.

Видно, что в начале грозы (до 15.50) ГР занимают почти весь очаг радиоэхо и имеют $L_p = 3$ км. Однако по мере усиления грозы, начиная с 15.52, пространственная картина расположения ГР в поле радиоэхо очага меняется. Уменьшается область, занимаемая ГР,

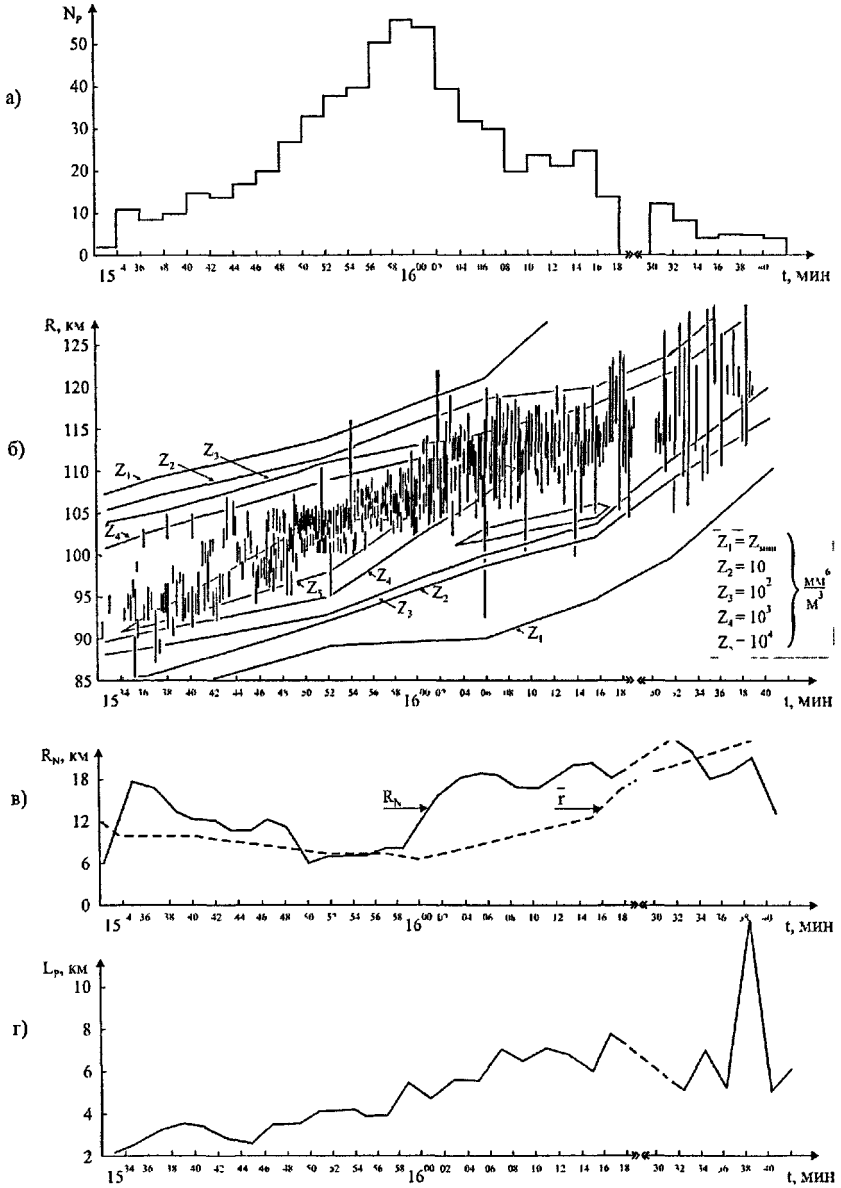


Рис 12 Изменение во времени Np^2 (а), радиальные протяженности зон Z_i облака и местоположения эхо-сигналов ГР (б), зоны R_N , охватываемой ГР, и среднего расстояния \bar{r} между ячейками (в), радиальных размеров эхо-сигналов ГР L_p (г)

подавляющее число которых в период $N_{P \max}^{\Sigma}$ (с 15.52 до 16.00) появляется в 9 км зоне облака (рис. 12в). В течение 8 минут L_p и R_N сохраняют свои минимальные значения. С 16.00 начинает расширяться область R_N , которая к окончанию грозы становится в 3 раза больше по сравнению с периодом $N_{P \max}^{\Sigma}$, достигая 25 км. При этом размеры L_p по мере спада интенсивности грозы возрастают в 2 и более раз (наблюдались ГР размерами 18-20 км). Так, в период с 15.34 до 15.52 среднее значение $\bar{r} = 3,1$ км, в период с 15.52 до 16.02 - $L_p = 4,4$ и в период с 16.02 до 16.42 - $L_p = 6,8$ км. Величины СКО L_p за эти же сроки равны соответственно 1,8; 2,1 и 3,7 км.

Для обобщения экспериментальных данных в целом у каждого облака были выделены интервалы времени, характеризующие определенные стадии эволюции его грозоактивности, т.к. по числу обнаруженных разрядов и времени грозоактивности облака отличались друг от друга. Если принять в облаке $(\Delta N_p^{\Sigma}/\Delta t)_{\max}$ за единицу, то можно выделить 5 временных интервалов, в течение которых $(\Delta N_p^{\Sigma}/\Delta t)$ не будет превышать заранее заданного уровня на стадиях роста и спада ГА: $t_H - 0,25; 0,25 - 0,5; 0,5 - 1 - 0,5; 0,5 - 0,25; 0,25 - t_K$, где t_H и t_K время начала и окончания грозы. В дальнейшем определение средних значений и СКО радиальных размеров L_p , зоны R_N , и расстояния r между соседними ячейками исследуемого облака производилось в указанные интервалы времени. Результаты подобной обработки данных (31 случай, когда $(\Delta N_p^{\Sigma}/\Delta t)_{\max} > 5-6$ р/мин) приведены на рис. 13.

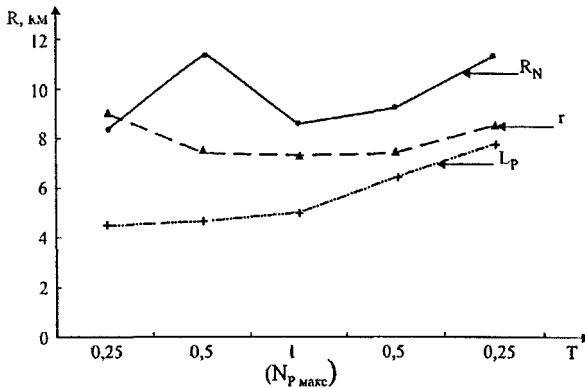


Рис. 13. Изменения в течение грозы средних значений: расстояния между соседними ячейками (r); зоны, охватываемой ГР (R_N); радиальных размеров ГР (L_p)

Видно, что:

- грозовая активность многоячейкового облака усиливается по мере уменьшения расстояния между соседними ячейками. При удалении ячеек друг от друга и наступлении

стадии их диссипации частота появления ГР уменьшается;

- радиальные размеры ГР с момента начала их появления в облаке и до максимума грозовой активности изменяются мало (среднее значение 4,5-4,8 и СКО 1,6-2,0 км). В интервале времени с 0,5 $(\Delta N_p^{\Sigma}/\Delta t)_{\max}$ на спаде грозоактивности и до окончания грозы L_p в среднем увеличиваются в 1,7 раза, σ_{L_p} - в 2,8;

- начальный период грозоактивности характеризуется наименьшими значениями L_p и наибольшей величиной R_N ($R_N \approx 1,5 - 2 r_i$ в интервале времени с t_H до $\Delta N_p^{\Sigma}/\Delta t \leq 0,5$), т.е. первые ГР появляются в отдельных ячейках грозового очага. По мере сокращения расстояния между ячейками до 6-7 км уменьшается и R_N , приобретая наименьший размер в момент $(\Delta N_p^{\Sigma}/\Delta t)_{\max}$, сравнимый со средним расстоянием между ячейками. По мере последующего увеличения расстояния r_i уменьшается число разрядов, но их размеры L_p растут и продолжают оставаться сравнимыми со средним расстоянием между ячейками. Следовательно, несмотря на то, что в завершающей стадии грозы у ячеек наступает стадия диссипации, электрическая активность в этих ячейках может сохраняться и при этом значительно увеличиваются горизонтальные составляющие ГР.

Необходимо отметить, что приведенные на рис. 13 данные относятся к тем облакам, в которых $(\Delta N_p^{\Sigma}/\Delta t)_{\max}$ превышала 5-6 р/мин. В то же время наблюдались многоячейстые грозовые облака с $(\Delta N_p^{\Sigma}/\Delta t)_{\max} = 1-3$ р/мин, в которых местоположение и размеры ГР на протяжении всего периода грозоактивности изменялись незначительно. Здесь ячейки располагались друг от друга на расстоянии более 10-12 км. В них средние значения $L_p \approx 4,9$ км, а $R_N = 7,8$ км. Для сравнения, практически у всех одноячейстых грозовых облаков $(\Delta N_p^{\Sigma}/\Delta t)_{\max}$ превышала 1-4 р/мин, а L_p к окончанию грозы увеличивались всего в $\sim 1,5$ раза. В целом средние значения составили $L_p = 2,5$ км, а $R_N = 3,5$ км.

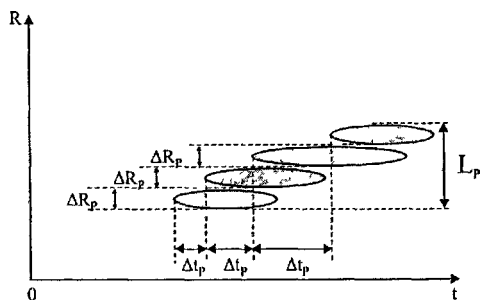


Рис 14 Ступенчатый характер перемещения эхо-сигналов ГР в многоячейстых облаках

Таким образом, степень грозоактивности облака и размеры области появления ГР в значительной мере определяются структурой этого облака: является оно многоячейстым или одноячейстым и как близко друг к другу расположены в нем грозовые ячейки. Соседние ячейки многоячейстого облака не только развиваются быстрее и становятся

более мощные, чем одиночные, за счет определенного динамического взаимодействия, но и формируют обширные поля электрических

зарядов, в которых ГР могут распространяться на большие расстояния. Детальный анализ ГР с размерами $L_p \geq 6-8$ км показал, что у них начинает проявляться «ступенчатый» (с шагом ΔR_p) характер перемещения по дальности. Схематически он отображен на рис. 14. Как правило, такие ГР появляются на спаде грозовой активности.

Интегральные распределения ΔR_p и Δt_p у 980 ГР, построенные в различные дни наблюдений, не совпадают. При этом наименьшие отличия присущи распределениям Δt_p . В 80% случаев значения $\Delta R_p = 6-9$ км оказались близкими по величине среднему расстоянию между центрами ячеек многоячейстых облаков, когда они объединяются изолиниями $Z_i = 10, 10^2$ мм⁶/м³ (рис. 8). У таких ячеек обычно $Z_{\max} > 10^3$ мм⁶/м³, а зоны с такой отражаемостью существуют преимущественно изолированно друг от друга. Отличия значений ΔR_p от дня ко дню наблюдений на 2-3 км можно объяснить изменением на такую же величину расстояния между соседними ячейками грозowych облаков. В 80% случаев значение $\Delta t_p = 0,27$ с и оно отличается от интервала времени между повторными разрядами во вспышке молнии, который в большинстве случаев составляет менее 0,1 с. Относительно малое изменение средних значений Δt_p от дня ко дню наблюдений дает основание считать, что обнаруженное ступенчатое перемещение эхо-сигналов ГР не связано с повторными разрядами вспышки молнии, а определяется последовательным возникновением ГР в отдельных ячейках многоячейстого грозowego облака, т.е. появление разряда в одной грозовой ячейке инициирует разряд в соседней. Особенно хорошо этот эффект заметен во фронтальных облаках, где горизонтальные составляющие ГР могут достигать 80-100 км.

Таким образом, многоячейстая структура грозowego облака оказывает влияние как на частоту появления ГР, так и на характер их распространения в этом облаке.

В шестой главе рассматривается методология организации и проведения совместных самолетных и наземных исследований грозowych облаков на ПЭБ Тургош. В этих экспериментах с 1984 по 1990 гг. использовались самолеты разных организаций Ил-14, Ан-12, Н-16. Выполнено 57 полетов. Для обнаружения самолетов и прокладки их маршрутов относительно ПЭБ и исследуемых облаков использовались РЛС П-12, ДРЛ-7, радиовысотомер ПРВ-10, приводная радиостанция ПАР-10. С командного пункта базы передавались текущие координаты самолета относительно исследуемого облака, на борту также принимались сигналы ПАР-10, что позволило добиться точной прокладки маршрута полета и более достоверного сопоставления бортовых и наземных измерений. Изучение распределения напряженности электрического поля (Еп) над облаками осуществлялось на основании точной пространственно-временной привязки самолетных данных к радиолокационной структуре облака.

Метод обработки данных предусматривал анализ параметров радиоэхо облака по траектории полета самолета, а также той части облака, над которым фиксировалась $E_{\text{п}} > E_{\text{п фона}} (\Delta R_{\text{E}})$ Установлено, что протяженность зоны ΔR_{E} близка к размеру радиоэхо облака ΔR_{z} и не выходит за его пределы более, чем на 5 км

Последовательные пролеты над облаком показали, что при мало изменяющихся в течение ~ 20 минут значениях высоты облака и его отражаемости изменения $E_{\text{п}}$ могут достигать 4-х порядков величины, т.е. $E_{\text{п}}$ изменялась на 550 В/м в течение одной минуты. Отношение количества $E_{\text{п макс}}$, зафиксированных над грядой Сб облаков, к числу КЯ (зон $Z_{\text{макс}}$) составляет 0,84, что свидетельствует в целом о формировании центров электрических зарядов $E_{\text{п макс}}$ в районе КЯ. В этих экспериментах прямой зависимости величины $E_{\text{п макс}}$ от интенсивности осадков и $N_{\text{вр}}$ облака не обнаружено. $E_{\text{п макс}}$ находились за пределами $Z_{\text{макс}}$, преимущественно в тыловой части движущегося облака, в зоне относительно небольших градиентов dZ/dR . Эти самолетные данные совпадают с нашими радиолокационными данными о смещении областей молниевой активности в тыл движущейся КЯ (рис 15)

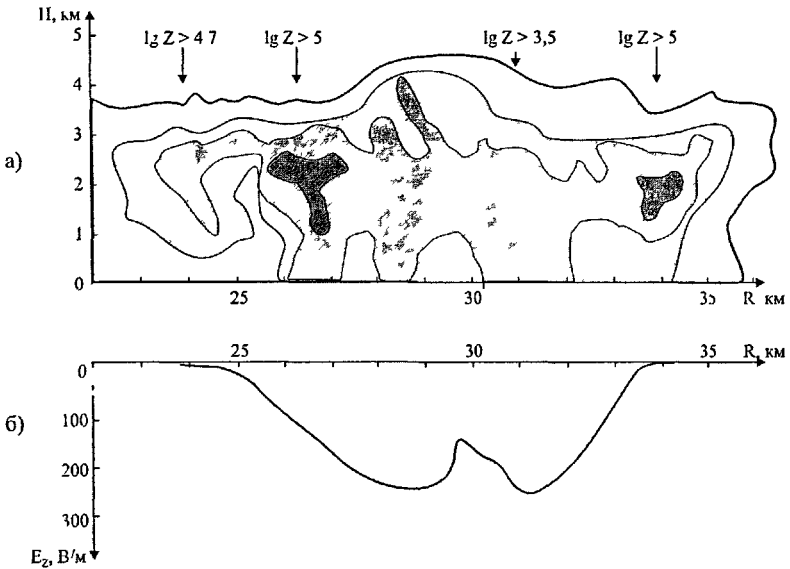


Рис 6.3 Взаимное расположение в облаках зон $\lg Z_{\text{макс}}$ (а) и $E_{\text{z макс}}$ (б) в 10^{09}

Установлено также, что между $I_{\text{макс}}$ и $E_{\text{п макс}}$ в ячейке существует временной сдвиг в

15-20 мин, при этом I_{\max} предшествует E_{\max} (рис.16). Очевидно, что процессы осадкообразования и электризации облака взаимосвязаны, однако количественные параметры такой причинно-следственной связи требуют своего уточнения. Интенсивность осадков может увеличиваться без последующей электризации облака, но заметная электризация и грозовая стадия облака постоянно сопровождаются осадками и часто значительными.

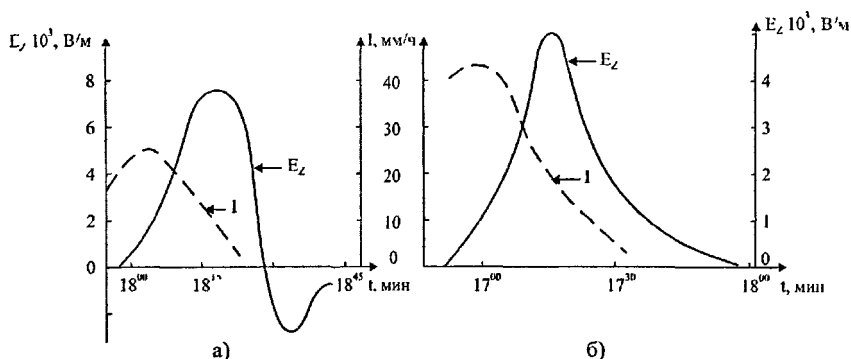


Рис. 6.4 Временной сдвиг между $E_{Z\max}$ и I_{\max} 14.07 (а) и 16.07.1986г. (б)

Временное изменение $E_n = f(t)$ над растущими облаками, установленное в ходе полетов над их вершиной, не всегда демонстрирует последовательное увеличение и уменьшение ее величины. Большая изменчивость E_n у вершины Сб облаков, смена ее знака, возникновение конвективных ячеек с E_{\max} приводят к тому, что она имеет сложную форму, часто не позволяющую установить вид электрической структуры облака (какой заряд находится в верхней части облака). По этим причинам самолетный контроль результатов АВ на электрическое состояние облаков может не дать однозначных результатов.

Основные результаты диссертационной работы, имеющие практическое значение, заключаются в следующем:

1. Решена крупная научно-техническая задача по исследованию мощных конвективных (грозовых) облаков и создан комплекс активно-пассивных радиотехнических средств, состоящий из:

- радиолокаторов сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов радиоволн (МРЛ-1 и 5, ПРВ-10, ДРЛ-7 и П-12), определяющих параметры облаков, осадков и грозовых

разрядов;

- СВЧ радиометров (мм и см диапазонов), определяющих характеристики водозапаса облаков и расширяющих возможность микрофизической интерпретации получаемых данных;
- радиоприемных устройств УКВ, КВ, СВ и СДВ диапазонов, включая регистратор формы импульсов (РФИ-860), обеспечивающих анализ амплитудно-частотных характеристик ЭМИ грозовых облаков, и автоматических грозопеленгаторов-дальномеров различных конструкций;
- аппаратуры многоканальной аналоговой и цифровой регистрации данных с привязкой к единому времени (с точностью до 10^{-3} с).

2. Разработан и реализован метод многоволнового активно-пассивного зондирования облаков, обеспечивающий:

- выделение предгрозовой, грозоактивной и послегрозовой стадий облака и определения статистических характеристик параметров радиоэхо облаков, соответствующих этим стадиям;
- идентификацию в грозовых облаках источников радиолокационных отражений в дециметровом и метровом диапазонах радиоволн путем сопоставления с характеристиками их ЭМИ;
- определение параметров радиоэхо грозовых разрядов (ЭПР, время существования, радиальный размер) на длинах волн 11, 35 и 200 см и их сопоставление с радиоэхо облаков на $\lambda = 3,2$ и 10 см;
- определение взаимного расположения в облаках зон различной отражаемости, интенсивности осадков, повышенной турбулентности и молниевой активности;
- определение закономерностей грозовой активности в одно- и многоячеистых облаках внутримассового и фронтального происхождения;
- проведение одновременных наземных и самолетных измерений электрического состояния облаков.

3. В ходе многолетних и разнообразных экспериментов получены следующие новые закономерности и результаты в области физики грозы, динамики развития мощных конвективных облаков, которые могут найти применение в практике активных воздействий на грозо-градовые процессы:

3.1. Грозовая активность облаков различного типа (одно- и многоячеистых конвективных, слоисто-дождевых) имеет существенные отличия:

- зафиксирована значительная асимметрия процесса ГА в КЯ (значения параметров радиоэхо КЯ в начале грозы в 1,5-2 раза больше, чем в окончании; первые ГР в ячейке появляются за ~ 10 мин до того момента, когда параметры H_{BR} , Z , dZ/dR достигнут

максимальных значений, а продолжаться могут в течение 30-40 мин после этого). Это отражается на достоверности косвенных радиолокационных критериев грозоопасности, в частности, $Y = H \cdot \lg Z_3$, который правильно указывает на начало грозы ($Y = 25$), однако на спаде грозовой активности его показания становятся недостоверными (ГР имеют место при $Y = 10-15$). Очевидна необходимость внедрения средств прямого обнаружения молний - автоматических грозопеленгаторов-дальномеров;

- имеет место значительная асимметрия распределения ГР в КЯ (80 % ГР обнаружены в осадках с $I \leq 10$ мм/час и только 18 % в зонах более интенсивных осадков; ГР опережают зону $I_{\text{макс}}$ на 5 км (11 % случаев) и распространяются в тыл движущейся ячейки (89 %) на расстояние до 20-40 км);

соотношение водность/ледность в КЯ по данным комбинированных радиолокационных и СВЧ радиометрических наблюдений существенно изменяется в ходе грозы: пик ГА имеет место при минимальном водозапасе ячейки;

- размеры ГР в начале грозы составляют 2-4 км и увеличиваются к ее окончанию в несколько раз (в начальной стадии грозы молнии наблюдаются в отдельных КЯ, по мере формирования многоячейстого облака ГР распространяются на все облаков в целом).

3.2. Многоячейстые конвективные облака являются динамической системой, оказывающей существенное влияние на эволюцию отдельных КЯ:

- параметры радиоэхо многоячейстых облаков в целом в 2-3 раза больше одноячейстых. Например, параметр, характеризующий динамику развития ячейки - скорость роста отражаемости (dZ/dt) у многоячейстых облаков составляет в среднем $200 \text{ мм}^6/\text{м}^3\text{-мин}$ при максимальном значении $600-800 \text{ мм}^6/\text{м}^3\text{-мин}$. У одноячейстых его среднее значение - $90 \text{ мм}^6/\text{м}^3\text{-мин}$ при максимуме $200-300 \text{ мм}^6/\text{м}^3\text{-мин}$;

- имеют место общие закономерности формирования многоячейстых облаков и эволюции составляющих их КЯ независимо от того, являются они фронтального или внутримассового происхождения. Отличия состоят в большей скорости и пространственной компактности процесса формирования фронтальных облаков.

3.3. В многоячейстом облаке зафиксировано взаимодействие соседних ячеек, выражающееся в резком усилении грозы (в 3-4 раза) по мере уменьшения расстояния между центрами (зонами $Z_{\text{макс}}$) соседних ячеек до 6-7 км. Большинство ГР в этот момент сосредоточено между этими ячейками, имеет радиальный размер 7-8 км и является, по-видимому, внутриоблачными. Причем, это происходит без соответствующего увеличения $Z_{\text{макс}}$ и $H_{\text{макс}}$ ячеек.

По мере удаления ячеек друг от друга (на $R \geq 8 \text{ км}$) грозоактивность резко падает, однако размеры ГР в таких облаках могут достигать нескольких десятков километров. Здесь

формируются цепочки молний большой протяженности в результате триггерного эффекта, когда разряд в одной ячейке за счет скачка E_{Π} инициирует молнию в соседней, где напряженность электрического поля приближается к пробойному значению, и этот процесс распространяется далее по фронту. Высокая корреляция событий в цепочке молний установлена при точностях регистрации ГР в пространстве - 0,5 км и во времени - 1 мс.

3.4. С помощью РЛС_{ДМ} (на $\lambda = 10-11$ см) обнаружены маломасштабные внутриоблачные разряды длительностью 10-30 мс, подключающие в промежутках между ОУ новые области (центры) зарядов к каналу на землю. Области зарядов расположены на удалении 2-3 км друг от друга и между ними распространяются ионизированные каналы стриммеров со скоростью $V \leq 4 \cdot 10^4$ м/с. Они сохраняют свое положение в пространстве в течение 5-7 мин, что служит доказательством существования ЭАЗ в облаке.

Дальнейшая перспектива изучения физических свойств ЭАЗ, условий и места их появления, взаимосвязи с опасными явлениями в облаке связана с комплексным применением радиолокационных и СВЧ-радиометрических средств. При этом может быть использован опыт исследований гроз на ПЭБ Тургош.

3.5. Совместные самолетные и наземные наблюдения грозовых облаков показали, что:

- количество максимумов напряженности электрического поля ($E_{\Pi_{\max}}$) над Сб облаками в целом соответствует количеству конвективных ячеек (Z_{\max}), из которых они состоят. При этом $E_{\Pi_{\max}}$ и Z_{\max} могут не совпадать в пределах поля радиоэхо облака;

- основные заряды облака сосредоточены в его тыловой части, в области небольших градиентов dZ/dR (это совпадает с радиолокационными данными о смещении в тыл облака максимума повторяемости ГР);

- между напряженностью электрического поля и интенсивностью осадков (I) зафиксирована взаимосвязь: рост и спад E_{Π} в целом определяется изменением I . Однако, эти параметры достигают экстремальных значений не одновременно: между ними наблюдается временной сдвиг в ~ 20 мин, при этом I_{\max} опережает $E_{\Pi_{\max}}$.

Полученные данные подтверждают взаимосвязь процессов осадкообразования и электризации облака. В тоже время, интенсивность осадков может увеличиваться без последующей электризации облака, однако заметная электризация и грозовая стадия облака постоянно сопровождается осадками и часто значительными.

4. Проведенные теоретические расчеты возможности реализации в электрически активных зонах облака механизма электризации, основанного на столкновениях с отскоком частиц крупы, льда и воды, а также полученные экспериментальные (наземные и самолетные) данные о росте напряженности электрического поля облака после начала осадков свидетельствуют о тесной взаимосвязи процессов электризации с образованием в облаке

осадков из твердой фазы.

5. Созданный комплекс РТС ПЭБ Тургош, обеспечивший надежное обнаружение ГР разного типа с точностью не хуже 0.5 км по дальности и 1 мс во времени, обширную информацию о пространственно-временных параметрах облачного поля в радиусе до 300 км был использован для испытаний, включая государственные, грозоупреждающих конструкций. Они показали непригодность АГПД Очаг-2П и Оранжевый для оперативной работы, т.к. задержка определения начала грозы достигала 15-20 минут по сравнению с РЛС П-12.

Грозоупреждающая система нового поколения Верей-М в режиме сопоставления с данными РТС ПЭБ показала достаточно высокую точность: координаты ее срабатываний совпали с радиоэхо молний. По-видимому, она может быть использована для метеообеспечения различных потребителей после завершения анализа ее возможностей по обнаружению разрядов различного типа.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах автора:

1. Стасенко В.Н., Гальперин С.М. Динамика грозового облака по данным радиотехнических наблюдений.// Труды ГГО, 1976, вып. 383, с.129-135.
2. Гальперин С.М., Степаненко В.Д., Стасенко В.Н. Радиолокационное обнаружение облаков и осадков различными РЛС// Труды ГГО, 1977, вып. 389, с.79-86.
3. Гальперин С.М., Степаненко В.Д., Стасенко В.Н., Тряхов А.М. Изменение параметров радиоэхо в ливневых и грозовых облаках в период их максимального развития.// Тр. Всесоюз. симп. по радиофиз. методам исслед. атмосферы, Л., Гидрометеоздат, 1977, с.253-257.
4. Гальперин С.М., Егоров В.Н., Гончар А.Ф., Стасенко В.Н., Степаненко В.Д. Методика исследования гроз радиотехническими средствами.// Труды I Всесоюз. симп. по атмосфер. электрич., Л., Гидрометеоздат, 1976, с.161-170.
5. Гальперин С.М., Гончар А.Ф., Степаненко В.Д., Стасенко В.Н., Тряхов А.М. Исследование гроз радиотехническими средствами.// Труды IV Всесоюз. совещ. по радиометеорологии, М., Гидрометеоздат, 1978, с.142-145.
6. Гальперин С.М., Гончар А.Ф., Егоров В.Н., Стасенко В.Н. Совместное обнаружение молний с помощью РЛС метрового и дециметрового диапазонов радиоволн.// Труды ГГО, 1979, вып. 430, с.3-5.
7. Гальперин С.М., Крохин Н.И., Плотников В.Д., Стасенко В.Н. Использование радиолокационных станций при проверке точностных характеристик грозоупреждающих дальномеров.// Труды ГГО, 1979, вып. 430, с.124-126.
8. Стасенко В.Н., Степаненко В.Д. Радиолокационное исследование многоячеистых конвективных облаков.// Труды VI Всесоюз. совещ. по радиометеорологии. Л.,

Гидрометеиздат, 1984, с. 19-23.

9. Стасенко В.Н., Гальперин С.М., Степаненко В.Д. Изменение радиолокационного критерия грозоопасности в одноячейстых и многоячейстых облаках.// Радиолокационная метеорология. Матер, метод, центра соц. стран по радиометеорологии, Л., Гидрометеиздат, **1982, с.175-179.**

10. Банников В.И., Гальперин С.М., Егоров В.Н., Стасенко В.Н., Степаненко В.Д. Наземные радиотехнические средства дистанционного контроля электрического состояния облаков в естественном цикле развития и при воздействии на них.// Тезисы докладов Всесоюз. семинара по техническим средствам для государственной системы контроля природной среды. Обнинск, 1981, с.99.

11. Степаненко В.Д., Гальперин С.М., Стасенко В.Н.(глава 7). Радиотехнические методы исследования гроз. Л., Гидрометеиздат, 1983,204с.

12. Гальперин С.М., Стасенко В.Н., Степаненко В.Д. Радиолокационное исследование многоячейстых гроз.// Атмосферное электричество. Труды II Всесоюз. симпозиума. Л., Гидрометеиздат, 1984, с.158-161.

13. Гальперин С.М., Гапонов И.М., Стасенко В.Н., Степаненко В.Д., Фролов В.И., Шукин Г.Г. Определение зон опасных для полетов с помощью активно-пассивных РТС.// Тезисы IV Всесоюз. научно-практич. конф. по безопасности полетов. Л., 1985, с.27.

14. Стасенко В.Н., Степаненко В.Д., Житорчук Ю.В. Об оценке эффекта воздействий на конвективные облака по радиолокационным данным.// Радиолокационная метеорология. Матер, метод, центра соц. стран по радиометеорологии, Л., Гидрометеиздат, 1984, с. 72-77.

15. Гальперин С.М., Банников В.И., Стасенко В.Н., Степаненко В.Д., Фролов В.И., Шукин Г.Г. Наземный радиотехнический комплекс исследования гроз совместно с самолетами-лабораториями.// Тезисы VII Всесоюз. совещ. по радиометеорологии. Гдрометеиздат, Л, 1989, с. 96-100.

16. Гальперин С.М., Кононов И.И., Кунин В.И., Николаев В.И., Петренко И.А., Плотников В.Д., Рыбаков К.И., Снегуров В.С., Стасенко В.Н. Грозопеленгатор-дальномер Очаг-2П. // Л., Гидрометеиздат, 1988, 58с.

17. Банников В.И., Гальперин С.М., Стасенко В.Н., Фролов В.И. Обнаружение грозových разрядов с помощью РЛС дециметрового диапазона радиоволн типа ПРВ-10.// Атмосферное электричество. Труды III Всесоюз. симпозиума. Л., Гидрометеиздат, 1988, с. 176-180.

18. Банников В.И., Гальперин С.М., Новичихина Н.А., Стасенко В.Н. Совместные исследования облаков с помощью наземных РТС и самолета-лаборатории.// Труды ГГО, 1988, вып.526, с.30-34.

19. Stasenko V.N., Galperin S.M., Stepanenko V.D. Radar Investigation of Thunderstorm clouds.//

Proa, 8th Intern. Conf. on Atmospheric Electricity, Uppsala, 1988, pp. 693-696.

20. Банныков В.И., Гальперин С.М., Маланичев С.А., Стасенко В.Н., Тарабукин И.А., Шукин Г.Г. Автоматизированный наземный радиофизический комплекс исследования эволюции облаков и контроля активных воздействий на них.// Тезисы докладов Всесоюз. конф. по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, 1991, с.35-36.

21. Galperin S.M., Stasenko V.N., Shchukin G.G. Automated Complex of Passive and Active Radioequipment for Thunderstorm Investigation.// Papers of WMO Technical Conf. on Instruments and Methods of Observation (TECO-92). Vienna, 1992, pp.212-215.

22. Galperin S.M., Frolov V.I., Stasenko V.N., Stepanenko V.D., Shchukin G.G. Complex radar investigation of thunderstorms.// Proc, 9th Intern. Conf. on Atmospheric Electricity. St.Petersburg, 1992, v.1, pp.202-205.

23. Galperin S.M., Bannikov V.L., Stasenko V.N., Frolov V.I., Shchukin G.G. Lightning channel detection using different wavelength and wavepolarization radars.// Proc, 9th Intern. Conf. on Atmospheric Electricity. St.Petersburg, 1992, v.111,pp.725-728.

24. Shchukin G.G., Galperin S.M., Stasenko V.N., Bannikov V.L., Frolov V.L., Tarabukin LA. Complex radiophysical cumulonimbus study.// Proc, 26th Conf. on Radar Meteorology, Boston, AMS, 1993,pp.685-686.

25. Stasenko V.N., Galperin S.M., Frolov V.L., Shchukin G.G., Tarabukin LA. Investigation of Electric and Microphysic Properties of a Thundercloud Using Active-Passive Multiwave Radar System.// Proc, 10th Intern. Conf. on Atmospheric Electricity, Osaka, 1996, pp.200-203.

26. Гальперин С.М., Караваев Д.М., Стасенко В.Н., Шукин Г.Г. Исследование электроактивных зон в облаках в интересах установления их связи с градовыми процессами.// Тезисы Всерос. конф. по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, 1997, с.83-84.

27. Довгалюк Ю.А., Оренбургская Е.В., Пирнач А.М., Паламарчук Л.В., Пономарев Ю.Ф., Синькевич А.А., Стасенко В.Н., Степаненко В.Д. Анализ результатов работ по воздействию на облака с целью предотвращения осадков в г.Ленинграде (на примере опыта 7 ноября 1988г.).// Метеорология и гидрология, № 2,1998, с.44-53.

28. Makitov V.S., Stasenko V.N. An Automated Rocket Hail Suppression System.// Proc, 7th WMO Scientific Conference on Weather Modification. Chiang Mai, 1999, WMO/TD - № 936, pp.403-406.

29. Galperin S.M., Karavaev D.M., Stasenko V.N., Shchukin G.G. Active-Passive Radar System for Control of Thundercloud Modification.// Proc, 7th WMO Scientific Conference on Weather Modification. Chiang Mai, 1999, WMO/TD - № 936, pp.581-584.

30. Стасенко В.Н., Шукин Г.Г. Методология исследования электричества грозовых облаков и активных воздействий на них.// Труды НИЦ ДЗА, 2000, вып.2(548), с.24-33.

31. Stasenko V.N. Hail suppression: trends and perspectives.// Report to the Executive Council Panel of Experts/ CAS Working group on Physics and Chemistry of cloud and Weather Modification Research. Geneva, 2000, WMO/TD - № 1059, pp.49-59.

32. Стасенко В.Н., Шукин Г.Г. Комплексное активно-пассивное радиолокационное зондирование грозowych облаков.// Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами. Всерос. научн. конф. Сборн. докладов. Муром, 2001, с.459-461.

33. Гальперин С.М., Михайловский Ю.М., Стасенко В.Н., Фролов В.И., Шукин Г.Г. Использование ПЭБ ГГО для активных воздействий на электрическое состояние облаков и контроль их результатов.// Тезисы докладов научн. конф. по результатам исследований в области гидрометеорологии, посв. 10-летию МСГ. СПб., Гидрометеоздат, 2002, с.39-43.

34. Гальперин С.М., Морозов В.Н., Шукин Г.Г., Стасенко В.Н. К вопросу использования лазеров для регулирования грозовой активности облаков.// Доклады Всерос. конф. по физике облаков и активного воздействия на гидрометеопроцессы. СПб, Гидрометеоздат, 2003, с.44-49.

35. Стасенко В.Н., Гальперин С.М., Степаненко В.Д., Шукин Г.Г. Методология исследования грозowych облаков и активных воздействий на них.// Труды V Российской конф. по атмосферному электричеству. Владимир, 2003, с.4-7.

36. Стасенко В.Н. Совершенствование гидрометеорологического обеспечения с использованием грозопеленгационных данных.// Труды V Российской конф. по атмосферному электричеству. Владимир, 2003, с.291-294.

37. Патент на изобретение № 222883. Способ уменьшения обледенения летательных аппаратов. Заявка № 2002101425, приоритет изобретения 11.01.2002.

38. Гальперин С.М., Стасенко В.Н., Фролов В.И. Исследования грозowych облаков на полевой экспериментальной базе ГГО.// Сборник трудов ГГО, поев. Н.С.Шишкину (в печати).

39. Стасенко В.Н. Радиолокационное исследование многоячеистых конвективных (грозowych) облаков.// Гидрометеоздат, СПб, 2004, 101с.

40. Стасенко В.Н. Радиолокационное исследование электроактивных зон в конвективных облаках. // Метеорология и гидрология (в печати).

Автор искренне благодарен научному консультанту д.ф.-м.н., профессору Шукину Г.Г. за интерес к работе и содействие в ее выполнении, а также за многолетнее сотрудничество и постоянную научную поддержку с.н.с. Гальперину С.М. и профессору Степаненко В.Д., а также сотрудникам НИЦ ДЗА и ГГО им. А.И. Воейкова Фролову В.И., Банникову В.И., Ищенко М.А., Никитину В.П., Котельниковой Т.И., Кучинской Т.Ф., Новичихиной Н.А. и др. за помощь в проведении экспериментальных работ на ПЭБ Тургош и обработке материалов наблюдений.



№ 249 47