

Федеральная служба
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
Федеральное государственное бюджетное учреждение
Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова

УДК 551.576.11

На правах рукописи

Торопова Марина Леонидовна

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРОЗОВЫХ ОБЛАКОВ
ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И
ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Специальность: 1.6.18. Науки об атмосфере и климате

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2026

Работа выполнена в ФГБУ «ГГО».

Научный руководитель: **Синькевич Андрей Александрович,**
доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, главный научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Иудин Дмитрий Игоревич,**
доктор физико-математических наук, доктор биологических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, заведующий кафедрой

Коровин Евгений Александрович,
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, старший преподаватель

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Высокогорный геофизический институт»

Защита диссертации состоится «25» июня 2026 года в 15:30 на заседании диссертационного совета 24.2.365.02 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» по адресу 195196, г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, д. 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» и на сайте совета: <https://www.rshu.ru/university/dissertations/>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук,
старший научный сотрудник

В. А. Лобанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Актуальность темы исследования определяется недостаточной изученностью такого опасного явления погоды как гроза. Ежегодно грозы по всему миру становятся причиной гибели людей и значительного экономического ущерба. Ввиду сложности и комплексности этого явления существует необходимость в расширении представлений о физике протекания процессов электризации, совершенствовании методов прогноза гроз (включая наукастинг) и решения связанных с этим задач активных воздействий на конвективные облака, формирующие прочие опасные явления погоды (град, ливни).

Особую актуальность указанные исследования имеют в свете изменения климата, одним из проявлений которого является изменения частоты и интенсивности в различных регионах отдельности и географического распределения гроз на Земле в целом. Получение и анализ новых данных, анализ редкого натурального материала (представленного в работе соискателя) имеет существенную новизну, которая позволяет лучше понимать и интерпретировать процессы формирования грозовых разрядов.

Целью работы является исследование эволюции характеристик облаков при переходе в грозовую стадию, оценка параметров грозовых облаков и определение их региональных особенностей по данным радиолокационных измерений, данных систем регистрации грозовых разрядов и численного моделирования.

Для достижения поставленных целей в работе сформулированы следующие **задачи**:

1. Сравнительное исследование изменений радиолокационных параметров при переходе облаков в грозовую стадию (для Северо-Западного и Северо-Кавказского регионов России и Индии);
2. Определение характерных значений радиолокационных и электрических параметров грозовых облаков муссонного и постмуссонного периода в Индии (для различных типов разрядов);

3. Анализ результатов расчетов, выполненных с использованием трехмерной нестационарной численной модели конвективного облака: исследование пространственных полей параметров на разных стадиях жизни облака при варьировании начальных условий и набора физических процессов (температурно-влажностное строение атмосферы, гетерогенное замерзание, аэрозольное загрязнение и активные воздействия на облако);

4. Определения значений характеристик облаков при переходе в грозовую стадию по результатам обобщения расчетов с использованием трехмерной модели;

5. Разработка и апробация методики ансамблевого прогноза развития грозовых облаков на базе модели конвективных облаков малой размерности.

Предметом исследования являются характеристики грозовых облаков (динамические, микрофизические, электрические), получаемые по данным радиолокационных измерений, систем мониторинга грозовой активности и численного моделирования.

Объектом исследования являются грозовые облака.

Научная новизна:

1. Выполнен анализ изменения характеристик конвективных облаков при переходе в грозовую стадию для муссонного и постмуссонного периода. Показано, что в зависимости от сезона, характеристики различаются и отличаются от аналогичных характеристик для других регионов Земли;

2. Получены характеристики грозовых облаков и разрядов в Индии в муссонный и постмуссонный сезоны. Показано, что характеристики сильно различаются в зависимости от сезона и обладают рядом особенностей по сравнению с аналогичными характеристиками в других регионах Земли;

3. Впервые выполнено обобщение серии расчетов с использованием трехмерной нестационарной численной модели

конвективного облака. Получены значения характеристик облаков при переходе в грозовую стадию.

Теоретическая и практическая значимость работы.

– Получены новые данные о характеристиках грозовых облаков в различные периоды в России и Индии, что позволяет формулировать новые физико-статистические модели электризации грозовых облаков.

– Получены новые данные об изменении характеристик грозовых облаков в Индии в муссонный и постмуссонный период. Эти данные позволяют предположить, что в период активной фазы Индийского муссона электризация облаков связана главным образом не с наличием крупных ледяных частиц в облаке, как это показано для разных регионов РФ и мира, но с сильными восходящими токами и мелкими ледяными частицами.

– Представлены новые данные о значениях характеристик конвективных облаков при переходе в грозовую стадию по результатам обобщения серии расчетов, выполненных при помощи трехмерной нестационарной модели конвективных облаков. Представлены новые сведения о динамике пространственного распределения электрических и микрофизических характеристик грозовых облаков. Все это расширяет фундаментальные знания о процессах электризации облака, формировании электрической структуры облака и связях параметров облака с появлением молний, интенсивностью грозовой деятельностью, в т.ч. при участии различных физических процессов.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач использовался метод математического моделирования гидродинамических, микрофизических процессов в облаках (нестационарные численные модели конвективных облаков, трехмерная и модели малой размерности). Для обработки и визуализации данных были написаны программы на языке Python, NCL, Matlab. В ходе анализа полученных результатов применялись методы статистического анализа, при этом использовались программы Statistica, MS Excel.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальные исследования радиолокационных и электрических характеристик облаков Северо-Западного, Северо-Кавказского регионов РФ и Индии показали, что при переходе облаков умеренных широт в грозовую стадию наблюдается увеличение высоты верхней границы, переохлажденных объемов облаков с высокими значениями отражаемости и некоторых других параметров, в то время как в Индии в зависимости от сезона может наблюдаться уменьшение параметров при начале разрядов.

2. Показано, что грозовые облака Индии, развивающиеся в муссонный сезон, имеют значения радиолокационных параметров малые относительно постмуссонного периода (высота верхней границы, радиолокационная отражаемость, переохлажденные объемы облака с высокими значениями отражаемости).

3. По результатам трехмерного численного моделирования получены статистические характеристики облаков при переходе в грозовую стадию (медианы): высота верхней границы – 6,6 км, скорость восходящего потока в облаке – 20,9 м/с, водность облачных и дождевых капель – 1,8 и 2,8 г/м³, ледность облачных ледяных кристаллов и крупных ледяных частиц – 0,9 и 4,0 г/м³.

4. Оценка физического эффекта активных воздействий на облако кристаллизующим реагентом по результатам численного моделирования показала, что воздействия ускоряют переход облака в грозовую стадию, электрические разряды начинают формироваться при меньших (по сравнению с естественным развитием облака) значениях основных термодинамических параметрах, усиливается электризация облака (увеличивается частота разрядов) и возможно формирование инвертированной структуры заряда.

Достоверность полученных результатов обоснована анализом предшествующих научных работ в области измерений и численного моделирования характеристик грозовых облаков,

большим объемом исходных данных. Полученные результаты не противоречат предшествующим исследованиям. Обоснованность основных результатов подтверждается публикациями в ведущих российских журналах и представлением их на российских и международных конференциях.

Личный вклад автора:

Обработка и анализ данных радиолокационных измерений и данных систем регистрации грозových разрядов (Индия), обобщение данных радиолокационных наблюдений для различных регионов, участие в доработке численных моделей, расчеты с использованием численных моделей и обработка результатов, разработка методики ансамблевого прогноза с использованием модели конвективного облака малой размерности, написание статей и подготовка докладов.

Апробация работы. Основные результаты исследования и материалы диссертации докладывались:

1. III Всероссийская конференция «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» (Санкт-Петербург, 2019)
2. VI Всероссийская научная конференция «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» (Санкт-Петербург, 2020)
3. IV Международная научная конференция ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ АТМОСФЕРЫ, КЛИМАТОЛОГИИ И МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (Ставрополь, 2022)
4. VI Международная конференция "Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития" имени Л. Н. Карлина / MGO-2022» (Санкт-Петербург, 2022)
5. II Международная научно-практическая конференция «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития» (Санкт-Петербург, 2024)
6. Всероссийская открытая конференция по исследованиям атмосферных и склоновых стихийных явлений в условиях современного изменения климата, посвященной 190-летию

создания гидрометеорологической службы России и 90-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР (Нальчик, 2024)

7. III Международная научно-практическая конференции «Авиационная и спутниковая метеорология», посвященная 95-летию образования РГГМУ (Санкт-Петербург, 2025)

Кроме того, в соавторстве результаты докладывались на 12 конференциях в период 2019-2025 гг., на объединенном семинаре ФГБУ «ГГО» (2026 г.), на сессии ученого совета ФГБУ «ГГО» (2026 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 статей, из них 13 в изданиях из перечня научных изданий ВАК РФ и международных баз рецензируемых журналов (Scopus, WoS).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка используемых источников и приложений. Объем работы составляет 155 страниц, работа иллюстрирована 36 рисунками и 20 таблицами. Список используемых источников содержит 141 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** отражена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели работы и решаемые задачи, основные положения, выносимые на защиту, определена научная новизна, обоснованы теоретическая ценность и практическая значимость полученных результатов работы.

Первая глава посвящена обзору литературы.

Приведены основные понятия и представлены современные подходы к использованию оценок конвективной неустойчивости атмосферы. Основной тенденцией является их комбинация с радиолокационными или иными параметрами в статистических моделях – с целью прогноза и диагноза грозовой активности.

Одним из ключевых направлений работ является определение радиолокационных параметров облаков, которые могут быть использованы в качестве предикторов грозы (среди наиболее успешных – содержание крупы, удельная дифференциальная фаза, объемы переохлажденной части облака, максимальная радиолокационная отражаемость).

Выполнен обзор исследований электрической структуры грозовых облаков. Отмечается, что ведущую роль занимают численные модели, обладающие рядом преимуществ по сравнению с данными наблюдений.

По итогам выполненного обзора литературы можно отметить ряд особенностей. Так, редкими являются детальные сравнительные исследования региональных различий характеристик грозовых облаков и облаков, переходящих в грозовую стадию. В работах с применением численных моделей редко воспроизводится весь комплекс характеристик облаков (термодинамические, микрофизические, электрические). В настоящей диссертации приведены результаты исследования, посвященные этим вопросам.

В **главе 2** приведены результаты исследования радиолокационных характеристик облаков, развивающихся в атмосфере умеренных и тропических широт (Северо-Западный и Северо-Кавказский регионы РФ, Индия). Проанализированы статистические характеристики грозовых облаков, выполнена оценка статистической значимости изменений радиолокационных параметров облаков на догрозовой стадии и при начале электрических разрядов. Исследованы особенности грозовых облаков муссонного и постмуссонного периода. Приведены результаты регрессионного анализа связей частоты молний и радиолокационных характеристик.

Был выполнен сравнительный анализ изменения параметров облаков при переходе в грозовую стадию по данным радиолокаторов и систем мониторинга грозовой активности для трех регионов – северо-запада РФ (Санкт-Петербург, ДМРЛ-С,

Blitzortung), Северного Кавказа (Ставрополь, МПЛ-5, LS8000), Индии (Гадаг, WR-100, Maharashtra LLN). Мощность выборки для каждого региона составила примерно 60 ячеек, переходящих в грозовую стадию.

На северо-западе РФ наблюдалась наименьшая частота молний (медиана – $0,3 \text{ мин}^{-1}$). Несколько большими величинами характеризуются облака в Индии ($0,5 \text{ мин}^{-1}$). Наибольшая частота молний наблюдалась на Северном Кавказе – $2,6 \text{ мин}^{-1}$.

Полученные оценки радиолокационных параметров конвективных ячеек в момент регистрации первого электрического разряда демонстрируют существенные различия. Так, высота верхней границы облаков H_{top} (по уровню отражаемости 5 dBZ) при начале разрядов имела наибольшее значение в Индии – $13,5 \text{ км}$ (здесь и далее – подразумеваются медианные значения), $11,1 \text{ км}$ на Северном Кавказе и $9,5 \text{ км}$ на Северо-Западе России. При этом максимальная радиолокационная отражаемость Z_{max} в Индии, наоборот, оказалась наименьшей – $45,5 \text{ dBZ}$, уступая Северному Кавказу (51 dBZ) и Северо-Западу (52 dBZ). Облака с наибольшими значениями объема переохлажденной части с отражаемостью $>35 \text{ dBZ}$ ($dV35$) наблюдались на Кавказе (206 км^3), а с наименьшими – в Индии (42 км^3). При этом медиана параметра $dV45$ в Индии была равна 0, в отличие от остальных регионов (11 и 25 км^3 для Северо-Запада и Кавказа соответственно).

Статистическая значимость изменения медиан параметров при начале грозовой активности оценивалась при помощи непараметрического критерия Уилкоксона. Показано, что H_{top} во всех регионах увеличивается при начале разрядов: на $1,6 \text{ км}$ – на Кавказе, 1 км – на Северо-Западе и в Индии (рис. 1). В умеренных широтах статистически значимо различие медиан (увеличение при начале разрядов) следующих радиолокационных параметров: H_{top} , Z_{max} , $dH35$ (мощность переохлажденной части облака с отражаемостью $> 35 \text{ dBZ}$), $dH45$, $dV35$, $dV45$. В тропических широтах статистически значимо только увеличение медианы H_{top} .

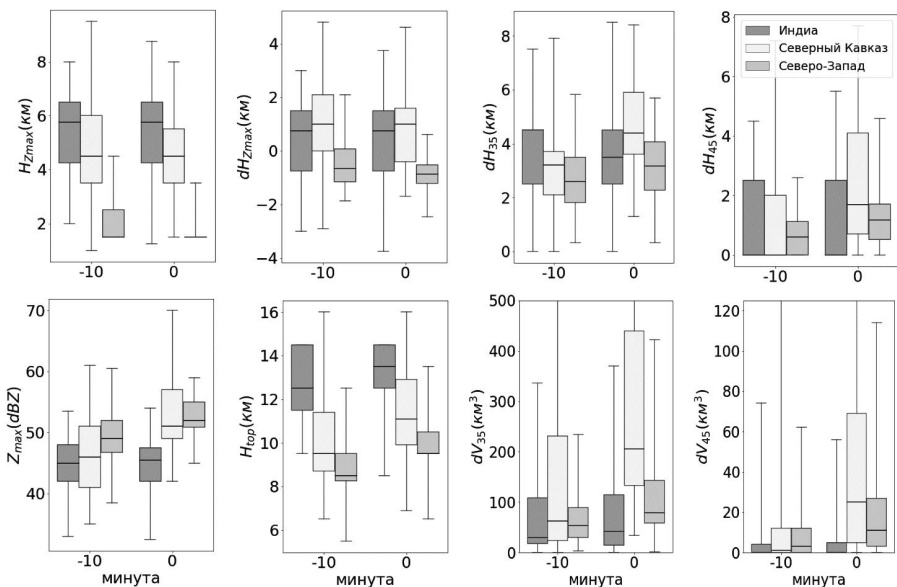


Рисунок 1 – Диаграмма размаха радиолокационных характеристик облаков для двух сканов: 0 мин – зафиксированы разряды, –10 мин – за 10 мин до начала разрядов.

Выявлено, что в облаках Северо-Запада РФ и Северного Кавказа радиолокационные параметры облаков при переходе в грозовую стадию значительно превышают значения, наблюдавшиеся до появления первого разряда. При этом различия медиан указанных параметров на Северном Кавказе больше, чем на Северо-Западе, как и частота разрядов, что в целом указывает на более интенсивные процессы облакообразования и электризации в этом регионе. Показано, что, хотя облака в Индии и достигают значительных высот, при этом имеют небольшие значения максимальной радиолокационной отражаемости и переохлажденных объемов с высокими значениями отражаемости. Значения параметров при начале разрядов меняются мало.

Проанализировано влияние муссонной циркуляции на

параметры конвекции (г.Гадаг, штат Карнатака, Индия). Выборка (август–октябрь 2019) суммарно включала 1262 облачных ячейки, разделенных по типу разрядов: облако–земля (О-З) и облако–облако (О-О).

Постмуссонный период характеризуется более высокими значениями радиолокационных параметров. Так, наибольшее значение H_{top} (по уровню отражаемости 30 dBZ) в постмуссонный период составило 17,4 км (О-З и О-О), в то время как в муссонный период H_{top} не превышала 12,9 км (О-О) и 13,6 км (О-З). При этом зарегистрированное минимальное значение высоты верхней границы грозового облака было одинаковым при всех рассматриваемых условиях (6,1) км.

Наибольшие различия между выборками муссонного и постмуссонного периодов зафиксированы для параметров Z_{max} и $dV35$. В постмуссонный период максимальная отражаемость облаков достигает 58 dBZ (медиана 46 dBZ), тогда как в муссонный — лишь 52 dBZ (медиана 41 dBZ). Переохлажденные объемы облака ($dV35$) в постмуссонный период в 10 раз больше (максимумы), а медианы в 4 раза превышают аналогичные значения для муссонных облаков. Также в этот период фиксируются более высокие значения $dH35$, радиолокационного критерия грозоопасности Y , интенсивности и потока осадков и ряда других параметров.

Медиана частоты разрядов f оказалась одинаковой для всех рассматриваемых типов разрядов и сезонов и составила $0,3 \text{ мин}^{-1}$. При этом в постмуссонный период максимальная частота разрядов в 5 раз больше, чем в муссонных грозовых облаках (5,5 и $1,1 \text{ мин}^{-1}$ соответственно для О-З). Только 3% облаков имели f (О-З) больше 1 мин^{-1} в муссонный период и 10% — в постмуссонный. 55% всех разрядов приходится на долю О-З.

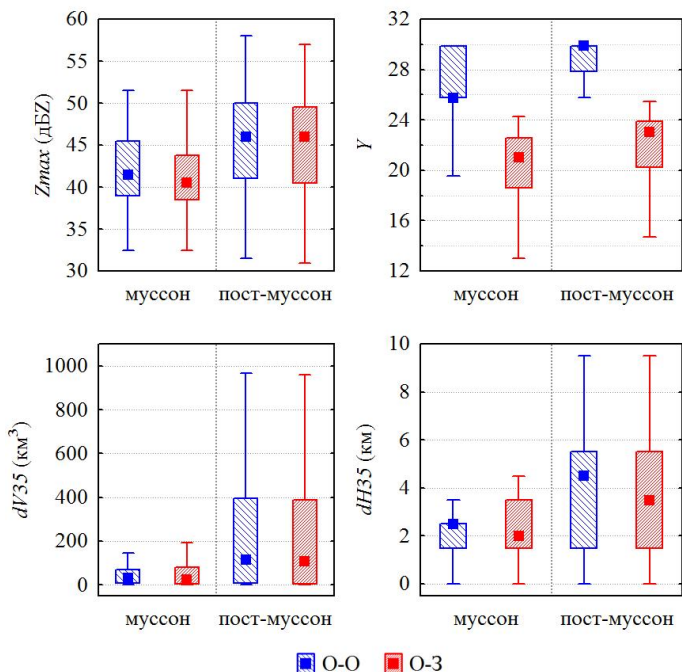


Рисунок 2 – Радиолокационные характеристики муссонных и постмуссонных грозовых облаков для разрядов типа облако-земля (О-З) и внутриоблачных и облако-облако (О-О): максимальная отражаемость (Z_{max}), критерий грозоопасности Y , объем переохлажденной части облака с отражаемостью > 35 дБZ (dV_{35}), вертикальная мощность переохлажденной части облака с отражаемостью > 35 дБZ (dH_{35})

В анализируемой выборке на период действия муссона (42% дней) пришлось 3% от всех зарегистрированных разрядов. Это указывает на слабую электрическую активность муссонных облаков. Такой вывод хорошо согласуется с более низкими (по сравнению с постмуссонным периодом) значениями радиолокационных параметров, в первую очередь – максимальной радиолокационной отражаемости и объемов переохлажденной части облака с высокими значениями отражаемости.

Представлены результаты анализа эволюции радиолокационных параметров облаков при переходе в грозовую стадию с различной заблаговременностью (dt): 11 минут (3 скана), 3 минуты (1 скан) и в момент первых разрядов (0 мин). В большинстве случаев различия медиан оказались статистически незначимыми.

В муссонный период все значимые изменения для $dt = 11$ мин связаны с уменьшением значений параметров, среди них: поток и интенсивность осадков, вертикально интегрированная водность (O-3), а также интенсивность осадков, вертикально интегрированная водность, $dV35$, Z_{max} и другие параметры (O-O). При $dt = 3$ мин значимо только увеличение потока осадков.

В облаках постмуссонного периода также в основном наблюдалось уменьшение значений радиолокационных параметров при начале разрядов: потока осадков, Z_{max} ($dt = 11$ мин, O-3); интенсивность осадков и H_{top} ($dt = 3$ мин, O-3); интенсивность осадков, вертикально интегрированная водность, $dH35$, Y и др. ($dt = 3$ мин, O-O). Рост величин отмечен для $dV30$ и Y ($dt = 11$ мин, O-3), а также для Z_{max} ($dt = 3$ мин, O-O).

Таким образом, определение параметра, который бы являлся хорошим предиктором грозовой активности, осложняется тем, что все рассмотренные радиолокационные параметры демонстрируют различные изменения при начале разрядов в зависимости от рассматриваемого сезона и типа разрядов. Необычным является и изменение значений параметров в сторону уменьшения при переходе облака в грозовую стадию.

Был выполнен регрессионный анализ облаков, построены модели линейной регрессии, связывающие частоту разрядов и различные радиолокационные параметры. Анализ характеристик поля облаков (находящихся на различных стадиях жизни) был выполнен отдельно для муссона и постмуссонного периода. Получены высокие значения рангового коэффициента Спирмена (r) для ряда параметров в постмуссонный период. Эти параметры включают $dV35$ ($r = 0,84$), $dV40$ ($0,84$), Y -критерий грозоопасности

(0,81), N_{top} (0,77). Однако модели линейной регрессии для указанных параметров и частоты разрядов оказываются недостаточно хорошими (имеют незначимые коэффициенты, низкую долю объясненной дисперсии).

Аналогичные образом были оценены связи частоты разрядов и радиолокационных параметров для временных рядов при развитии отдельных облаков – развивавшихся как в тропической атмосфере, так и в умеренных широтах. Для отдельных облаков значения коэффициента Спирмена указывают на наличие сильных связей разрядов с $dV35$ ($r = 0,94$). Однако только для двух из девяти рассмотренных облаков получены достаточно хорошие регрессионные модели:

$$f = 0,0099 \cdot dV35 - 0,4386, \quad (1)$$

($r = 0,79$; $r^2 = 0,63$; $F = 32,05$; $p = 0,000$),

$$f = 0,0596 \cdot dV35 - 7,4062, \quad (2)$$

($r = 0,95$; $r^2 = 0,91$; $F = 105,71$; $p = 0,000$),

где r – коэффициент корреляции (Пирсона), r^2 – коэффициент детерминации, F – критерий Фишера, p – уровень значимости критерия Фишера.

Таким образом, анализ показывает наличие достаточно сильных связей между частотой разрядов и радиолокационными параметрами облаков, однако в большинстве случаев эти связи не могут быть аппроксимированы линейными моделями регрессии. Очевидно, связи носят сложный нелинейный характер.

В главе 3 приведены результаты анализа развития грозовых облаков с использованием численных моделей. С помощью трехмерной нестационарной модели конвективного облака, разработанной рядом научных институтов Росгидромета под руководством ФГБУ «ГГО» подробно исследовано формирование и эволюция микрофизической, электрической структуры облаков, распределение областей восходящих и нисходящих потоков,

изменение характеристик облаков при учете гетерогенного замерзания капель, сильном аэрозольном загрязнении атмосферы, активных воздействиях на облака.

Система уравнений модели описывает перенос импульса, энергии, влажного воздуха, капель, ледяных частиц и электрических зарядов (как упорядоченный перенос, так и турбулентность); фазовые переходы, коагуляцию частиц и микрофизические процессы электризации. Фазовые переходы задаются параметрическими выражениями. Напряженность электрического поля рассчитывается при помощи уравнения Пуассона, на основании данных об объемной плотности заряда.

Уравнение (формулы 3–5) баланса концентрации положительных и отрицательных ионов, объемной плотности заряда облачных капель, облачных ледяных кристаллов, дождевых капель и кристаллических осадков имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{N}_{ion n})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [\bar{\rho} \tilde{N}_{ion n} (\tilde{v}_{air,x} + \alpha_{ion n} E_x)] + \\
 & \quad + \frac{\partial}{\partial y} [\bar{\rho} \tilde{N}_{ion n} (\tilde{v}_{air,y} + \alpha_{ion n} E_y)] + \\
 & \quad + \frac{\partial}{\partial z} [\bar{\rho} \tilde{N}_{ion n} (\tilde{v}_{air,z} + \alpha_{ion n} E_z)] - \\
 & - \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial \tilde{N}_{ion n}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} K \frac{\partial \tilde{N}_{ion n}}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial \tilde{N}_{ion n}}{\partial z} = M_{ion n},
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{N}_{ion p})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [\bar{\rho} \tilde{N}_{ion p} (\tilde{v}_{air,x} - \alpha_{ion p} E_x)] + \\
 & \quad + \frac{\partial}{\partial y} [\bar{\rho} \tilde{N}_{ion p} (\tilde{v}_{air,y} - \alpha_{ion p} E_y)] + \\
 & \quad + \frac{\partial}{\partial z} [\bar{\rho} \tilde{N}_{ion p} (\tilde{v}_{air,z} - \alpha_{ion p} E_z)] - \\
 & - \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial \tilde{N}_{ion p}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} K \frac{\partial \tilde{N}_{ion p}}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial \tilde{N}_{ion p}}{\partial z} = M_{ion p},
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\frac{\partial(\rho\tilde{\tau}_j)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\tilde{\tau}_j\tilde{v}_{air,x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho\tilde{\tau}_j\tilde{v}_{air,y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho\tilde{\tau}_j\tilde{v}_{air,z}) + \left(5\right) \\ - \frac{\partial}{\partial x}K\frac{\partial\tilde{\tau}_j}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y}K\frac{\partial\tilde{\tau}_j}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z}K\frac{\partial\tilde{\tau}_j}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z}(\rho\tilde{\tau}_jV_j) = M_j.$$

где $\tilde{\tau}_j = \{\tilde{\tau}_c, \tilde{\tau}_{ic}, \tilde{\tau}_r, \tilde{\tau}_i\}$ - объемная плотность заряда микрофизических фракций (облачных капель, ледяных кристаллов, дождевых капель и градин соответственно), $M_j = \{M_c, M_{ic}, M_r, M_i\}$. Здесь $M_{ion n}, M_{ion p}, M_c, M_{ic}, M_r, M_i$ — источники-стоки заряда отрицательных и положительных ионов, облачных капель, дождевых капель, облачных ледяных кристаллов и градин соответственно; $\tilde{v}_{air,x}, \tilde{v}_{air,y}, \tilde{v}_{air,z}$ — составляющие вектора скорости движения воздуха; $\tilde{N}_{ion p}, \tilde{N}_{ion n}, \alpha_{ion p}, \alpha_{ion n}$ — концентрация и подвижность положительных и отрицательных ионов соответственно; V_j — скорость седиментации облачных фракций j-го сорта (облачных капель, дождевых капель, ледяных кристаллов и градин); E_x, E_y, E_z — компоненты вектора напряженности электрического поля; K — коэффициент турбулентности; ρ — плотность воздуха. Уравнения записаны в декартовой системе координат.

Активное воздействие (льдообразующим реагентом) в трехмерной модели воспроизводится путем замораживания доли облачных и дождевых капель в заданном слое. Для выбранного случая выполнения работ военизированной службой по активным воздействиям (14 мая 2012 г., Кавказ) было выполнено два расчета: естественное развитие облака и облако, на которое выполнялось воздействие (АВ).

Результаты расчетов показывают увеличение ледности облачных кристаллов сразу после начала АВ и уменьшение содержания всех остальных фракций. После окончания воздействий, однако, их значения восстанавливаются, формируя

вторичные экстремумы временных рядов. При этом абсолютные максимумы водности облачных, дождевых капель и ледности градин в случае АВ уменьшаются.

На рисунке 3 продемонстрировано пространственное распределение областей наибольшего содержания гидрометеоров и плотности объемного заряда непосредственно перед началом разрядов. Показано, что электрическая структура облака является инвертированной: нижний слой заряда – отрицательный. Формирование инвертированной структуры заряда при моделировании АВ объясняется повышенным содержанием облачных ледяных кристаллов, выносимых восходящими потоками в вершину облака. Также в случае воздействий отмечается ускорение перехода облака в грозовую стадию, когда его основные характеристики (высота верхней границы, мощность, скорости восходящего потока и проч.) имеют меньшие значения, чем при естественном развитии. При этом области расположения основной массы частиц осадков (дождевых капель и градин) меняются мало, в то время как вершина облака занята преимущественно облачными кристаллами, а область наибольшего содержания облачных капель смещается ниже. Также при воздействиях увеличивается максимальная частота электрических зарядов.

В работе впервые представлено обобщение расчетов, выполненных при помощи трехмерной численной модели облачной конвекции: проанализированы характеристики облаков при начале электрических разрядов. Анализ выполнен для 10 расчетов, где воспроизводились облака различных регионов (Северо-Кавказского и Северо-Западного региона РФ, Китая) и варьировался учет физических процессов (гетерогенного замерзания и коронных разрядов). Получены статистические характеристики облаков при переходе в грозовую стадию (медианы): высота верхней границы – 6,6 км, скорость восходящего потока в облаке – 20,9 м/с, водность облачных и дождевых капель – 1,8 и 2,8 г/м³, ледность облачных ледяных кристаллов и градин – 0,9 и 4,0 г/м³. При этом наименьшее значение высоты верхней границы облака при начале разрядов

составляет 5,3 км (в расчете учтено влияние коронных разрядов), наименьшая скорость восходящих потоков составляет 14 м/с, ледность града и крупы – 2,4 г/м³. В ряде случаев в период начала разрядов из облака не выпадали осадки.

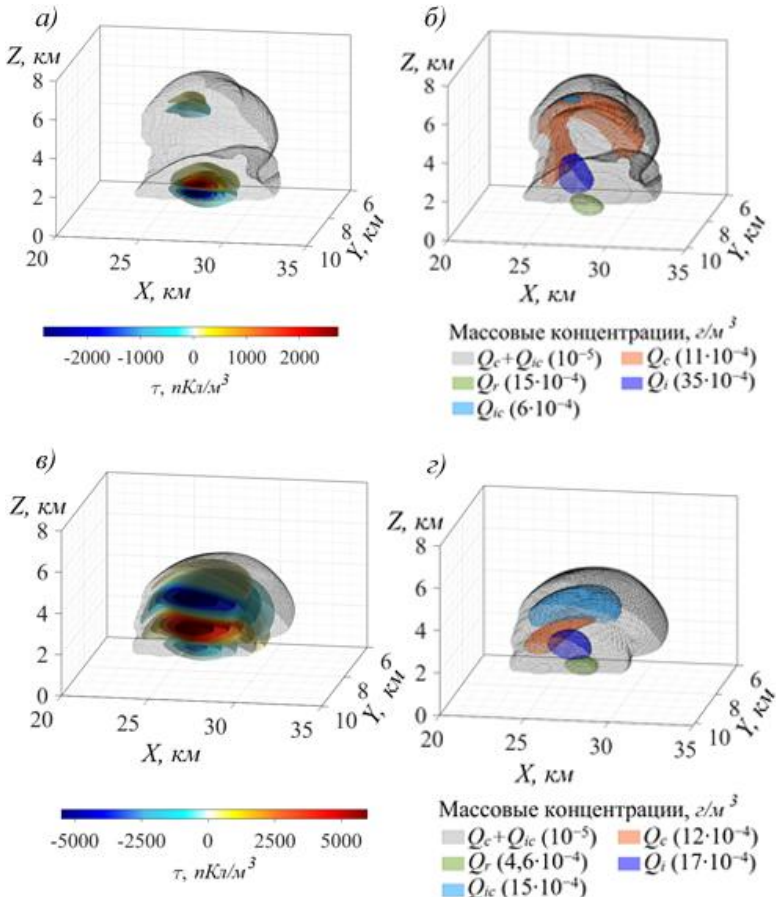


Рисунок 3 – Пространственное распределение объемной плотности электрического заряда и удельного содержания фракций перед первым молниевым разрядом (верхний ряд – естественное развитие облака, нижний – облако с АВ). Q_c , Q_r , Q_i , Q_{ic} – удельное

содержание облачных капель, дождевых капель, градин и облачных ледяных кристаллов соответственно.

Приведены результаты апробации двух разработанных методик ансамблевого прогноза характеристик грозовых облаков с использованием модели конвективного облака малой размерности (ФГБУ «ГГО»). Использовались две версии модели: полная (с электрическими процессами) и физико-статистическая (без электризации, с эмпирическими критериями опасных явлений). Вносились возмущения в данные аэрологического зондирования (серия из 30 расчетов) и выполнялся контрольный. Возмущения вносились в значения температуры и влажности: только в приземные значения (первая методика), на всех вертикальных уровнях (вторая). Результаты показали, что наиболее чувствительными к вносимым возмущениям оказались микрофизические характеристики облаков и их функции (максимальная радиолокационная отражаемость). Обе методики показали хорошее соответствие данным радиолокационных измерений.

В заключении приведены основные результаты работы.

В ходе выполнения работы исследованы характеристики грозовых облаков и атмосферы с использованием радиолокационных данных и численного моделирования. Были рассмотрены облака Северо-Запада России, Северного Кавказа, Индии и Китая.

По данным радиолокационных наблюдений получено, что грозовые облака в Индии имеют достаточно малые значения максимальной радиолокационной отражаемости (по сравнению с облаками умеренных широт). Принимая во внимание невысокие значения частоты разрядов в грозовых облаках, это может указывать на малое содержание крупных ледяных частиц в облаках Индии.

Показано, что характеристики грозовых облаков в Индии значительным образом различаются для различных режимов

циркуляции: муссонного и постмуссонного. В муссонный период облака имеют малую (относительно постмуссонного) высоту верхней границы, радиолокационную отражаемость, переохлажденные объемы облака и другие параметры.

Получено, что единственный радиолокационный параметр, демонстрирующий статистически значимые изменения при начале электрических разрядов – для Северо-Запада РФ, Северного Кавказа и Индии – высота верхней границы облака.

Выявлено, что в умеренных широтах наблюдается увеличение значений радиолокационных параметров при начале разрядов, в то время как в тропической атмосфере – главным образом уменьшение. В совокупности с малой радиолокационной отражаемостью, невысокой молниевой активностью и редкостью выпадения града (по литературным данным) в Индии это может указывать на действие иных механизмы электризации.

Выполненный регрессионный анализ связей частоты разрядов с различными радиолокационными параметрами показал, что для поля облаков такие связи существуют, но не могут быть аппроксимированы моделями линейной регрессии. Для временных рядов параметров отдельных облаков в ряде случаев такие модели построены. Это указывает на сложный нелинейный характер связей и взаимодействий различных процессов при электризации облаков.

По результатам численного моделирования продемонстрировано, что активные воздействия льдообразующим реагентом ускоряют переход облака в грозовую стадию, электрические разряды начинают формироваться при меньших (по сравнению с естественным развитием облака) значениях основных термодинамических параметров, усиливается электризация облака (увеличивается частота разрядов) и возможно формирование инвертированной структуры заряда.

Выполнено обобщение расчетов с использованием трехмерной численной модели. Получены статистические характеристики облаков при переходе в грозовую стадию (медианы): высота верхней границы – 6,6 км, скорость восходящего

потока в облаке – 20,9 м/с, водность облачных и дождевых капель – 1,8 и 2,8 г/м³, ледность облачных ледяных кристаллов и градин – 0,9 и 4,0 г/м³.

Предложены две методики выполнения ансамблевого прогноза параметров грозовых облаков с использованием модели конвективного облака малой размерности. Результаты расчетов показали, что наиболее чувствительными к вносимым в начальные данные возмущениям являются микрофизические характеристики облаков и осадков. Показано, что сильнее всего прогнозируемые характеристики реагируют на возмущения, вносимые в приземные значения начальных данных. Показано хорошее соответствие данным наблюдений.

Публикации соискателя по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертационных исследований:

1. Торопова М.Л., Русин И.Н. Воспроизведение стратификации атмосферы с целью прогноза конвективных явлений при помощи мезомасштабной модели WRF-ARW // Труды ГГО. 2019. Вып. 593. С. 160–176.

2. Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А. Михайловский Ю. П., Торопова М. Л. Исследование динамики электрической структуры грозоградового кучево-дождевого облака по данным трехмерного численного моделирования (на примере северо-запада России) // Труды ГГО. 2019. Вып. 592. С. 7–22.

3. Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Торопова М. Л., Синькевич А. А., Михайловский Ю. П. Численное моделирование влияния электрических процессов на формирование опасных явлений погоды, связанных с конвективными облаками // Труды ГГО. 2019. Вып. 595. С. 63–82.

4. Михайловский Ю. П., Синькевич А. А., Абшаев А. М., Торопова М. Л. О методах воздействия на электрические процессы в облаках // Труды ГГО. 2021. Вып. 602. С. 6–22.

5. Торопова М. Л. Параметры конвективных облаков при переходе в грозовую стадию по данным трехмерного численного моделирования // Труды ГГО. 2021. Вып. 602. С. 23–41.

6. Торопова М. Л., Веремей Н. Е., Михайловский Ю. П., Куров А. Б., Синькевич А. А. Прогноз развития грозовых облаков с использованием ансамблевого подхода на базе моделей малой размерности // Гидрометеорология и экология. 2023. № 72. С. 432–448.

7. Торопова М. Л., Веремей Н. Е., Синькевич А. А., Куров А. Б., Федотова Г. Д. Исследование эффективности активных воздействий на град // Труды ГГО. 2024. Вып. 614. С. 60–72.

8. Синькевич А. А., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Куров А. Б., Михайловский Ю. П., Богданов Е. В., Торопова М. Л., Игнатъев А. А., Аджиев А. Х., Малкарова А. М., Абшаев А. М., Гопалакришнан В., Муругавел П., Павар С. Д. Исследования развития грозо-градового облака. Часть 3. Численное моделирование эволюции облака // Метеорология и гидрология. 2017. №8. С. 18 – 28.

9. Попов В.Б., Синькевич А.А., Янг Дж., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Старых Д.С. Характеристики и структура кучево-дождевого облака с водяным смерчем над Финским заливом // Метеорология и гидрология. 2020. №9. С. 5-16.

10. Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Попов В.Б., Лу Дж., Янг Дж. Исследования механизмов электризации и связи частоты электрических разрядов с радиолокационными характеристиками грозового облака в Китае // Метеорология и гидрология. 2020. №10. С. 63-72.

11. Синькевич А.А., Торопова М.Л., Михайловский Ю.П., Попов В.Б., Павар С., Гопалакришнан В. Особенности взаимосвязей электрических и радиолокационных параметров грозовых облаков в Индии (натурные исследования) // Метеорология и гидрология. 2021. №6. С. 99-106.

12. Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А., Михайловский Ю. П., Торопова М. Л., Янг Д., Сун М. Влияние сильного аэрозольного загрязнения воздуха на эволюцию конвективных облаков во время грозы в Китае по результатам трехмерного численного моделирования // Метеорология и гидрология. 2022. № 3. С. 55-67.

13. Торопова М. Л., Синькевич А. А., Павар С., Гопалакришнан В., Михайловский Ю. П. Характеристики грозовых облаков муссонного и постмуссонного периодов в Индии // Метеорология и гидрология. 2022. № 8. С. 68-79.

Публикации в других рецензируемых изданиях:

14. Синькевич А.А., Попов В.Б., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Старых Д.С. Характеристики кучево-дождевого облака с водяным смерчем над Ладожским озером по данным дистанционных измерений // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 2. С. 153-158. doi: 10.15372/AOO20200211.

15. Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Попов В.Б., Старых Д.С., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е. Строение грозового облака со смерчем и зависимость частоты молний от его характеристик // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 9. С. 705-709. doi: 10.15372/AOO20200907.

16. Абшаев А.М., Аджиев А.Х., Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Михайловский Ю.П., Попов В.Б., Синькевич А.А., Торопова М.Л. Развитие электризации конвективного облака по данным эмпирической и численной моделей // Труды военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2020. № S674. С. 68-74.

17. Синькевич А.А., Попов В.Б., Абшаев А.М., Боу Б., Павар С.Д., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Гопалакришнан В., Геккиева Ж. М. Радиолокационные характеристики конвективных облаков разных регионов при переходе в грозовую стадию // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. №12 (383). С. 932-936. doi: 10.15372/AOO20201205.

18. Sin'kevich, A., Boe B., Pawar S., Yang J., Abshaev A., Dovgaluk Y., Gekkieva J., Gopalakrishnan V., Kurov A., Mikhailovskii Y., Toropova M., Veremei N. Investigation of Thundercloud Features in Different Regions. // Remote Sens., 2021, Vol. 13, 3216. Doi: 10.3390/rs13163216.

19. Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Синькевич А.А., Янг Дж., Лу Дж. Динамика электрической структуры кучево-дождевых облаков // Известия вузов: Радиофизика. 2021. №5. С. 341–353. doi: 10.52452/00213462_2021_64_05_341.

20. Михайловский Ю. П., Зайнетдинов Б. Г., Синькевич А. А., Pawar S. D., Торопова М. Л., Куров А. Б., Gopalakrishnan V. Об эффективности контроля электрического состояния облаков дистанционными радиофизическими средствами в ближней зоне // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 3(398). С. 205-211.